

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**MODELO NUMÉRICO PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO
SÍSMICO DE UNA VIVIENDA DE ADOBE DE DOS PISOS CON
REFUERZO METÁLICO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL**

Autora

Ing. Elisa Raquel Quintanilla Herrera

Asesor

Dr. Jorge Marcial Blondet Saavedra

Lima, Octubre del 2020



Dedicatoria

A mis papás Nancy, Gaby y Amancio por creer siempre en mí.

A Arianita por ser mi alegría e impulso desde hace dos años.

Gracias eternas, se los debo todo.

Agradecimientos

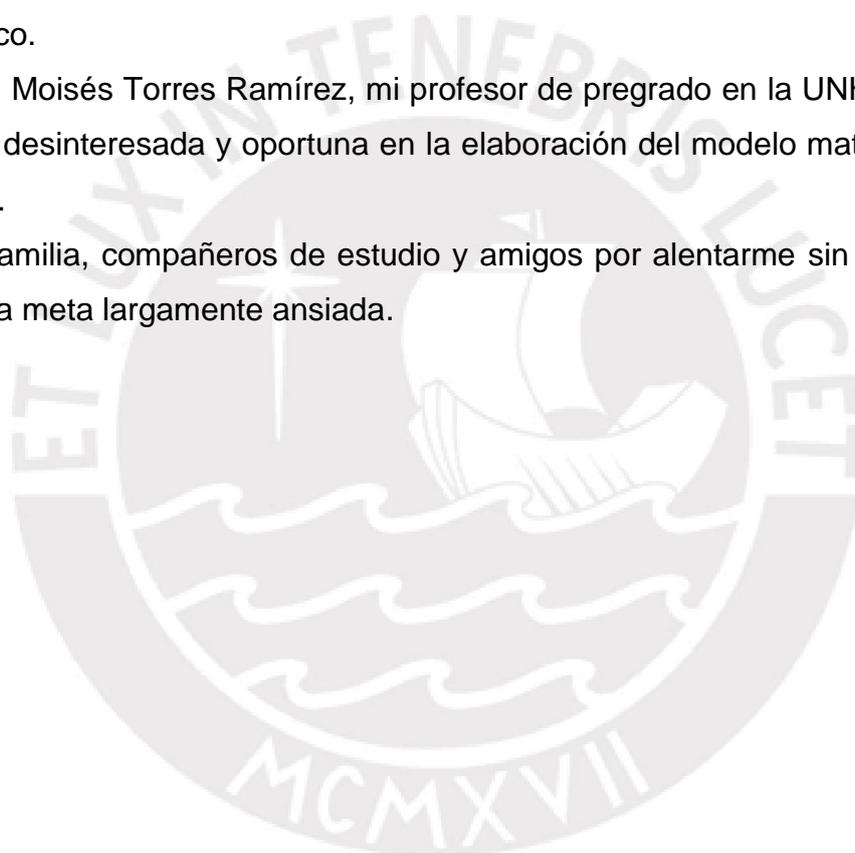
Un reconocimiento especial y sincero al Dr. Marcial Blondet por asesorarme de manera incondicional durante el desarrollo de los cursos de investigación y de la presente tesis.

A la ingeniera Gladys Villa García y todo el personal del Laboratorio de Estructuras, por brindarme el tiempo e información necesarios para mi trabajo de investigación.

A los ingenieros Francisco Ginocchio, Yalí Barrera, César Falconí, por participar conmigo en el procesamiento de datos y optimización del modelo matemático.

Al Ing. Moisés Torres Ramírez, mi profesor de pregrado en la UNHEVAL, por su ayuda desinteresada y oportuna en la elaboración del modelo matemático en SAP2000.

A mi familia, compañeros de estudio y amigos por alentarme sin desmayo a lograr esta meta largamente ansiada.



Resumen

El adobe es el material constructivo más usado por personas pobres en el Perú. Durante los últimos cincuenta años se han realizado numerosas investigaciones en la PUCP para conocer, predecir y evaluar el comportamiento de este material así como reducir su vulnerabilidad sísmica reforzándolo con diferentes sistemas y materiales constructivos de bajo costo y fácil instalación. Estos esfuerzos se han registrado en artículos científicos y manuales de construcción de viviendas de adobe que ha publicado la Universidad.

El profesor Joseph Adell, plantea el empleo de una adaptación del sistema ALLWALL, consistente en cerchas tridimensionales para reforzar viviendas de adobe, con ello se genera una nueva investigación a través de un Proyecto UPM-PUCP, creándose un primer modelo experimental para una vivienda de dos pisos que se somete a ensayo de simulación sísmica en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad. Durante el ensayo de simulación sísmica, se apreció que la estructura representa de manera realista su respuesta en el rango elástico, los adobes aportan principalmente masa y el Sistema de Albañilería Integral (en adelante SAI) incrementa su ductilidad.

El trabajo de investigación presentado a continuación, procesa y determina las características dinámicas del modelo experimental, elabora un modelo analítico que represente su respuesta sísmica en el rango elástico utilizando el método de elementos finitos y compara el comportamiento de ambos, determina la efectividad del sistema de refuerzo y su factibilidad de aplicación.

Queda pendiente el desarrollo de un modelo que prediga el comportamiento inelástico de estructuras de adobe, así como la representación precisa de la interacción entre muros de adobe y su refuerzo con el ALLWALL System que podrán ser abarcados como líneas futuras de investigación.

Palabras Clave Adobe, SAI, Modelo analítico, comportamiento elástico, muros a corte y flexión.

Abstract

Adobe is the construction material most used by poor people in Peru. During the last fifty years, numerous investigations have been carried out at the PUCP to know, predict and evaluate the behavior of this material as well as to reduce its seismic vulnerability by reinforcing it with different low-cost and easy-to-install construction materials and systems. These efforts have been recorded in scientific articles and adobe house construction manuals published by the University.

Professor Joseph Adell, proposes the use of an adaptation of the ALLWALL system, consisting of three-dimensional trusses to reinforce adobe houses, with this a new investigation is generated through a UPM-PUCP Project, creating a first experimental model for a house of two floors that are subjected to seismic simulation testing at the University Structures Laboratory. During the seismic simulation test, it was appreciated that the structure realistically represents its response in the elastic range, the adobes mainly contribute mass and the Integral Masonry System (hereinafter SAI) increases its ductility.

The research work presented below, processes and determines the dynamic characteristics of the experimental model, develops an analytical model that represents its seismic response in the elastic range using the finite element method and compares the behavior of both, determines the effectiveness of the system of reinforcement and its feasibility of application.

The development of a model that predicts the inelastic behavior of adobe structures is pending, as well as the precise representation of the interaction between adobe walls and their reinforcement with the ALLWALL System, which may be covered as future lines of research.

Keywords Adobe, SAI, Mathematical model, elastic behavior, shear and bending walls.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Técnicas de Refuerzo de Edificaciones de Adobe	8
1.2.1 Refuerzo Tradicional (caña natural).....	8
1.2.2 Refuerzo Polimérico (malla).....	9
1.2.3 Refuerzo con Malla Electrosoldada Recubierto con Mortero de Cemento.	10
1.2.4 Refuerzo con el Sistema de Albañilería Integral (SAI).	11
1.3 Justificación e Hipótesis	14
1.4 Objetivos.....	14
1.5 Organización del Trabajo	15
2. SISTEMA DE ALBAÑILERÍA INTEGRAL (SAI)	17
2.1 Historia y Descripción	17
2.2 El SAI como Sistema de Refuerzo de Viviendas de Adobe de Dos Pisos 	19
2.3 Procedimiento Constructivo para Viviendas de Adobe.....	21
3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL	24
3.1 Propiedades de los Materiales y Componentes	24
3.1.1 Propiedades de la Mampostería de Adobe.	24
3.1.2 Propiedades del SAI.	25
3.1.3 Características de las planchas de triplay.....	25
3.2 Modelo de ensayo	26
4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	30
4.1 Instrumentación del Modelo Experimental	30
4.2 Protocolo de Ensayo.....	32
4.3 Señales de Excitación.....	33
4.3.1 Pulso Rectangular para Vibración Libre.....	33
4.3.2 Señal de Comando.	34

4.3.3	Secuencias del Ensayo.....	34
5.	REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DE SIMULACIÓN SÍSMICA	37
5.1	Vibración Libre	37
5.1.1	Períodos Naturales de Vibración de Cada Muro.....	37
5.1.2	Cálculo del Amortiguamiento de Cada Muro. Método de Decremento Logarítmico.....	38
5.2	Comportamiento Observado en cada Fase del Ensayo.....	42
5.2.1	Después de la Fase I.....	42
5.2.2	Después de la Fase II.....	42
5.2.3	Después de la Fase III.....	43
5.2.4	Después de la Fase IV.....	44
5.3	Procesamiento de Datos Experimentales	46
6.	MODELO NUMÉRICO DE LOS ENSAYOS	52
6.1	Análisis Lineal con el Método de Elementos Finitos	52
6.2	Propiedades Mecánicas de los Elementos	52
6.3	Modelos Analíticos.....	54
6.3.1	Modelo SAI CERCHAS TECHO.....	54
6.3.2	Modelo SAI ADOBES SUJETOS	57
6.3.3	Modelo SAI 4 PUNTOS.....	60
6.3.4	Modelo SAI SOLO BASE.....	62
6.3.5	Modelo SAI SOLO CARGAS.....	64
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
8.	ANEXOS.....	72
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

Lista de Figuras

Fig. 1.1 Mapa de Sismicidad del Perú.....	1
Fig. 1.2 Viviendas de adobe de dos pisos en Huánuco: a) En la zona rural. b) En la zona urbana.....	2
Fig. 1.3 Viviendas de adobe con bases socavadas por las lluvias. Zona urbana de Huánuco.....	2
Fig. 1.4 Elaboración artesanal de adobes: sección irregular y secado a la intemperie.....	3
Fig. 1.5 Secado y almacenamiento de unidades de adobe a la intemperie (izq. y der. superior). Ruptura de unidades sin uso: poca cantidad de paja, granulometría irregular y uso de piedras mayores a 1/2" (der. inferior).....	3
Fig. 1.6 Viviendas de tierra de dos pisos. a) Adobe en segundo piso sobre tapial en primer piso. b) Construcción de tapial de dos pisos.....	4
Fig. 1.7 Colapso de primer piso de adobe, sobre el cual se construyó con albañilería. Pisco – Perú, sismo agosto de 2007. (Departamento de Ingeniería Civil. PUCP).	4
Fig. 1.8 Iglesia Mayor de Churubamba, de adobe enlucido con barro y pintado. Izquierda: vista frontal. Superior derecha: vista lateral. Inferior derecha: vista posterior.	5
Fig. 1.9 Detalle muro lateral de la Iglesia Mayor, adobes con unidades e hiladas desiguales, juntas de diferente espesor sin llenar por completo. Churubamba, Huánuco.....	5
Fig. 1.10 Colapso de vivienda con baja adherencia adobe-mortero. Sismo de Pisco, Perú 2007. (Misión CERESIS – UNESCO).	6
Fig. 1.11 a) Separación de muros por falta de elementos de confinamiento. b) Caída de muro por volteo.....	6
Fig. 1.12 a) Colapso de muros por falta de elementos de confinamiento. www.lineadetiempo.iep.org.pe . b) Encuentro de muros sin conexiones dentadas entre sí. Sismo en Pisco, Perú 2007 (Misión CERESIS/UNESCO).....	7
Fig. 1.13 a) Falla de muro por fuerzas actuantes en su plano. b) Detalle de mortero con piedras demasiado grandes para el tamaño de las juntas.	7

Fig. 1.14 Colapso de viviendas de adobe durante el sismo de agosto 2007 en Pisco mientras las edificaciones con otro sistema constructivo no colapsaron. www.radiouno.pe/imagenes	8
Fig. 1.15 Refuerzo de viviendas de adobe con caña natural. (Departamento de Ingeniería Civil PUCP)	9
Fig. 1.16 Esquema de zonas de refuerzo con red polimérica (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).	9
Fig. 1.17 Detalles de refuerzo con red polimérica en muros de adobe (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).....	10
Fig. 1.18 a) Espacio para el diente de concreto en extremos de la viga solera. b) Vivienda reforzada con malla electrosoldada. (Departamento de Ingeniería PUCP).	10
Fig. 1.19 Esquema de detalle de elementos constitutivos de la vivienda modular de dos pisos reforzada con el SAI (Adell, Bustamante y Dávila, 2005).	11
Fig. 1.20 Vivienda modular de dos pisos Tipo 4 (Adell, Bustamante y Dávila, 2005).	12
Fig. 1.21 Vivienda modular de un piso Tipo 3 (Adell, Bustamante y Dávila, 2005).	12
Fig. 1.22 Modelo experimental de vivienda de adobe de dos pisos reforzada con SAI.	14
Fig. 2.1 Esquema de “la fábrica armada”. Cerchas horizontales y dos tipos de anclajes a elementos verticales de concreto armado (Adell, 2005).....	17
Fig. 2.2 Elementos del SAI a) Medidas de unidades de albañilería y cerchas disponibles. b) Anclajes para unión de cerchas entre sí y fijación de cerchas a piso y techo. (Adell, 2005)	18
Fig. 2.3 Superior: anclaje de elementos verticales a losa de entrepiso; fachada lateral enchapada; muro interior del hotel. Inferior izquierda: Hotel en construcción. Inferior derecha: Vista nocturna del Hotel de las Bodegas Marqués de Riscal (Adell, 2005).	18
Fig. 2.4 Geometría de una cercha: cuatro alambres longitudinales de 8mm. y uno diagonal de 6mm. Armadura en toda su dimensión (Adell, 2007).	19
Fig. 2.5 Proceso de enhebrado entre cerchas ortogonales: acceso lateral, giro y curvado (Adell, 2007)	20

Fig. 2.6 Engarce de cerchas ortogonales: acceso lateral, giro y curvado (Adell, 2007).	20
Fig. 2.7 Disposición de cerchas sobre la cimentación: 0. Cimentación 1. Cercha en costilla vertical; 2. Cercha en armadura de tendel; 3. Cercha en zuncho; 4. Cercha en vigueta; 5. Pieza de adobe; 6. Grosor de forjado; 7. Tarrajeo sobre malla de gallinero. Vista en perspectiva de la configuración con muro de adobe de cabeza. (Adell, 2007).	21
Fig. 2.8 a) Detalle de unión entre cerchas verticales y horizontales en esquina. b) Modulado de adobes acorde a los vanos entre cerchas (Departamento Ing. Civil PUCP).	22
Fig. 2.9 Vanos de puertas y ventanas durante la construcción y ya terminado el muro sin tarrajeo, se aprecian las cerchas como dinteles. (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).	22
Fig. 2.10 a) Esquema de disposición de escalera. b) Esquema de disposición de cerchas en el perímetro de la vivienda de 5,40 m con ganchos en las esquinas. (Adell y otros, 2007).	23
Fig. 3.1 Unidades y medias unidades de adobe construidas para el modelo experimental del convenio PUCP-UPM (Departamento de Ingeniería PUCP)...	24
Fig. 3.2 Configuración de las cerchas para el modelo experimental.	25
Fig. 3.3 a) MA, durante la construcción. b) MP y MI del Modelo Experimental instalado e instrumentado sobre la mesa vibradora. (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).	26
Fig. 3.4 Esquema en planta y elevación del modelo experimental (medidas en m). (PUCP Departamento Ingeniería Civil)	27
Fig. 3.5 Anillo de cimentación pintado (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).	28
Fig. 3.6 a) Anclaje y soldadura al anillo de cimentación. b) Ensamblaje tridimensional formando parrillas y muros, a tramos equidistantes de 0,45 m (Departamento de Ingeniería Civil PUCP)	28
Fig. 3.7 a) Asentado de adobes y pasadores de rafia para muro tarrajeado. b) Colocación de malla polimérica y tarrajeo de muros (PUCP Departamento de Ingeniería Civil).	29

Fig. 3.8 a) Izaje de la estructura en el patio del Laboratorio. b) Traslado e instalación del modelo sobre la mesa vibradora unidireccional (Departamento de Ingeniería PUCP).	29
Fig. 4.1 Esquema de ubicación de los instrumentos en MA y MP.....	31
Fig. 4.2 Esquema de ubicación de los instrumentos en MD y MI.....	31
Fig. 4.3 Modelo experimental con los instrumentos colocados. a) MA y MD. b) MP y MI.	32
Fig. 4.4 Ubicación de equipos e instrumentos para la toma de datos durante el ensayo: Cámaras de video: posiciones 1, 2 y 3. Cámaras fotográficas: posiciones 4, 5 y 6 (PUCP).	32
Fig. 4.5 Pulso rectangular aplicado a la mesa vibradora.....	33
Fig. 4.6 Registro de aceleración del sismo de Lima ocurrido el 31 de mayo de 1970.	34
Fig. 4.7 Desplazamiento correspondiente al sismo de Lima ocurrido el 31 de mayo de 1970.....	34
Fig. 4.8 Registro de desplazamientos en la mesa vibradora para cada fase del ensayo.....	35
Fig. 4.9 Registro de aceleraciones en la mesa vibradora para cada fase del ensayo.....	36
Fig. 5.1 Estructura en vibración libre y elección de intervalo de respuesta (6 a 7s).	37
Fig. 5.2 Períodos T_1 y T_n en el gráfico de respuesta al pulso rectangular.	38
Fig. 5.3 Amplitudes de dos ciclos del gráfico de respuesta al pulso rectangular.	38
Fig. 5.4 Respuesta de cada muro en vibración libre inicial (antes de Fase I)	40
Fig. 5.5 Muestra tres fisuras en el primer piso de MI.....	42
Fig. 5.6 Muestra fisuras horizontales y verticales en MI, tarrajeo empezó a desprenderse.	43
Fig. 5.7 a) Muestra tres fisuras en MD. b) MP y MI presentan fisura horizontal en alféizar de ventanas de segundo piso y otras con la forma de los bloques dentro de las cerchas.	43
Fig. 5.8 Muestra daño en MD del modelo experimental.	44
Fig. 5.9 a) Muestra deformación en vano de puerta MP. b) MD muestra fisuras internas.	44

Fig. 5.10 a) Muestra deterioro en MA y MD. b) Muestra separación de los bloques de adobe y deterioro en MP y MI.	45
Fig. 5.11 Muestra fisuras en ventana izquierda de segundo piso MP.	45
Fig. 5.12 Registro de Aceleración y Desplazamiento en la mesa vibradora durante Fase IV.	46
Fig. 5.13 Gráficos de Desplazamiento vs. Tiempo de MA (flexión) y MD (corte).	47
Fig. 5.14 Gráficos de Aceleración vs. Tiempo de MA (flexión) y MD (corte).	48
Fig. 5.15 Lazos de histéresis a nivel de techo de MA (flexión) y MD (corte).	49
Fig. 6.1 Sección transversal de la cercha y su sección equivalente.	53
Fig. 6.2 a) Muestra MI y MA. b) Muestra MD y MP.	54
Fig. 6.3 Modelo SAI CERCHAS TECHO, cerchas en entrepiso y techo.	55
Fig. 6.4 Modelo SAI CERTECHO MOD, al asignarle un factor de 0,00025 a los bloques de adobe.	56
Fig. 6.5 Desplazamiento de MD (corte) a nivel de techo. Modelo experimental vs. SAI CERTECHO MOD.	56
Fig. 6.6 Desplazamiento de MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI CERTECHO MOD.	56
Fig. 6.7 Modelo SAI ADOBES SUJETOS, constituido por elementos frame equivalentes con planchas de triplay en entrepiso y techo.	58
Fig. 6.8 Modelo SAI CERTECHO MOD, asignando un factor de 0,005 a los bloques de adobe.	58
Fig. 6.9 Desplazamiento de MD (corte) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI ADOSUJETOS MOD.	59
Fig. 6.10 Desplazamiento en MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI ADOSUJETOS MOD.	59
Fig. 6.11 Modelo SAI 4 PUNTOS, bloques de cuatro adobes unidos en las aristas de las cerchas.	60
Fig. 6.12 Modelo SAI 4PTOS MOD, con factor de 0,0043 en los bloques de adobe.	61
Fig. 6.13 Desplazamiento en MD (corte) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI 4PTOS MOD.	61
Fig. 6.14 Desplazamiento de MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI 4PTOS MOD.	62

Fig. 6.15 Modelo SAI SOLO BASE, con un bloque de adobe unido a la base en cada vano.....	63
Fig. 6.16 Desplazamiento de MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI SOLO BASE.....	63
Fig. 6.17 Desplazamiento en MD (corte) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI SOLO BASE.....	64
Fig. 6.18 Modelo SAI SOLO CARGA, constituido en su totalidad por elementos frame equivalentes con planchas de triplay en entrepiso y techo.	65
Fig. 6.19 Desplazamiento de MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI SOLO CARGA.....	65
Fig. 6.20 Desplazamiento en MD (corte) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI SOLO BASE.....	66
Fig. 8.1 GRÁFICAS DE DESPLAZAMIENTO ABSOLUTO vs. TIEMPO PARA TODOS LOS INSTRUMENTOS Y CADA FASE DE ENSAYO	72
Fig. 8.2 GRÁFICAS DE DESPLAZAMIENTO RELATIVO vs. TIEMPO PARA TODOS LOS INSTRUMENTOS Y CADA FASE DE ENSAYO	76
Fig. 8.3 GRÁFICAS DE ACELERACIÓN vs. TIEMPO PARA TODOS LOS INSTRUMENTOS Y CADA FASE DE ENSAYO	80
Fig. 8.4 GRÁFICAS DE LAZOS DE HISTÉRESIS PARA CADA INSTRUMENTO DURANTE LAS CUATRO FASES DEL ENSAYO.....	84

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Tabla comparativa de los sistemas de refuerzo estructural de viviendas de adobe.	13
Tabla 3.1 Características de los materiales constituyentes del modelo experimental.....	26
Tabla 3.2 Pesos de componentes del modelo de ensayo	27
Tabla 4.1 Identificación, descripción y ubicación de los instrumentos colocados en el modelo experimental para ensayos de simulación sísmica.....	30
Tabla 4.2 Secuencia del Ensayo	33
Tabla 5.1 Parámetros dinámicos: período (T), frecuencia y amortiguamiento para cada muro a nivel de techo.	41
Tabla 5.2 Valores máximos de desplazamiento en la mesa vibradora, primer y segundo piso del MA e instante en que se producen.....	50
Tabla 5.3 Valores máximos de desplazamiento en la mesa vibradora, primer y segundo piso del MD e instante en que se producen.....	50
Tabla 5.4 Valores máximos de aceleración en la mesa vibradora, primer y segundo piso del MA e instante en que se producen.....	50
Tabla 5.5 Valores máximos de aceleración en la mesa vibradora, primer y segundo piso del MD e instante en que se producen.....	51
Tabla 6.1 Tabla resumen de datos principales de los modelos analíticos.....	67

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Perú es un país sísmico. Su territorio costero es atravesado longitudinalmente por el Cinturón de Fuego del Pacífico además de la presencia del fenómeno de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Por ello, principalmente en la costa es probable la ocurrencia de eventos sísmicos moderados y severos. En la sierra, desde 1570 se han producido más de 25 terremotos de magnitud mayor o igual a 8, lo que quiere decir que se presenta uno cada 15 años. Estos eventos ponen en riesgo a la población, sus viviendas y demás edificaciones. (Giesecke y Silgado, 1981). La Fig.1.1 presenta la magnitud y profundidad de los sismos producidos en nuestro territorio entre 1900 y 2001 (IGP, 2001).

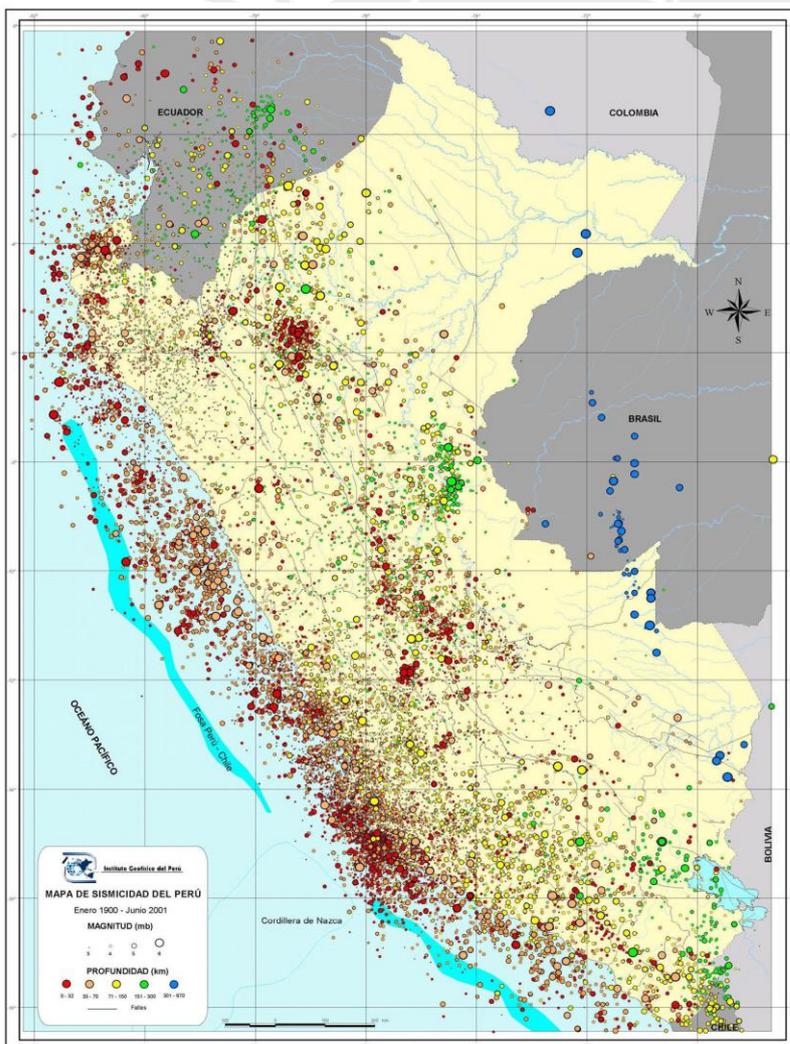


Fig. 1.1 Mapa de Sismicidad del Perú

En Perú se construye con adobe, quincha y/o tapial desde épocas muy antiguas, frecuentemente se emplean estos métodos constructivos indistintamente. La información del último Censo, indica que el 20.5% de viviendas en área urbana y 69.9% de viviendas en área rural son de tierra (INEI, 2017), principalmente habitadas por personas de bajos recursos económicos. La Fig. 1.2, muestra viviendas de dos pisos construidas con adobe en la zona rural y urbana del departamento de Huánuco.



Fig. 1.2 Viviendas de adobe de dos pisos en Huánuco: a) En la zona rural. b) En la zona urbana.

La construcción con adobe ofrece como ventajas: es un material de disponibilidad inmediata, es de fácil elaboración y edificación, resulta prácticamente gratuito, posee excelentes propiedades térmicas y acústicas. En contraparte presenta desventajas: vulnerabilidad sísmica con fallas frágiles ante movimientos relativamente leves y problemas estructurales al ser expuesto a la humedad (lluvias en la sierra e inundaciones en las tres regiones, ver Fig. 1.3) (Blondet y otros, 1989).



Fig. 1.3 Viviendas de adobe con bases socavadas por las lluvias. Zona urbana de Huánuco.

Las técnicas de fabricación de los adobes se rigen por los conocimientos empíricos de la población, muy pocos conocen y aplican la Norma Peruana de Adobe E.080. Las unidades que se fabrican tienen composición irregular, se va incorporando paja, suelo y agua sin controlar las proporciones ni la granulometría o plasticidad de la tierra, muchas veces se incluyen piedras de diámetro superior a $\frac{1}{2}$ " , no se emplean moldes adecuados o no se llenan por completo y se obtienen elementos de sección variable o con aristas truncas, los elementos no se secan en sombra, más bien se dejan expuestos al Sol lo cual facilita la fisuración de las unidades, disminuyendo su resistencia (ver Fig. 1.4 y 1.5) (Bariola y otros, 1984).



Fig. 1.4 Elaboración artesanal de adobes: sección irregular y secado a la intemperie.



Fig. 1.5 Secado y almacenamiento de unidades de adobe a la intemperie (izq. y der. superior). Ruptura de unidades sin uso: poca cantidad de paja, granulometría irregular y uso de piedras mayores a $\frac{1}{2}$ " (der. inferior).

Por lo indicado anteriormente, las unidades de adobe presentan a menudo: contracción irregular durante el secado, secciones variables y/o vacíos que luego deben ser llenados con mortero, ruptura antes de ser usadas y mala calidad de la mezcla entre otras deficiencias que afectan su desempeño estructural e incrementan la vulnerabilidad de este material ante solicitaciones sísmicas (Blondet y otros, 2011).

Ocurre lo mismo en el proceso de autoconstrucción de las edificaciones, los pobladores no aplican procedimientos definidos ni métodos de diseño, no se aplican técnicas constructivas eficientes y las tradiciones se transmiten de una generación a otra repitiendo los mismos errores, como elegir una geometría estructural inadecuada o aceptar que el edificio tenga distribución irregular en planta, muchas viviendas son de dos pisos y algunas tienen el primer piso de tapial y el segundo de adobe como se muestra en la Fig. 1.6. Las edificaciones son débiles y ante un sismo, presentan falla frágil en muros a flexión y corte lo que no permite la evacuación oportuna y puede ocasionar pérdida de vidas y daño severo a los ocupantes, ver Fig. 1.7 (Blondet y otros, 2007).



Fig. 1.6 Viviendas de tierra de dos pisos. a) Adobe en segundo piso sobre tapial en primer piso. b) Construcción de tapial de dos pisos.



Fig. 1.7 Colapso de primer piso de adobe, sobre el cual se construyó con albañilería. Pisco – Perú, sismo agosto de 2007. (Departamento de Ingeniería Civil. PUCP).

Uno de los factores importantes para una albañilería resistente es garantizar la integridad del conjunto adobe-mortero, que está dada por el asentado de unidades uniformes con juntas bien rellenas además del control de secado del mortero, pues la fisuración inicial se produce debido a la transferencia de humedad inicial a los adobes (Bariola y otros, 1984). En la Fig. 1.8 se muestra la Iglesia Mayor de Churubamba en Huánuco, con una configuración típica, distribución irregular en planta: nave central, dos alas laterales y una torre, varias salientes a los lados y en el fondo, esbelta, con altura aproximada de 7,00 m. La Fig. 1.9 muestra uno de los muros de adobe en el que las unidades tienen diferentes dimensiones y por ello las hiladas y las juntas son desiguales, además no se ha colocado el mortero de manera que llene todos los espacios existentes.



Fig. 1.8 Iglesia Mayor de Churubamba, de adobe enlucido con barro y pintado. Izquierda: vista frontal. Superior derecha: vista lateral. Inferior derecha: vista posterior.



Fig. 1.9 Detalle muro lateral de la Iglesia Mayor, adobes con unidades e hiladas desiguales, juntas de diferente espesor sin llenar por completo. Churubamba, Huánuco.

La Fig. 1.10 muestra el efecto perjudicial de la falta de adherencia adobe-mortero en una construcción de un piso que colapsó debido al sismo de Pisco del 15 de agosto de 2007. Se distinguen claramente las unidades que quedaron enteras y sueltas entre los escombros.



Fig. 1.10 Colapso de vivienda con baja adherencia adobe-mortero. Sismo de Pisco, Perú 2007. (Misión CERESIS – UNESCO).

Aunque los movimientos sísmicos en realidad no se producen en una sola dirección, por las características de la estructura y el suelo de fundación, los muros en una dirección recibirán el impacto perpendicular del sismo con respecto a su plano. Éstos actuarán a flexión. En los muros en los que el sismo actúe principalmente en su mismo plano, actuarán en corte. Los muros a flexión serán los más débiles ya que su única resistencia al volteo es la carga gravitacional de su propio peso. Si no hay algún elemento de unión con los otros muros, se desempeñarán independientemente y no contarán con elementos de confinamiento vertical u horizontal. Los muros se separarán y desplomarán súbitamente (ver Fig. 1.11 y 1.12) (Torrealva, 2008).



Fig. 1.11 a) Separación de muros por falta de elementos de confinamiento. b) Caída de muro por volteo.



Fig. 1.12 a) Colapso de muros por falta de elementos de confinamiento. www.lineadetiempo.iep.org.pe. b) Encuentro de muros sin conexiones dentadas entre sí. Sismo en Pisco, Perú 2007 (Misión CERESIS/UNESCO).

Los muros en corte resistirán fuerzas (de corte) hasta que se exceda su capacidad, principalmente en las esquinas de los vanos y en las uniones de paredes y techo. Por otro lado, la falta de adhesión entre el mortero y las unidades de adobe, facilitará estas fallas en las zonas de concentración de esfuerzos (ver Fig. 1.13) (Torrealva, 2008).



Fig. 1.13 a) Falla de muro por fuerzas actuantes en su plano. b) Detalle de mortero con piedras demasiado grandes para el tamaño de las juntas.

La Fig. 1.14, muestra el colapso de viviendas de adobe mientras las de albañilería confinada y sistema estructural con pórticos sufrieron daños reparables durante el sismo de agosto de 2007 en Pisco – Perú.



Fig. 1.14 Colapso de viviendas de adobe durante el sismo de agosto 2007 en Pisco mientras las edificaciones con otro sistema constructivo no colapsaron. www.radiouno.pe/imagenes.

1.2 Técnicas de Refuerzo de Edificaciones de Adobe

Se han promovido durante casi 50 años. En Perú la PUCP es pionera en esta línea de investigación y muchos de los sistemas de refuerzo han surgido de esta institución. Todos los métodos tienen algún costo o dificultad adicional y la población está poco dispuesta a invertir en su seguridad (tiempo o dinero). Se desea mejorar tanto las propiedades físicas y mecánicas de la mampostería de adobe, que la estructura mejore su límite de resistencia y su ductilidad. Se espera que el refuerzo tome las fuerzas tensoras que el adobe no es capaz de soportar (refuerzo vertical y horizontal) (Blondet y Aguilar, 2007).

1.2.1 Refuerzo Tradicional (caña natural).

Consiste en la inclusión de largueros de caña sujetos entre sí con pita o lana y dispuestos horizontal y verticalmente entre las unidades de adobe, de manera que proporcionen mayor ductilidad y unicidad a la estructura. (ver Fig. 1.15).

Como ventajas podemos indicar las siguientes:

- a) Resulta económico y bastante fácil de implementar debido a que los materiales se encuentran a disposición de los usuarios.
- b) Previene el colapso estructural aunque no exhibe tanta resistencia como otros métodos.

Como desventajas, podemos mencionar:

- a) Dificultad al conseguir la cantidad y tamaño necesario de cañas de refuerzo.

- b) Se aplica únicamente en viviendas por construir.
- c) Requiere del conocimiento de la técnica para ser aplicado.



Fig. 1.15 Refuerzo de viviendas de adobe con caña natural. (Departamento de Ingeniería Civil PUCP)

1.2.2 Refuerzo Polimérico (malla).

Consiste en el empleo de malla polimérica para reforzar las esquinas y zonas de concentración de esfuerzos asegurándolas mediante rafia que atraviesa los muros de lado a lado (ver Fig. 1.16 y 1.17). Ofrece las siguientes ventajas:

- a) Evita el colapso de las viviendas dándoles mayor resistencia en el rango inelástico.
- b) Aplicable a edificaciones nuevas y antiguas.

Y las siguientes desventajas:

- a) No brinda mejoras notables en el rango elástico.
- b) Costo adicional y dificultad para conseguir los materiales.
- c) Requiere del conocimiento de la técnica de refuerzo.



Fig. 1.16 Esquema de zonas de refuerzo con red polimérica (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).



Fig. 1.17 Detalles de refuerzo con red polimérica en muros de adobe (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).

1.2.3 Refuerzo con Malla Electrosoldada Recubierto con Mortero de Cemento.

Consiste en la instalación de malla electrosoldada anclada con alambre y clavos de acero asegurados con chapas o pedazos de calamina aplanados a las superficies de los muros de adobe sin tarrajear, se aplica principalmente en las esquinas, dinteles y zonas de concentración de esfuerzo, luego se tarraja con una mezcla de cemento: arena 1:5 (ver Fig. 1.18). Tiene como ventajas:

- a) La malla electro soldada provee de mayor ductilidad a la estructura.
- b) Puede aplicarse a edificaciones nuevas y antiguas.

Sus desventajas son las siguientes:

- a) Implica un costo adicional en la construcción.
- b) No es fácil de conseguir en las zonas alejadas.
- c) Requiere del conocimiento de la técnica de refuerzo.



Fig. 1.18 a) Espacio para el diente de concreto en extremos de la viga solera. b) Vivienda reforzada con malla electrosoldada. (Departamento de Ingeniería PUCP).

1.2.4 Refuerzo con el Sistema de Albañilería Integral (SAI).

El Sistema de Albañilería Integral (SAI), como posible sistema de refuerzo estructural de viviendas de adobe fue probado a través de un ensayo de simulación sísmica cuyo comportamiento fue evaluado en esta tesis: se describió su composición, empleo en la construcción del modelo experimental, ensayo en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas “Cristóbal de Losada y Puga” PUCP, desempeño ante excitaciones sísmicas, características dinámicas y desarrollo del modelo analítico de elementos finitos que lo representa.

El SAI propuesto por el profesor Joseph Adell de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), es un sistema que se desarrolla en Europa con el nombre comercial de “ALLWALL SYSTEM”, formado por cerchas soldadas y galvanizadas ensambladas tridimensionalmente, cuyos espacios son luego llenados con unidades de albañilería de ladrillo o bloque, cerámico o de hormigón, empleando sólo mortero o similares (ver Fig. 1.19). Ofrece mejorar la transmisión de cargas entre los muros a corte y flexión y en zonas de concentración de esfuerzos, además de brindar ductilidad al conjunto estructural, a bajo costo y de fácil instalación con un mínimo de asistencia técnica (Adell, 2005).

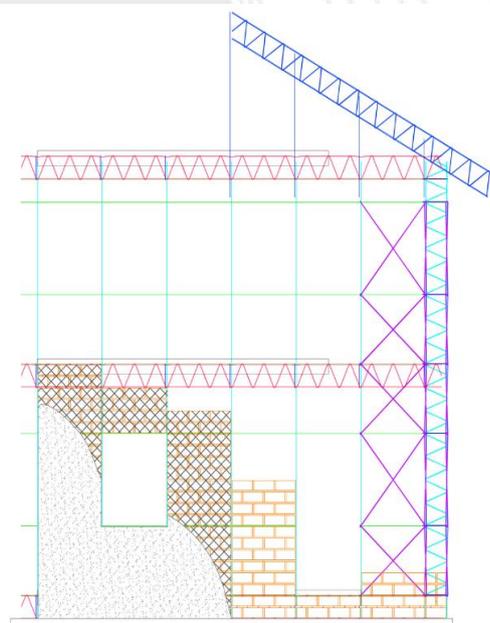


Fig. 1.19 Esquema de detalle de elementos constitutivos de la vivienda modular de dos pisos reforzada con el SAI (Adell, Bustamante y Dávila, 2005).

En el Congreso Internacional Sismo Adobe 2005, Adell, Bustamante y Dávila, propusieron el empleo de una variante de este sistema para el reforzamiento de

viviendas modulares de adobe de interés social, resaltando la facilidad de construcción, bajo costo y la reducción de vulnerabilidad de las edificaciones. Posteriormente, en 2008 se estableció un convenio PUCP-UPM para el ensayo del modelo experimental de un módulo de vivienda de dos pisos.

La Fig. 1.20 muestra el esquema de distribución de la vivienda modular de dos pisos Tipo 4 (61,2 m²), la más parecida al modelo experimental.

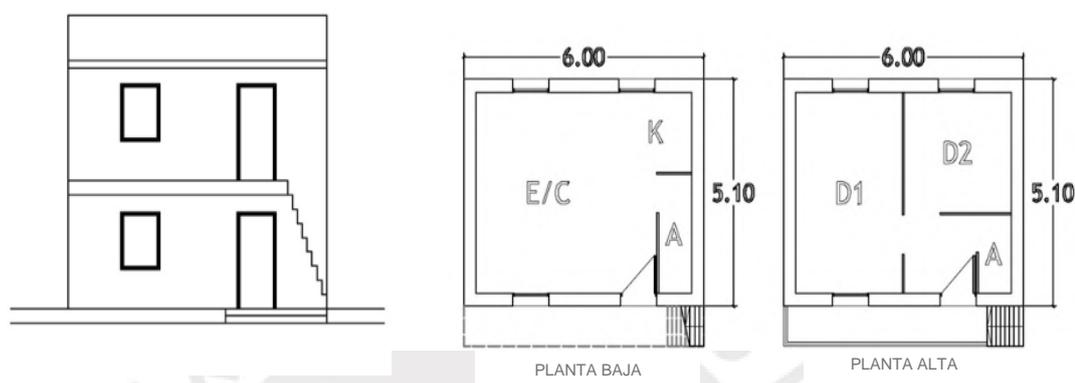


Fig. 1.20 Vivienda modular de dos pisos Tipo 4 (Adell, Bustamante y Dávila, 2005).

La Fig. 1.21, muestra el esquema de distribución de la vivienda modular de un piso Tipo 3 (61,2 m²), con dos módulos juntos.

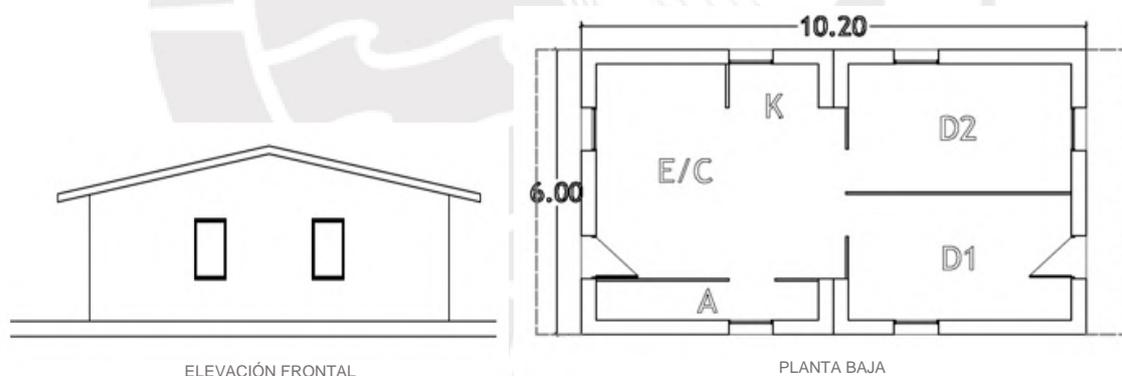


Fig. 1.21 Vivienda modular de un piso Tipo 3 (Adell, Bustamante y Dávila, 2005).

Los tres primeros sistemas descritos ya fueron investigados por la PUCP, publicándose manuales de construcción, propuestas e inclusión en la Norma peruana E.080 y otros trabajos de investigación al respecto, también han sido aplicados en diferentes zonas del país, demostrando su efectividad al reducir la vulnerabilidad de las viviendas que han resistido sismos posteriores sin colapsar y

con daños reparables. Se incluye el refuerzo con SAI como posible sistema de refuerzo estructural de viviendas de adobe de dos pisos.

La Tabla 1.1 presenta un resumen de las principales características, ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de refuerzo. Como se puede apreciar, el SAI es el único sistema de refuerzo que ha sido probado para casas de dos pisos.

Tabla 1.1 Tabla comparativa de los sistemas de refuerzo estructural de viviendas de adobe.

SISTEMA DE REFUERZO	CARACTERÍSTICAS EVALUADAS		
	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CAÑA NATURAL	Empleo de varas de caña dispuestas horizontal y verticalmente sujetas con pita embebidas entre las unidades de adobe como parte del proceso constructivo.	Materiales de disponibilidad inmediata.	Dificultad para conseguir las cañas en cantidad y longitud suficientes.
		Casi gratuito.	Se puede utilizar sólo en viviendas por construir.
		Previene el colapso estructural.	Requiere conocimiento de la técnica.
MALLA ELECTROSOLDADA	Empleo de malla electrosoldada en las esquinas, dinteles y zonas de concentración de esfuerzos, sujeta con alambre y clavos de acero fijados con ayuda de chapas y trozos de calamina aplanados. Luego se tarrajean estas zonas con mezcla cemento:arena 1:5.	Se puede utilizar en viviendas por construir y existentes	Implica un costo adicional.
		-	Los materiales no son fáciles de conseguir en zonas alejadas.
		Mejora comportamiento de las estructuras en el rango elástico	Requiere conocimiento de la técnica.
MALLA POLIMÉRICA	Empleo de malla polimérica en las esquinas, dinteles y zonas de concentración de esfuerzos, sujeta con rafia atravesando los muros que luego son tarrajeados.	Se puede utilizar en viviendas por construir y existentes	Implica un costo adicional.
		-	Los materiales no son fáciles de conseguir en zonas alejadas.
		Mejora comportamiento de las estructuras en el rango inelástico.	Requiere conocimiento de la técnica.
SAI	Empleo de cerchas de acero galvanizado, con las que se elabora un armazón tridimensional que luego es llenado con adobes, se colocan tiras de malla polimérica y se tarrajea.	Se puede utilizar en viviendas de adobe de dos pisos.	Implica un costo adicional.
		Puede construir el propietario, con ayuda de un manual autoinstructivo.	Se puede utilizar sólo en viviendas por construir.
		Mejora comportamiento de las estructuras en el rango inelástico.	Los materiales no son fáciles de conseguir en zonas alejadas.

Se desea determinar la aplicabilidad del SAI como sistema prometedor de reforzamiento estructural de construcciones de adobe que es el material más frágil, para lo cual se analizan e interpretan los resultados de desplazamiento, aceleración y comportamiento de los lazos de histéresis del modelo experimental.

Esta tesis pretende realizar un estudio analítico y desarrollar un modelo de elementos finitos utilizando programas de modelamiento estructural, comparando

los resultados obtenidos con el modelo experimental, para contribuir con el estudio del comportamiento en el rango elástico de las viviendas de adobe de dos pisos reforzadas con SAI.

La Fig. 1.22 muestra el modelo experimental ubicado sobre la mesa vibradora listo para el ensayo.



Fig. 1.22 Modelo experimental de vivienda de adobe de dos pisos reforzada con SAI.

1.3 Justificación e Hipótesis

El ensayo realizado nos ha permitido contar con información de las propiedades y desempeño estructural de la vivienda de adobe de dos pisos reforzada con SAI. Éste es un proyecto importante y prometedor en el desarrollo de técnicas para el reforzamiento de viviendas de adobe. Es muy importante tener un modelo numérico capaz de predecir el comportamiento de estructuras reales construidas con este sistema.

Hipótesis: El comportamiento sísmico en el rango elástico de una vivienda de adobe de dos pisos reforzada con SAI puede ser evaluado mediante análisis lineal de elementos finitos.

1.4 Objetivos

El objetivo general es: Contribuir a la mitigación del riesgo sísmico de las familias que viven en edificaciones de adobe de dos pisos pues es necesario

encontrar un sistema eficiente, económico y seguro. El SAI podría ser una solución factible.

Los objetivos específicos son:

Estudiar el comportamiento dinámico del modelo experimental, a través de la observación directa y procesamiento de los resultados obtenidos por los instrumentos el día del ensayo de simulación sísmica.

Proponer un modelo analítico por el método de elementos finitos capaz de predecir el comportamiento en el rango elástico del modelo experimental de la vivienda de adobe de dos pisos reforzada con SAI que se ensayó en el Laboratorio de Estructuras PUCP. Se utilizará el programa SAP2000.

1.5 Organización del Trabajo

Para lograr los objetivos específicos, se han llevado a cabo las siguientes acciones:

1. Recopilación bibliográfica y estudio del riesgo sísmico de Perú, el comportamiento de las viviendas de adobe ante los sismos y los sistemas de refuerzo para estas estructuras.
2. Estudio del SAI como posible sistema de refuerzo estructural para viviendas de adobe de dos pisos.
3. Procesamiento de datos obtenidos por los instrumentos durante el ensayo de simulación sísmica del modelo experimental: Se determinaron las respuestas máximas, frecuencia, amortiguamiento y rigidez del modelo experimental para cada fase de ensayo. Se evaluó la contribución del SAI en la resistencia del modelo. Además, se observaron las grietas y daños ocurridos durante el ensayo. Se elaboraron gráficas de desplazamiento, aceleración y lazos de histéresis para cada muro.
4. Modelo analítico: Se desarrollaron varias alternativas buscando la que mejor pueda predecir el comportamiento sísmico en el rango elástico del modelo experimental.
5. Evaluación del modelo analítico más acertado.
6. Informe final: en el que se describen los trabajos realizados, datos representativos, modelo analítico, conclusiones y recomendaciones.

El reporte de esta tesis está dividido en nueve capítulos:

En el Capítulo 1, Aspectos Generales se muestran los antecedentes, las técnicas de refuerzo para viviendas de adobe, justificación, hipótesis, objetivos y organización de la tesis.

En el Capítulo 2, Sistema de Albañilería Integral (SAI) se explica la filosofía de diseño, métodos constructivos y características del SAI como técnica de reforzamiento de edificaciones modulares de tierra.

En el Capítulo 3, Descripción del Modelo Experimental se indican las propiedades de los materiales, sus características físico-mecánicas y la construcción del modelo experimental.

En el Capítulo 4, Campaña Experimental se describen la instrumentación del modelo, el protocolo de ensayo y las señales aplicadas a la mesa vibratoria.

En el Capítulo 5, Realización de los Ensayos de Simulación Sísmica se describen los ensayos de laboratorio de la vivienda de adobe de dos pisos reforzada con SAI en vibración libre y sus cuatro fases de simulación sísmica y el procesamiento de datos para determinar el comportamiento del modelo experimental, observaciones y comentarios.

En el Capítulo 6, Modelo Numérico de los Ensayos se describe la elaboración de modelos matemáticos con el programa SAP2000 que representen los resultados del modelo experimental en el rango elástico, replicando las características y comportamiento del modelo experimental durante la Fase I del ensayo de simulación sísmica.

En el Capítulo 7, Conclusiones y Recomendaciones se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

En el Capítulo 8, Anexos se muestra el procesamiento de datos registrados por los diferentes instrumentos colocados en el modelo experimental.

En el Capítulo 9, Referencias Bibliográficas se presenta una relación de los libros, artículos científicos, tesis y demás fuentes empleadas en la elaboración de la tesis.

2. Sistema de Albañilería Integral (SAI)

2.1 Historia y Descripción

La técnica de “La fábrica armada: Murfor”, empleada en España desde que fuera desarrollada en 1992 por el profesor Joseph Adell de la Universidad Politécnica de Madrid, parte de emplear cerchas horizontales con espaciamiento máximo de 0,60 m entre ellas, sujetas a elementos verticales (generalmente columnas de concreto) y reforzadas con una proporción del 0,03% de acero en la sección de albañilería para controlar su fisuración, utilizando solamente mortero en lugar de hormigón (ver Fig. 2.1). (Adell, 2005).

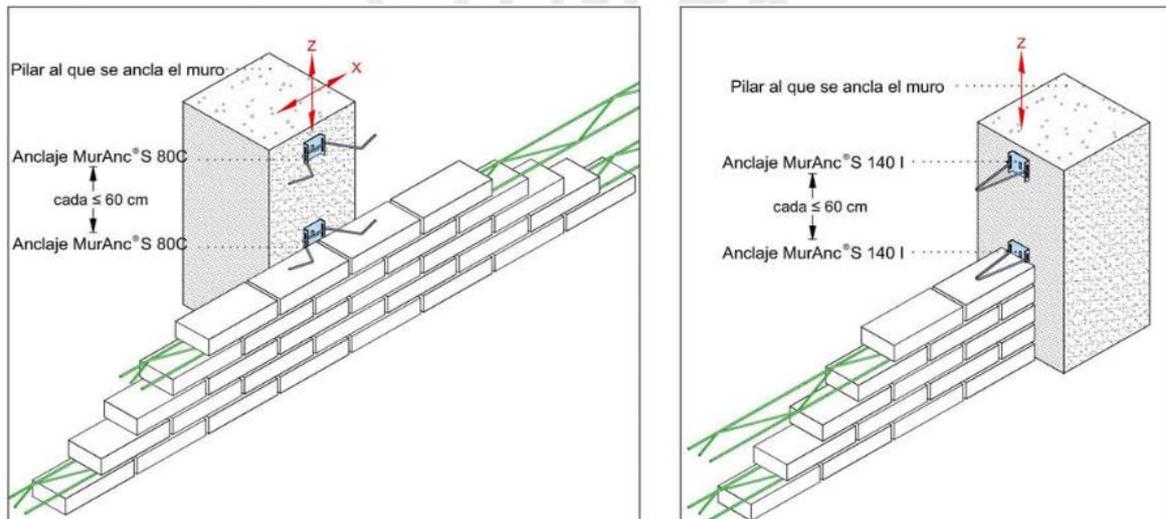


Fig. 2.1 Esquema de “la fábrica armada”. Cerchas horizontales y dos tipos de anclajes a elementos verticales de concreto armado (Adell, 2005).

El SAI es una variante y mejora de “la fábrica armada”, una técnica constructiva, que permite configurar vertical y horizontalmente cualquier tipo de arquitectura de albañilería, con independencia del tipo de unidades empleadas: ladrillo cocido macizo, ladrillo hueco o perforado, bloques de cerámica o ladrillos de concreto formando una estructura de albañilería reforzada tridimensional con cerchas metálicas modulares. Le añade a este sistema la posibilidad de armar los muros verticalmente con o sin mortero, ya que las cerchas son autorresistentes, y no requieren del mismo para transmitir sus esfuerzos entre sí (pues se sujetan arriba y abajo de los forjados con las correspondientes fijaciones del sistema). El elemento más novedoso, es la Costilla Vertical de Refuerzo AllWall que consiste en una celosía doble capaz de enhebrarse con las armaduras horizontales en

forma de cercha. La Fig. 2.2 muestra la variedad de elementos metálicos así como las unidades de albañilería a las que se adaptan y los tipos de anclaje que han sido desarrollados y puestos en el mercado como parte de este sistema. (Adell, 2005).

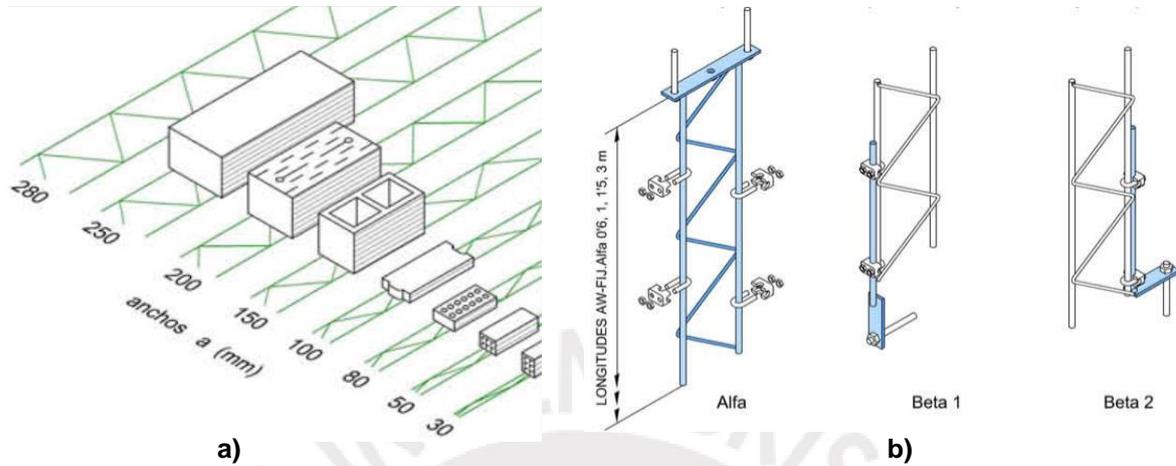


Fig. 2.2 Elementos del SAI a) Medidas de unidades de albañilería y cerchas disponibles. b) Anclajes para unión de cerchas entre sí y fijación de cerchas a piso y techo. (Adell, 2005)

Esta técnica constructiva ha sido empleada exitosamente en varias edificaciones, siendo una de las más destacadas la construcción del Hotel de las Bodegas Marqués de Riscal en Álava, España. En la Fig. 2.3 se presentan fotografías tomadas durante el proceso de construcción y una vista del Hotel ya culminado.



Fig. 2.3 Superior: anclaje de elementos verticales a losa de entrepiso; fachada lateral enchapada; muro interior del hotel. Inferior izquierda: Hotel en construcción. Inferior derecha: Vista nocturna del Hotel de las Bodegas Marqués de Riscal (Adell, 2005).

2.2 El SAI como Sistema de Refuerzo de Viviendas de Adobe de Dos Pisos

A continuación se describe una adaptación del SAI como sistema de refuerzo de viviendas de adobe o tapial, lo que permitiría su uso eficaz para la construcción sismo resistente con tierra en cualquier país del mundo incluso en zonas sísmicas como el Perú empleando sólo las cerchas dobles electrosoldadas y galvanizadas, como único elemento resistente fundamental de muros y techos.

El SAI debe repartir homogéneamente los esfuerzos en el conjunto de la albañilería, aprovechando al máximo, la inercia resistente del muro, sin requerir siquiera mortero en las juntas para transmitir los esfuerzos al acero (gracias a las soldaduras y el uso de alambre de construcción para fijar las intersecciones), actuando cada paño eficazmente a compresión. Se reitera su facilidad de construcción por mano de obra con un mínimo de instrucciones (que podrían incluirse en un manual ilustrado repartido a cada usuario) y la ligereza de las cerchas moduladas para este propósito en longitudes que son fácilmente trasladadas en una camioneta para luego ser izadas, engarzadas y fijadas en la posición conveniente.

Cada cercha está formada por cuatro varillas longitudinales de 8 mm de diámetro dos en la parte superior, dos en la parte inferior y una diagonal en zigzag entre ellas de 6 mm de diámetro, posteriormente soldadas y galvanizadas con una separación entre ellas de 0,30 m. Para estos módulos no se emplearán ganchos de unión, solamente alambre de amarre en las intersecciones espaciales (Fig. 2.4) (Adell y otros, 2007).

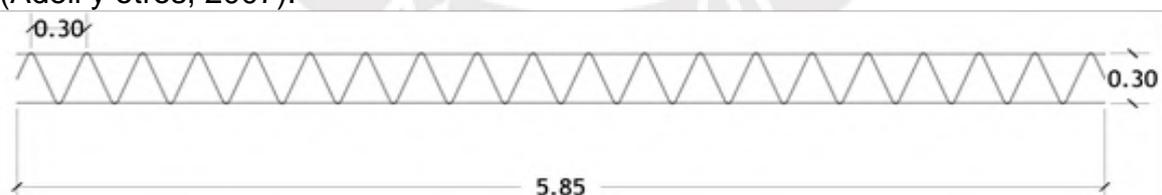


Fig. 2.4 Geometría de una cercha: cuatro alambres longitudinales de 8mm. y uno diagonal de 6mm. Armadura en toda su dimensión (Adell, 2007).

Se debe disponer horizontal y verticalmente las cerchas de acero, enhebrarlas con un ángulo de 30° para posteriormente practicar un giro entre ellas hasta lograr que queden a 90°, haciendo coincidir cada nudo de la triangulación de un lado de la cercha con el punto medio entre triangulaciones de la cercha ortogonal (Fig. 2.5).

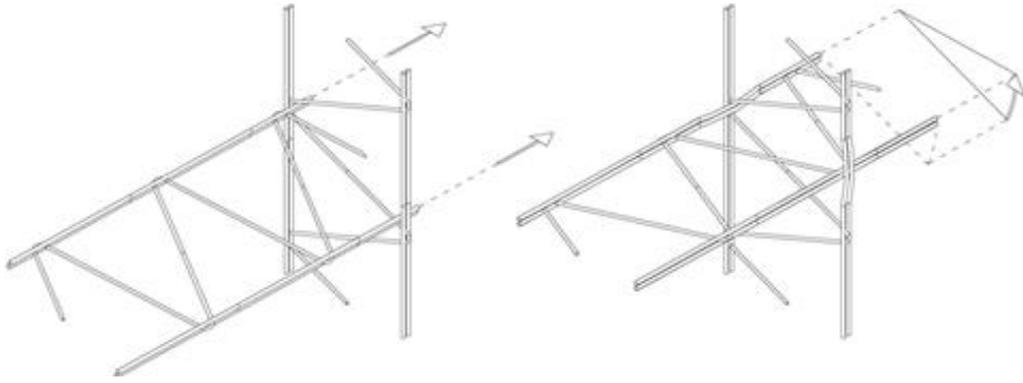


Fig. 2.5 Proceso de enhebrado entre cerchas ortogonales: acceso lateral, giro y curvado (Adell, 2007)

Para lograrlo hay que hacer un mínimo de fuerza, necesario para conseguir doblar las armaduras de 8mm de sección en una luz de 0,30 m de longitud entre soldaduras, lo que una vez conseguido, afianza en su posición definitiva a las cerchas entrecruzadas entre sí, transmitiéndose entre ellas los esfuerzos con mayor efectividad, y evitando con ello su posible pandeo lateral (ver Fig. 2.6).

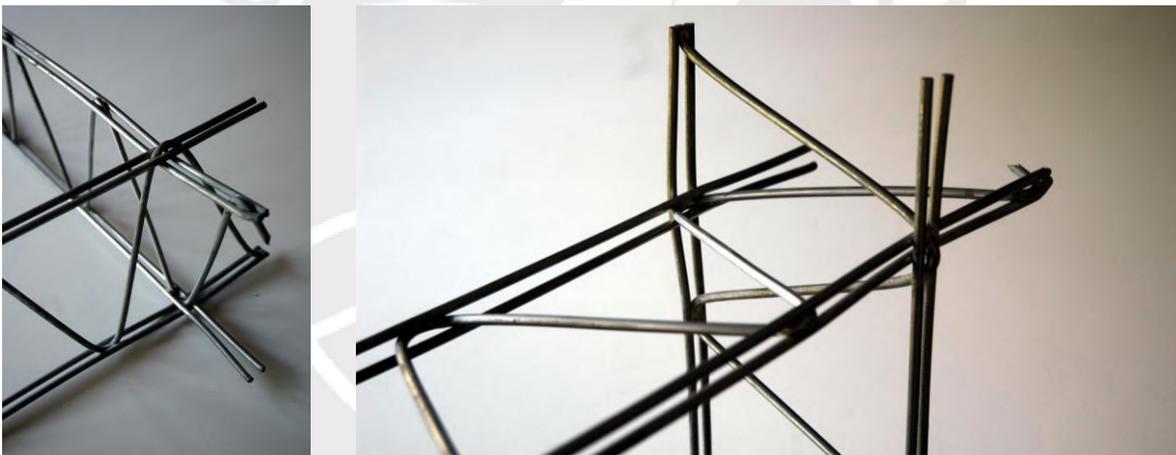


Fig. 2.6 Engarce de cerchas ortogonales: acceso lateral, giro y curvado (Adell, 2007).

La modulación espacial suele considerarse de 90 cm. Con el fin de economizar al máximo la fabricación de los componentes metálicos, se ha decidido estandarizarlos, por lo que se propone el empleo de este componente básico de armado tipo cercha de alambres dobles, que si se coloca en distintas posiciones, cumple sucesivamente las funciones de: armadura de costilla vertical, armadura de tendel, cargadero, armadura de zuncho y armadura de vigueta, con lo que todos los restos que haya que recortar pueden ser siempre aprovechables para cualquiera de dichas aplicaciones (Adell y otros, 2007).

Es así como se logra formar un armazón tridimensional cuyos vanos se llenan con unidades de albañilería aglutinadas con mortero de barro y posteriormente se colocan tiras de geomalla y se tarrajean con la finalidad de contribuir con la unicidad del conjunto. La Fig. 2.7, muestra los detalles constructivos con este sistema.

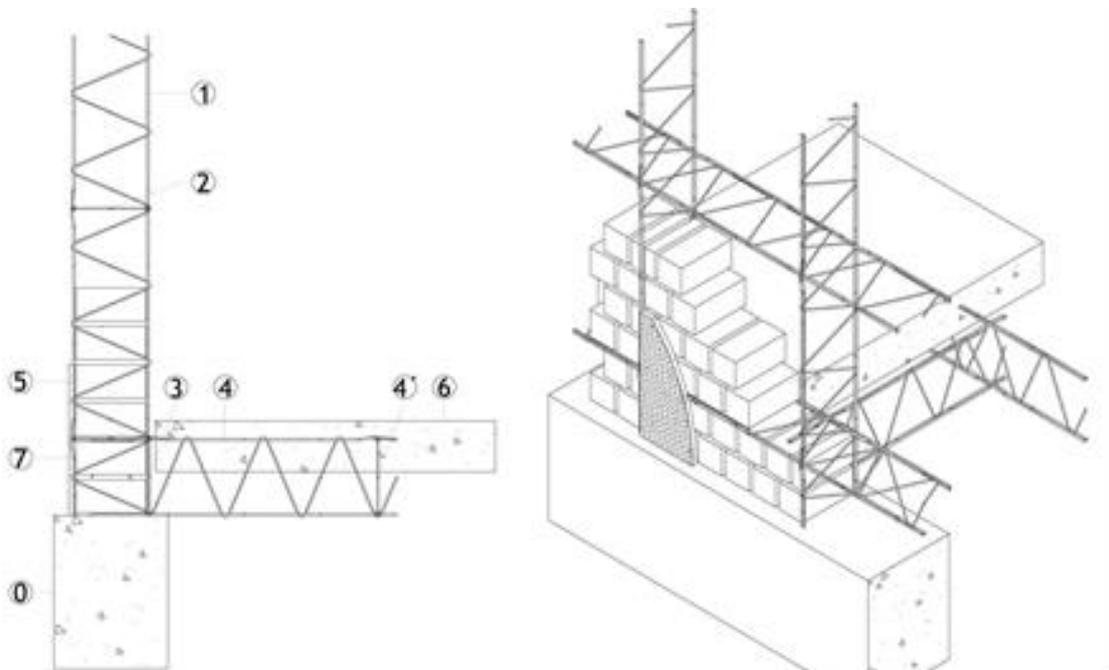


Fig. 2.7 Disposición de cerchas sobre la cimentación: 0. Cimentación 1. Cercha en costilla vertical; 2. Cercha en armadura de tendel; 3. Cercha en zuncho; 4. Cercha en vigueta; 5. Pieza de adobe; 6. Grosor de forjado; 7. Tarrajeo sobre malla de gallinero. Vista en perspectiva de la configuración con muro de adobe de cabeza. (Adell, 2007).

2.3 Procedimiento Constructivo para Viviendas de Adobe

Para construir edificaciones con este sistema se seguirá el siguiente procedimiento, se sugiere desarrollar un manual ilustrado para los usuarios. Se han incluido algunas fotos del procedimiento constructivo del modelo de ensayo como referencia:

1. Contar con un terreno de perímetro bien consolidado (o una cimentación corrida) sobre el cual se dispone un entramado inferior atado a los muros entre sí, independizándolo de la cimentación (menor transmisión de esfuerzos en sismos).
2. Colocar las cerchas perfectamente verticales cada 90 cm, asegurarlas al primer cuadro. Para viviendas de 2 pisos, usar cerchas con la longitud necesaria.
3. En las esquinas de los muros, se encuentran 2 cerchas verticales que se deberán atar entre sí por su parte exterior, de preferencia con conectores metálicos a nivel de las juntas horizontales (ver Fig. 2.8 a).

4. A nivel de arranque sobre la cimentación y a nivel de entepiso y techo, el armado de las viguetas se conectará con las cerchas verticales previamente dispuestas.

5. Las piezas de adobe requeridas tienen 60 cm de longitud incluyendo las juntas de barro, su tamaño real será de 58 x 28 x 28 cm (ver Fig. 2.8 b).



Fig. 2.8 a) Detalle de unión entre cerchas verticales y horizontales en esquina. b) Modulado de adobes acorde a los vanos entre cerchas (Departamento Ing. Civil PUCP).

6. El adobe se dispondrá en hiladas sucesivas y cada 90cm de altura, se colocará una armadura horizontal que se enhebrará a través de las costillas verticales previamente dispuestas (detalle se mostró en Fig. 2.6).

7. Las puertas de 80 cm se lograrán dejando el espacio entre dos cerchas sin rellenar, en el cual se insertará el marco correspondiente. los huecos de las ventanas serán de 90 cm de lado, pudiendo juntarse dos de ellas con 1,80 m de luz. Una armadura horizontal será el dintel de los vanos (ver Fig. 2.9).



Fig. 2.9 Vanos de puertas y ventanas durante la construcción y ya terminado el muro sin tarrajeo, se aprecian las cerchas como dinteles. (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).

8. Los techos podrán hacerse conformando arcos de barro y paja entre viguetas separadas como máximo a 90 cm, sobre las que se podrá disponer un solado o tabloncillos de madera directamente sobre las cerchas del techo, a manera de solado. Se podrán dejar las viguetas a la vista, o taparlas con un techo

suspendido, donde se empotrarán las luminarias. En los voladizos, las cerchas dobles podrán envolverse con tablonces de madera por cada lado, mostrándose como aleros de las cubiertas.

9. Las escaleras tienen gran pendiente por falta de espacio: se dispondrá un par de dobles cerchas paralelamente, entrecruzadas con tablonces a modo de escalones (se muestra un esquema en la Fig. 2.10 a) (Adell y otros, 2007).

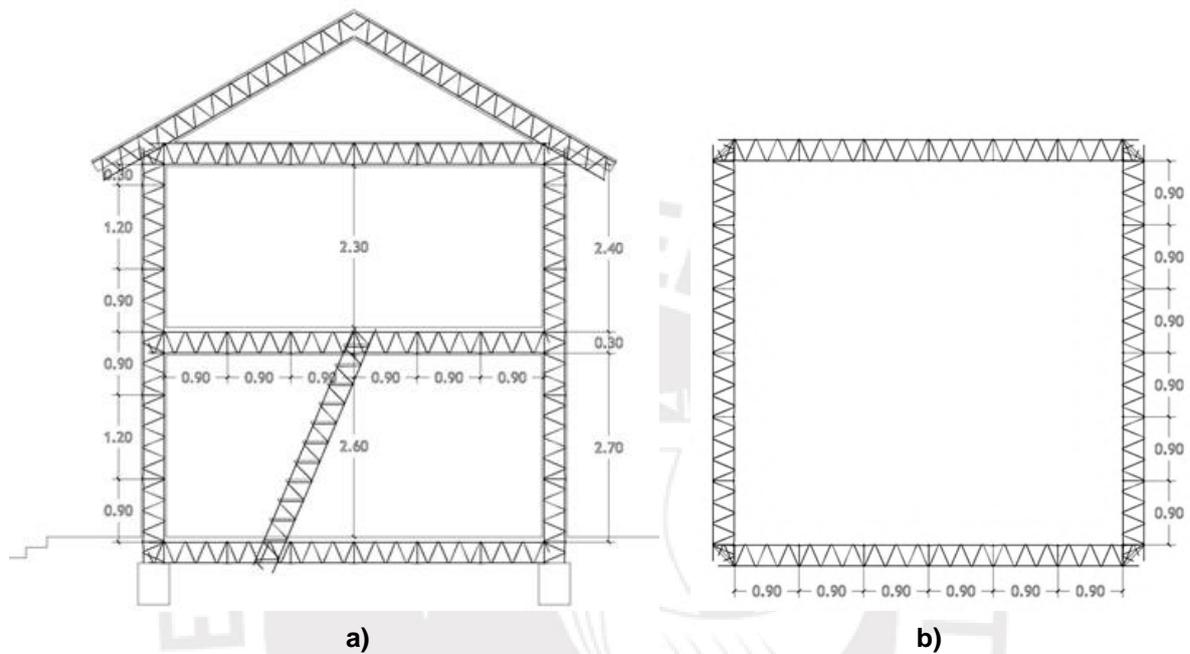


Fig. 2.10 a) Esquema de disposición de escalera. b) Esquema de disposición de cerchas en el perímetro de la vivienda de 5,40 m con ganchos en las esquinas. (Adell y otros, 2007).

3. Descripción del Modelo Experimental

3.1 Propiedades de los Materiales y Componentes

En este capítulo se describen las dimensiones, dosificación para su elaboración y las principales características físico-mecánicas de los materiales utilizados para construir el modelo experimental.

3.1.1 Propiedades de la Mampostería de Adobe.

Para la elaboración del modelo de ensayo, se fabricaron adobes según lo establecido en los estándares fijados por la Norma Peruana de Adobe E-0.80. Se emplearon unidades de 0,28 m x 0,15 m x 0,08 m (810 unidades) y medias unidades de 0,14 m x 0,15 m x 0,08 m (690 unidades) conformadas por suelo, arena y pasto seco en proporción 5:1:1 (ver Fig. 3.1). Se previó que las hiladas de adobe quepan en los vanos de las cerchas incluyendo las juntas de barro de 1,5 a 2,0 cm de espesor y el tarrajeo para dos muros realizado con suelo: arena: paja en proporción 3:1:1 de 1,5 cm de espesor.



Fig. 3.1 Unidades y medias unidades de adobe construidas para el modelo experimental del convenio PUCP-UPM (Departamento de Ingeniería PUCP).

No se realizó ensayo de las unidades y/o pilas de albañilería para determinar sus propiedades mecánicas, pues se asumió que al ser elaboradas con los mismos materiales y técnicas establecidos por la Universidad, se pueden tomar como datos los resultados de experimentos previos a excepción del peso volumétrico de las unidades que se obtuvo dividiendo el peso total de los muros entre las dimensiones de cada muro. (Blondet y otros, 1989).

La **Tabla 3.1**, muestra las propiedades de la mampostería de adobe para muros tarrajados (ADOBET) y sin tarrajar (ADOBE).

3.1.2 Propiedades del SAI.

Para el modelo experimental, se emplearon cerchas a escala reducida, ya que se deseaba que la vivienda fuera de dos pisos representando el caso más crítico y la mesa vibradora tiene un límite de carga máxima que hubiera sido excedido por un modelo a escala natural. Este material fue importado de España.

Las cerchas empleadas tuvieron dos varillas longitudinales superiores e inferiores de 6 mm de diámetro con 2,85 m de longitud y la diagonal de 8 mm soldada en zigzag, con una separación de 150 mm, se utilizaron 98 unidades. La **Fig. 3.2** muestra la configuración de una cercha típica. Esta adaptación prescindió de ganchos para unión y anclaje de cerchas, empleándose soldadura y alambre de amarre N° 16 para fijar los elementos.

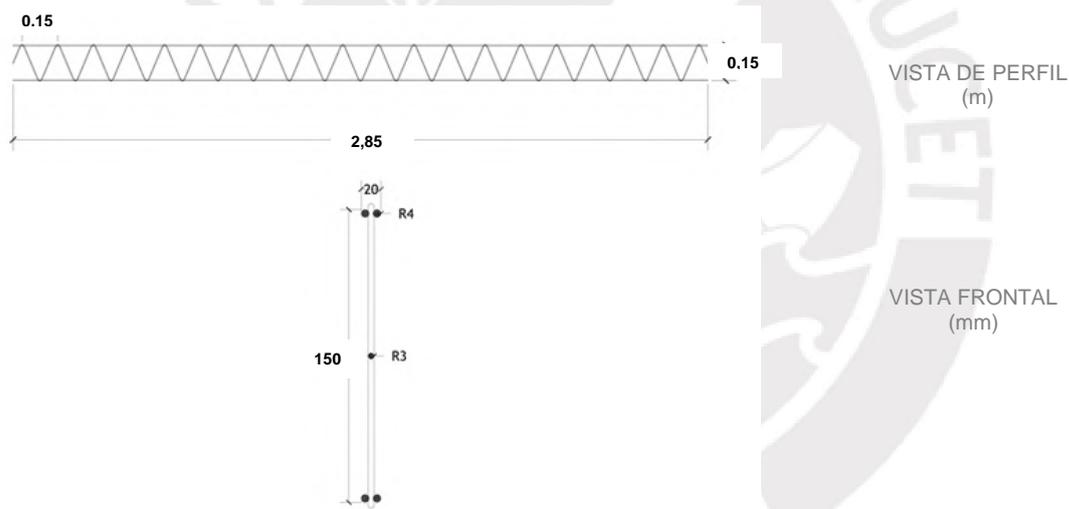


Fig. 3.2 Configuración de las cerchas para el modelo experimental.

Las propiedades de estos elementos corresponden a acero estructural A36, se toman los valores descritos en el catálogo de Aceros Arequipa para los cálculos posteriores. La **Tabla 3.1**, muestra las propiedades de las cerchas de acero.

3.1.3 Características de las planchas de triplay.

Para simular el peso de techo y entrepiso, se colocaron planchas de triplay de 1" de espesor sujetas a las cerchas con alambre de amarre, sobre las cuales se pusieron costales de rafia llenos de arena.

Las propiedades mecánicas de las planchas de triplay empleadas en entrepiso y techo se indican en la Tabla 3.1 a continuación.

Tabla 3.1 Características de los materiales constituyentes del modelo experimental.

CARACTERÍSTICA	PESO ESPECÍFICO	MÓDULO DE ELASTICIDAD	COEFICIENTE DE POISSON
UNIDAD	kN/m ³	MPa	-
ADOBE	17,64	222	0,30
ADOBET	19,61	222	0,30
ACERO	72,84	200 000	0,30
TRIPLAY	98,64	2 400	0,25

3.2 Modelo de ensayo

Se construyó el modelo experimental a escala 1:2 y se colocó para ensayo dinámico sobre la mesa vibradora unidireccional. Esta construcción que idealizó la existencia de un ambiente acondicionado con un mínimo de tabiquería para generar habitaciones, se dejó libre en el caso del ensayo propiciando la condición más desfavorable posible (ya que los muros internos y escalera, aportan rigidez a la estructura) La Fig. 3.3, muestra el muro anterior (MA, tarrajado) y los muros posterior e izquierdo (MP y MI, ambos sin tarrajear).



Fig. 3.3 a) MA, durante la construcción. b) MP y MI del Modelo Experimental instalado e instrumentado sobre la mesa vibradora. (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).

El modelo experimental constó de cuatro muros unidos entre sí. Cada uno de los muros tuvo las siguientes medidas (a ejes de muros) 2,70 m x 2,85 m x 0,15 m

en muro posterior (MP) y muro izquierdo (MI); 2,70 m x 2,85 m x 0,18 m en muro anterior (MA) y muro derecho (MD) por la aplicación del tarrajeo. Tanto en MA como en MP se ubicaron tres ventanas y una puerta. A la altura de entrepiso (1,35 m) y techo (2,70 m), se soldó el entramado de cerchas respectivas y sobre ellas se instaló planchas de triplay con costales de arena sujetos con alambre de amarre simulando las cargas de los pisos y acabados (ver Fig 3.3).

En la Fig. 3.4 se muestra un esquema de la disposición en planta de los muros del modelo experimental con respecto a la dirección de sismo aplicada, así como la ubicación de las oficinas de Secretaría como referencia. En la Tabla 3.2, se indican los pesos de sus componentes que sirvieron luego para generar el modelo numérico.

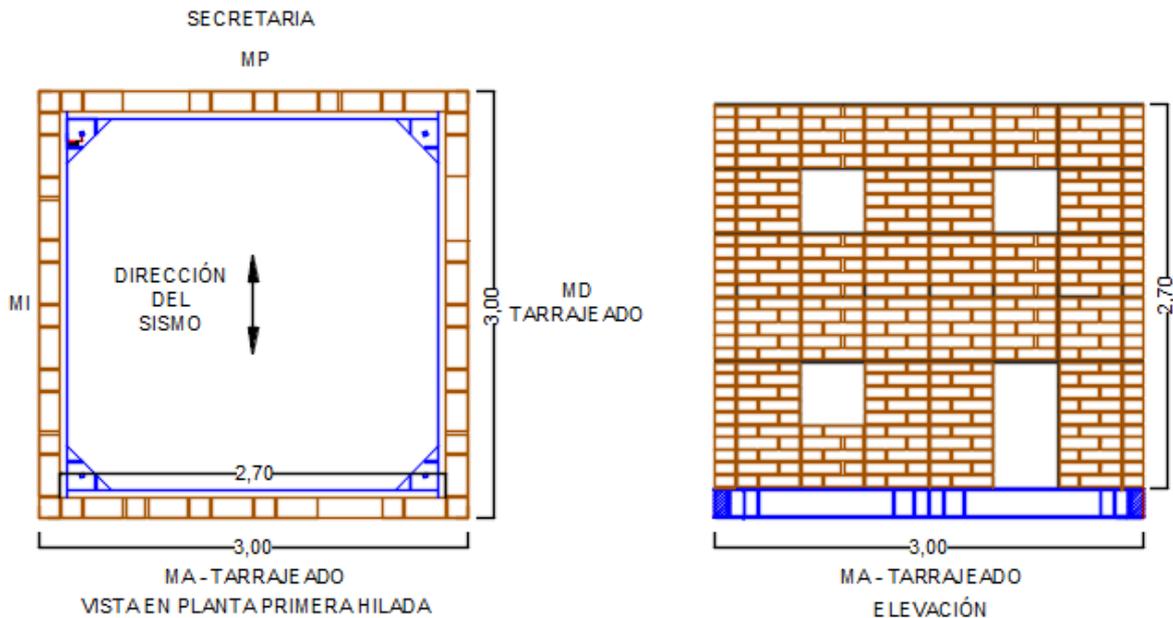


Fig. 3.4 Esquema en planta y elevación del modelo experimental (medidas en m). (PUCP Departamento Ingeniería Civil).

Tabla 3.2 Pesos de componentes del modelo de ensayo

COMPONENTE	PESO (kN)
Anillo de cimentación	5,48
Cerchas metálicas	2,21
Muros de adobe	79,17
Tarrajeo de barro	7,85
Sobrecarga	7,64
TOTAL	102,35

El proceso constructivo tuvo la siguiente secuencia:

1. El anillo de cimentación fue hecho con perfiles W8x8 de 2,80 m de longitud a eje, soldados entre sí y con cartelas de refuerzo en las zonas de concentración de esfuerzos (aristas y medios), cuatro asas para izar la estructura también soldadas y todo ello fue limpiado y cubierto con pintura anticorrosiva (Fig. 3.5).



Fig. 3.5 Anillo de cimentación pintado (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).

2. Las cerchas de 2,85 m de longitud y 0,15 m de altura fueron aseguradas al anillo de cimentación formando un entramado base al cual se sujetaron las costillas verticales, aplomándolas cuidadosamente, sobre ellas se formó el entramado de muros, entrepiso y techo con una disposición uniforme de 0,45 m de distancia a ejes en las tres direcciones. Los elementos se soldaron y sujetaron con alambre de amarre N° 16 (Fig. 3.6).



Fig. 3.6 a) Anclaje y soldadura al anillo de cimentación. b) Ensamblaje tridimensional formando parrillas y muros, a tramos equidistantes de 0,45 m (Departamento de Ingeniería Civil PUCP).

3. Los adobes fabricados por la PUCP en agosto fueron colocados llenando los vanos con unidades y medias unidades y asentándolos con mortero de barro, el MD y MI se llenó totalmente, en el MA y MP se dejaron tres ventanas y una puerta en cada uno, se colocaron tiras de malla polimérica en MA y MD y se procedió al tarrajeo. (Fig. 3.7).



Fig. 3.7 a) Asentado de adobes y pasadores de rafia para muro tarrajado. b) Colocación de malla polimérica y tarrajeo de muros (PUCP Departamento de Ingeniería Civil).

4. El modelo experimental se trasladó a la mesa vibradora unidireccional, ubicándolo convenientemente para el ensayo. Sobre las cerchas de entrepiso y techo se colocaron planchas de triplay y sobre ellas, costales llenos con arena que se aseguraron con alambres, para simular el peso de los pisos y acabados. (ver Fig. 3.8).

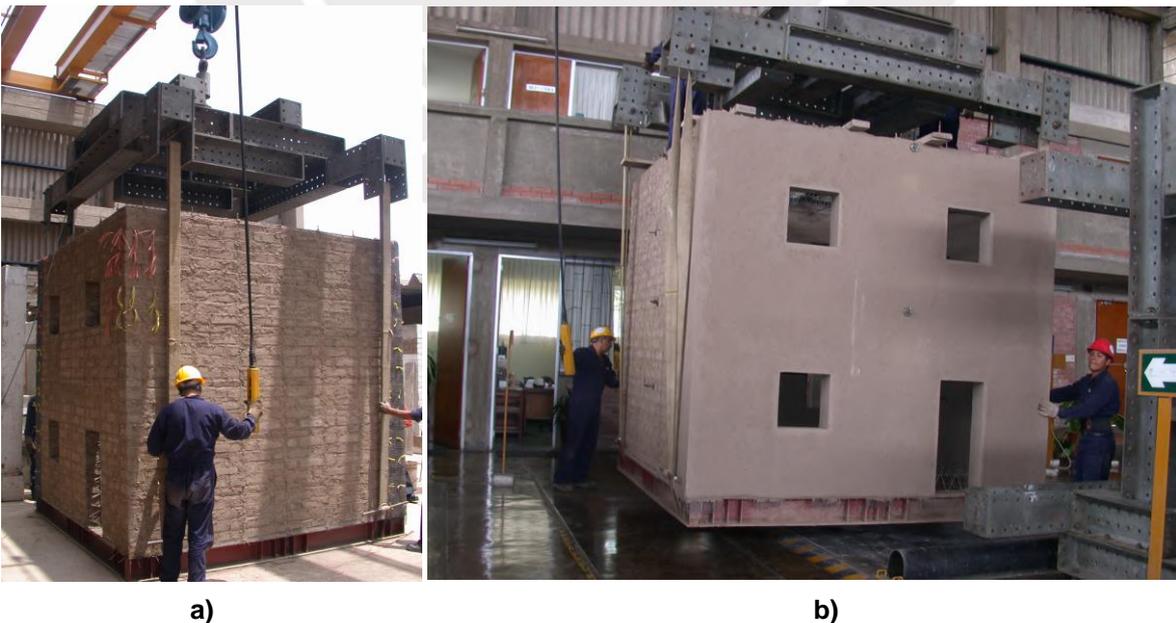


Fig. 3.8 a) Izaje de la estructura en el patio del Laboratorio. b) Traslado e instalación del modelo sobre la mesa vibradora unidireccional (Departamento de Ingeniería PUCP).

4. Campaña Experimental

4.1 Instrumentación del Modelo Experimental

Una vez ubicado el modelo de ensayo sobre la mesa vibradora, se colocaron en él 9 acelerómetros, 1 en la plataforma para el registro de la aceleración en la base, 4 a nivel de entrepiso y 4 a nivel de techo de cada muro con el fin de registrar las aceleraciones en los puntos de interés (entrepiso y techo).

Así mismo, se colocaron 7 LVDT's, 1 en la plataforma para el registro del desplazamiento en la base, 3 a nivel de entrepiso y 3 a nivel de techo de los muros con el fin de registrar el desplazamiento absoluto. Para el registro del desplazamiento relativo en los muros, se colocaron 4 LVDT's, 2 a la mitad del primer piso y 2 a la mitad del segundo piso.

Finalmente, se colocó un instrumento en el actuador para registrar la fuerza aplicada al desplazar la plataforma de la mesa vibradora.

La descripción completa y detalle de ubicación de los instrumentos, se muestran en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Identificación, descripción y ubicación de los instrumentos colocados en el modelo experimental para ensayos de simulación sísmica.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
A0	Aceleración plataforma
A1	Aceleración entrepiso MA (tarrajado), perpendicular al muro.
A2	Aceleración techo MA (tarrajado), perpendicular al muro.
A3	Aceleración entrepiso MD (tarrajado), perpendicular al muro.
A4	Aceleración entrepiso MI, perpendicular al muro.
A5	Aceleración techo MD (tarrajado), perpendicular al muro.
A6	Aceleración techo MI, perpendicular al muro.
A7	Aceleración entrepiso MP, perpendicular al muro.
A8	Aceleración techo MP, perpendicular al muro.
D0	Desplazamiento plataforma
D1	Desplazamiento entrepiso MA (tarrajado), perpendicular al muro.
D2	Desplazamiento techo MA (tarrajado), perpendicular al muro.
D3	Desplazamiento entrepiso MD (tarrajado), perpendicular al muro.
D4	Desplazamiento entrepiso MI, perpendicular al muro.
D5	Desplazamiento techo MD (tarrajado), perpendicular al muro.
D6	Desplazamiento techo MI, perpendicular al muro.
D7	Desplazamiento relativo entre lados de cercha vertical central, primer nivel MD (tarrajado)
D8	Desplazamiento relativo entre lados de cercha vertical central, primer nivel MI
D9	Desplazamiento relativo entre lados de cercha vertical central, segundo nivel MD (tarrajado)
D10	Desplazamiento relativo entre lados de cercha vertical central, segundo nivel MI
Fa	Diferencial de presión en el actuador

La Fig. 4.1 muestra el esquema de ubicación de los instrumentos de desplazamiento y aceleración ubicados al centro de MA (tarrajado) y MP (sin tarrajear) a nivel de entrepiso y techo. Estos muros actúan a flexión, su plano es perpendicular a la dirección del movimiento de la mesa vibradora.

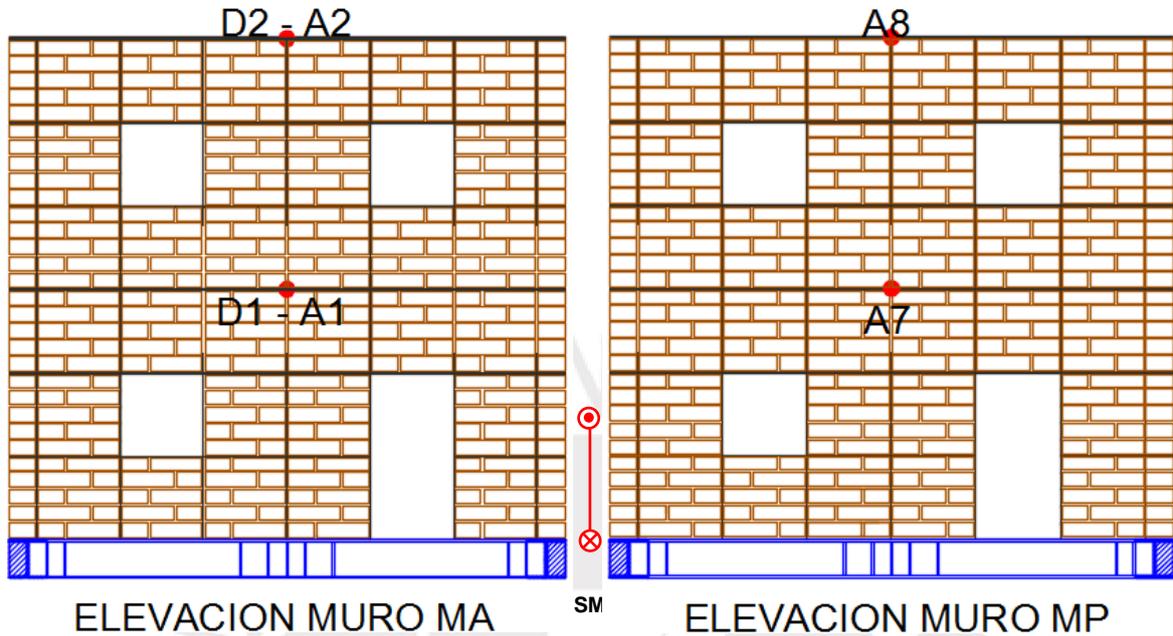


Fig. 4.1 Esquema de ubicación de los instrumentos en MA y MP.

La Fig. 4.2 muestra el esquema de ubicación de los instrumentos de desplazamiento y aceleración ubicados al centro de MD (tarrajado) y MI (sin tarrajear) a nivel de entrepiso y techo, también la ubicación de los instrumentos para control de desplazamiento relativo en el primer y tercer cuarto de MD y MI. Estos muros actúan en corte, su plano es paralelo a la dirección del movimiento de la mesa vibradora.

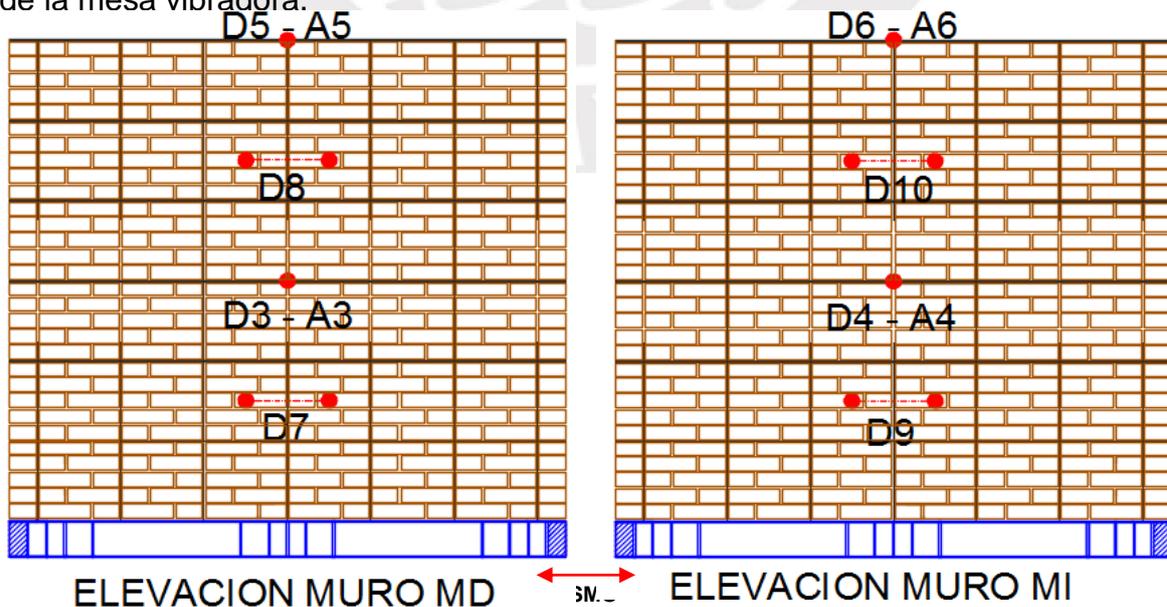


Fig. 4.2 Esquema de ubicación de los instrumentos en MD y MI.

La Fig. 4.3 muestra los instrumentos colocados en el modelo experimental sobre la mesa vibradora, listo para el ensayo de simulación sísmica, las mangueras se colocaron para proteger los instrumentos de un eventual desplome de material.

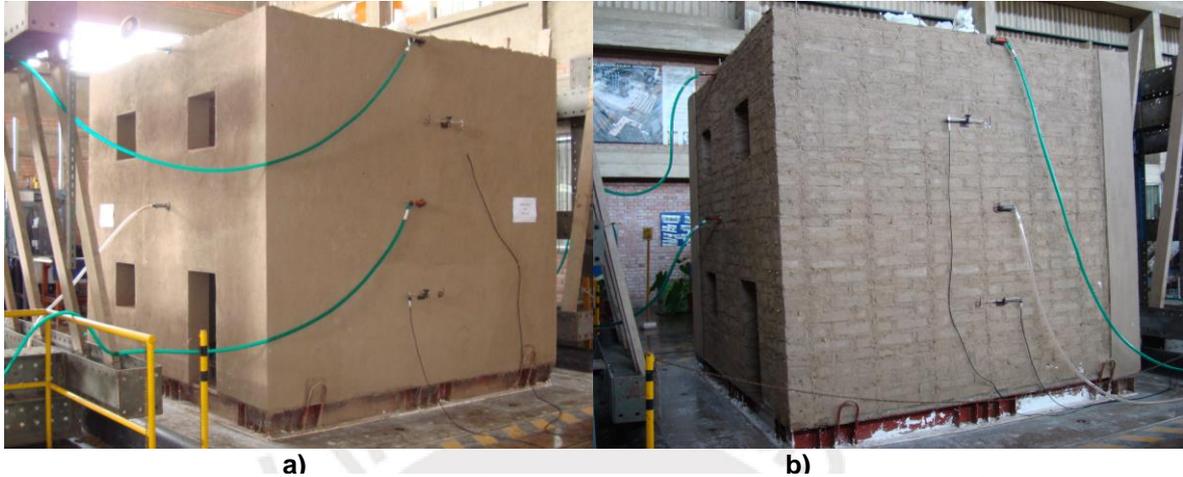


Fig. 4.3 Modelo experimental con los instrumentos colocados. a) MA y MD. b) MP y MI.

4.2 Protocolo de Ensayo

El ensayo de simulación sísmica fue programado y se realizó el 24 de octubre de 2008 a las 12:00 horas, con la participación del investigador del Proyecto, jefa de laboratorio, personal técnico y 8 ayudantes: 6 encargados del registro de fotos, videos, marcado de fallas con tiza post fases y 2 encargados de limpieza y retiro de instrumentos.

Luego de cada fase de ensayo el personal se acercó al modelo y marcó las fallas con tizas de colores (blanco para la Fase 1, rosado para la Fase 2 y verde para la Fase 3, luego se determinó celeste para la Fase IV). Además, se graficó la distribución de fisuras en esquemas de elevación de los muros. Los equipos de registro de evidencias se instalaron según el esquema mostrado (ver Fig. 4.4).

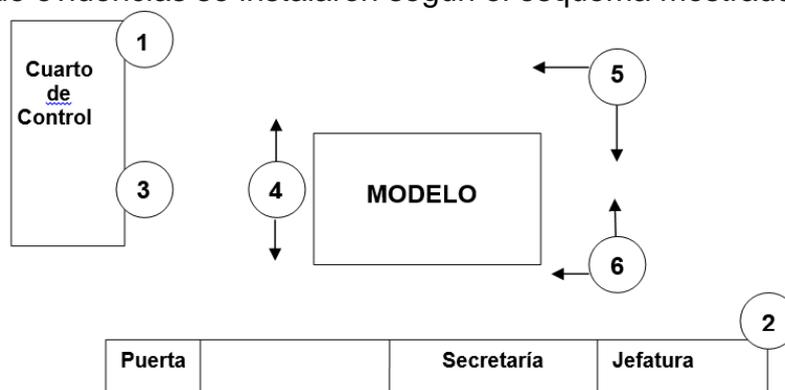


Fig. 4.4 Ubicación de equipos e instrumentos para la toma de datos durante el ensayo: Cámaras de video: posiciones 1, 2 y 3. Cámaras fotográficas: posiciones 4, 5 y 6 (PUCP).

En la **Tabla 4.2** se muestran las fases del ensayo, el desplazamiento y aceleración máximos de la señal de comando, obtenidos mediante el proceso numérico de la señal registrada en Lima el 31 de mayo de 1970.

Tabla 4.2 Secuencia del Ensayo

FASE	AMPLITUD (mm)	ACELERACIÓN (g)
Fase I	20	0,27
Fase II	50	0,70
Fase III	80	±1,10
Fase IV ^(*)	130	±1,30

(*) Dependiendo del estado del módulo al final de la fase anterior.

Antes de cada fase se aplicó el pulso rectangular para vibración libre.

4.3 Señales de Excitación

La mesa vibradora unidireccional posee un actuador controlado por una señal de comando de desplazamientos. Es capaz de replicar diferentes movimientos: pulsos rectangulares, cargas cíclicas, movimientos sísmicos registrados en diferentes eventos ocurridos en Perú y otras partes del Mundo. Para medir la frecuencia, el amortiguamiento y la respuesta sísmica del modelo experimental se le aplicaron tanto pulsos rectangulares como movimiento sísmico en la base.

4.3.1 Pulso Rectangular para Vibración Libre.

Antes de iniciar el ensayo se aplicó dos veces un pulso rectangular con magnitud de desplazamiento de 1,5 mm y duración de 5 s con una pausa de 5 s (ver **Fig. 4.5**). Éste, se volvió a aplicar durante el desarrollo del ensayo de simulación sísmica, tras cada fase. La respuesta al pulso aplicado, permite el cálculo de las características dinámicas del modelo experimental a través del método de decrementos logarítmicos.

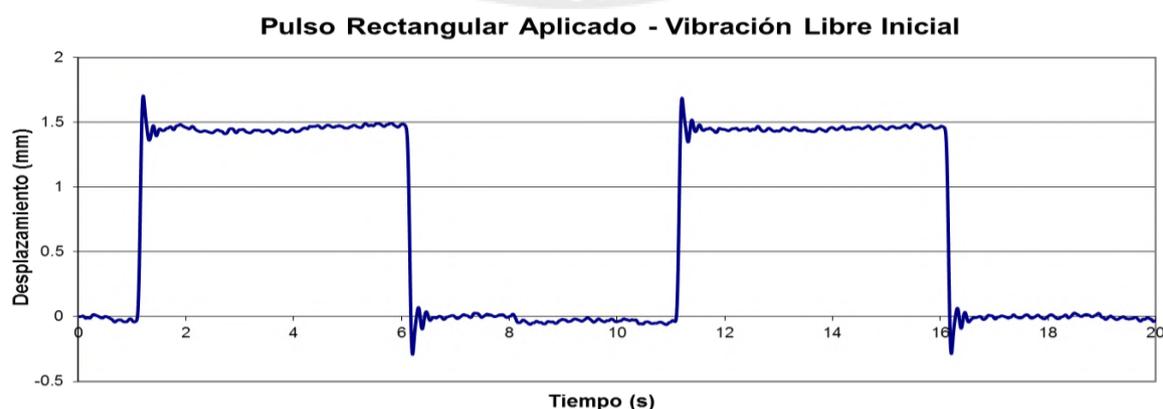


Fig. 4.5 Pulso rectangular aplicado a la mesa vibradora.

4.3.2 Señal de Comando.

En el Laboratorio, se cuenta con el registro de aceleración del suelo correspondiente a diferentes movimientos sísmicos, entre ellos, el que se produjo en Lima el 31 de mayo 1970, en la dirección de la componente de N82E (IGP). Antes de aplicar la señal como parte del pre procesamiento, se sometió a un filtro de ± 18 Hz, siendo compatible con el espectro de la Norma Peruana.

La señal de desplazamiento que se aplica a la mesa vibradora simulando el movimiento del suelo para el modelo, se obtuvo del registro de aceleración elegido. En la Fig. 4.6 se puede observar el registro de aceleración original producido por el sismo de Lima en 1970. La señal de desplazamiento que corresponde a este registro se muestra en la Fig. 4.7.

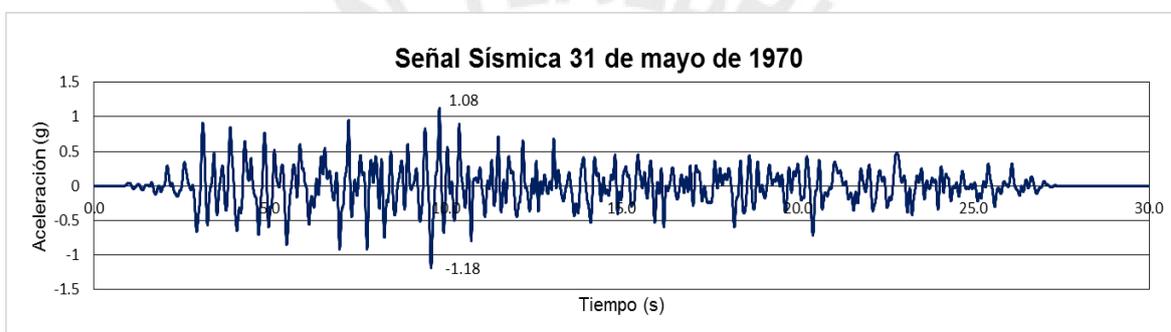


Fig. 4.6 Registro de aceleración del sismo de Lima ocurrido el 31 de mayo de 1970.

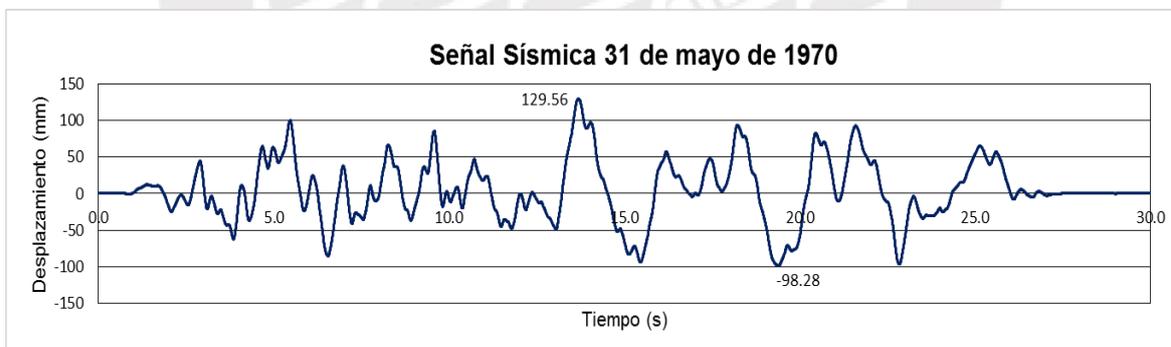


Fig. 4.7 Desplazamiento correspondiente al sismo de Lima ocurrido el 31 de mayo de 1970.

4.3.3 Secuencias del Ensayo.

El ensayo se planificó en tres fases. Cada fase corresponde a un movimiento de vibración libre para medir el amortiguamiento y la frecuencia natural y luego una señal sísmica que fue incrementándose.

La Fase I representa un movimiento de baja amplitud ($d = 20$ mm) sometiendo el modelo a excitaciones de baja intensidad, consistente con un sismo leve.

La Fase II representa un movimiento de mediana amplitud ($d = 50 \text{ mm}$) sometiendo el modelo a excitaciones de mediana intensidad, consistente con un sismo moderado.

La Fase III representa un movimiento de gran amplitud ($d = 80 \text{ mm}$) sometiendo el modelo a excitaciones de gran intensidad, consistente con un sismo severo.

La vivienda no colapsó por lo que fue sometida a la Fase IV, que corresponde a la amplitud máxima del equipo, aplicando el movimiento sísmico sin escala, con un desplazamiento de 130 mm y aceleración aproximada $1,3 \text{ g}$, consistente con un sismo catastrófico. La duración de la señal ha sido disminuida en una relación de $1/\sqrt{2}$ debido a la reducción de la escala. Para todas las fases el intervalo de digitalización de datos es de $7,5 \times 10^{-3} \text{ s}$, con un registro de $133,3 \text{ pts/s}$.

La Fig. 4.8 muestra juntos los registros de desplazamiento en la mesa vibradora para cada fase.

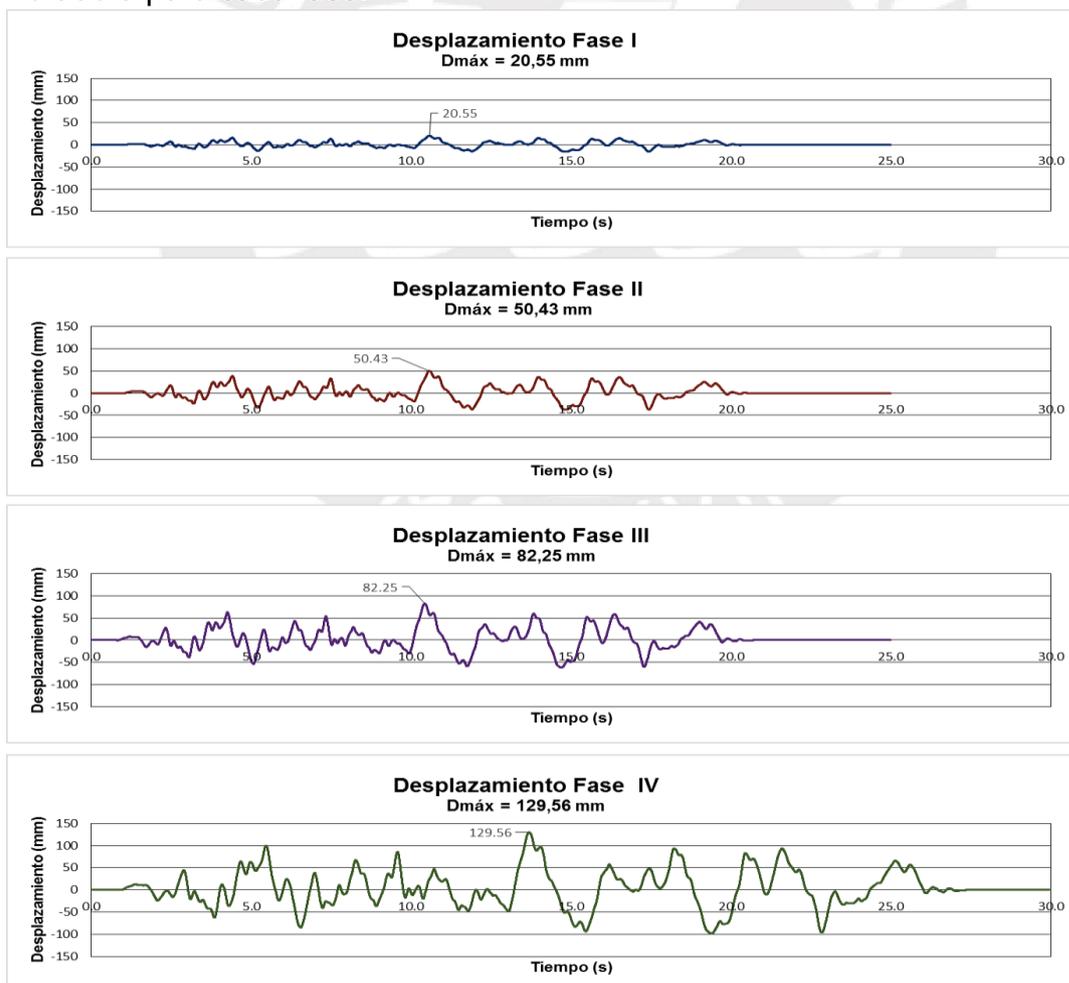


Fig. 4.8 Registro de desplazamientos en la mesa vibradora para cada fase del ensayo.

La Fig. 4.9 muestra juntos los registros de aceleración en la mesa vibradora para cada fase, lo que nos permite tener una noción de la amplificación que se da entre la Fase I y Fase IV del ensayo de simulación sísmica.

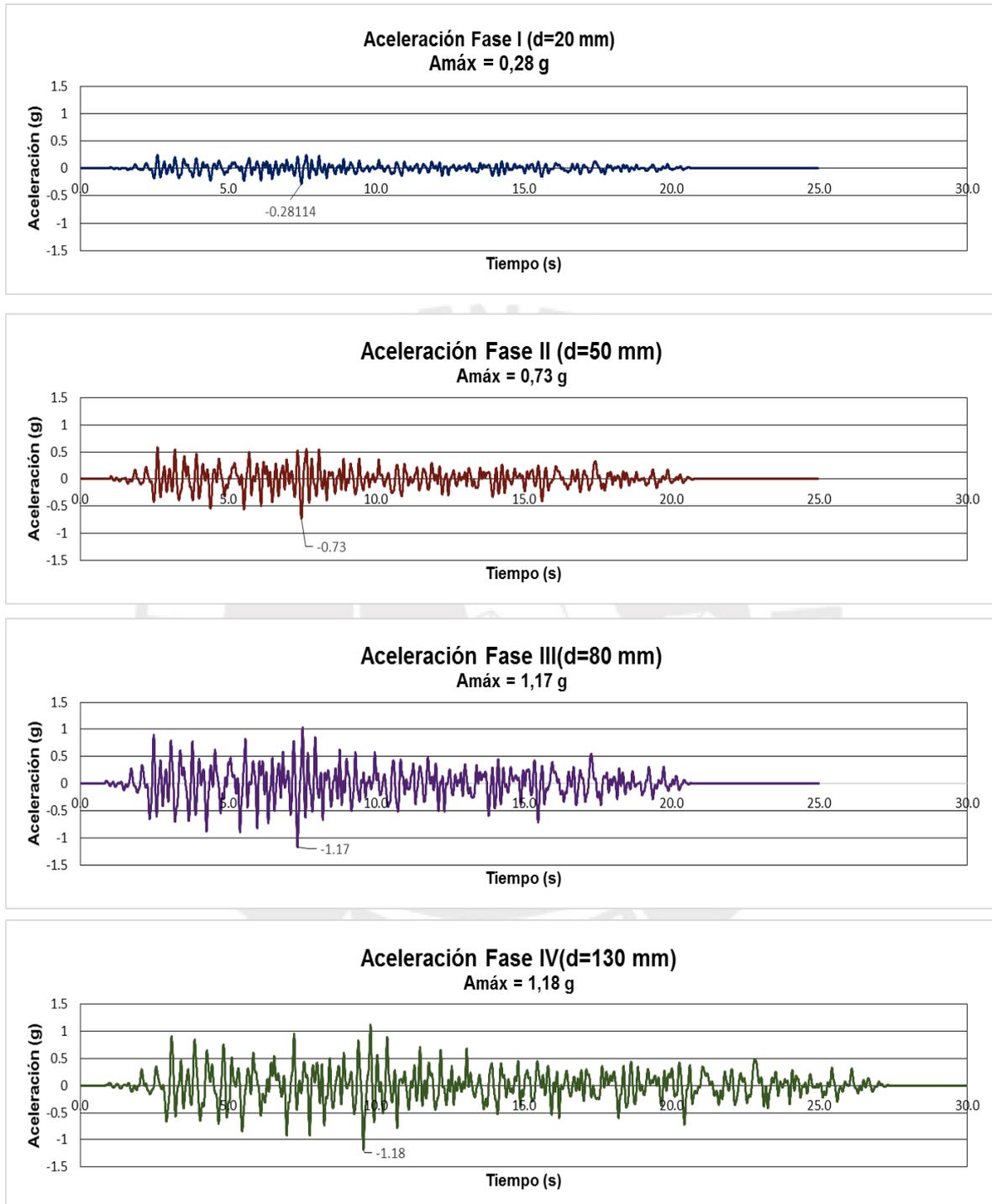


Fig. 4.9 Registro de aceleraciones en la mesa vibradora para cada fase del ensayo.

5. Realización de los Ensayos de Simulación Sísmica

En este capítulo se presenta el procesamiento de los datos obtenidos por los instrumentos durante los ensayos, la descripción de fallas observadas en la estructura y las conclusiones obtenidas en mérito de lo observado.

5.1 Vibración Libre

Se registró la aceleración a nivel de techo del modelo en vibración libre, al aplicarle el pulso rectangular antes de cada Fase del Ensayo. El registro de estas aceleraciones, luego se interpretó, tomando la más “limpia”, es decir aquella con un comportamiento similar al esperado; con esta porción de la gráfica, se pudieron calcular el período, frecuencia y amortiguamiento de la estructura. La Fig. 5.1 muestra la elección de uno de los pulsos del gráfico de respuesta al pulso rectangular, aquel que muestra el pico inicial más alto y es siempre decreciente.



Fig. 5.1 Estructura en vibración libre y elección de intervalo de respuesta (6 a 7s).

5.1.1 Períodos Naturales de Vibración de Cada Muro.

Los períodos naturales de vibración de cada muro, se obtuvieron promediando el tiempo transcurrido para dos o más ciclos completos de los ensayos en vibración libre (se trabajó en el dominio del tiempo). La Fig. 5.2 muestra los períodos T_1 (primero) y T_n (enésimo) en el gráfico de respuesta.

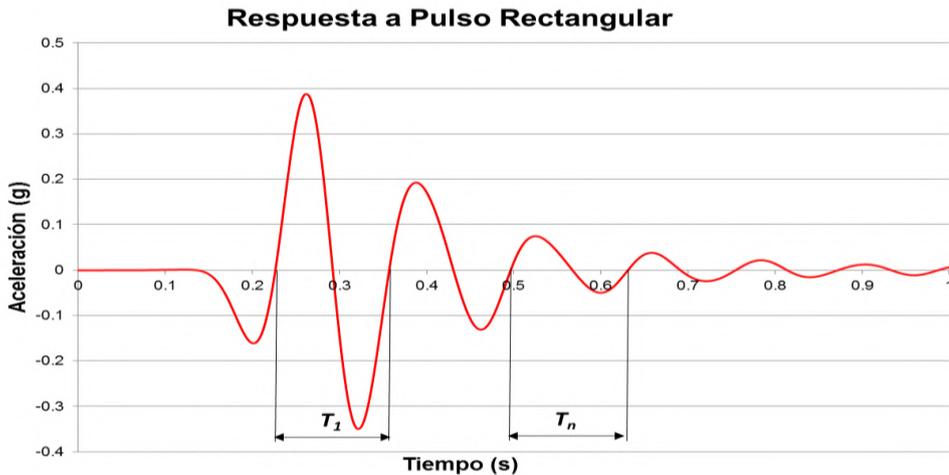


Fig. 5.2 Períodos T_1 y T_n en el gráfico de respuesta al pulso rectangular.

Se aplica el promedio:

$$T = \frac{T_1 + \dots + T_n}{n} \dots \dots \dots (5.1)$$

Donde:

n : número de períodos considerado. Se recomienda tomar máximo tres ciclos. El período T está en s.

5.1.2 Cálculo del Amortiguamiento de Cada Muro. Método de Decremento Logarítmico.

El decremento logarítmico se calculó aplicando logaritmo natural al cociente de la amplitud de dos aceleraciones máximas, consecutivas o no, de la estructura en vibración libre. La Fig. 5.3 muestra las aceleraciones máximas de dos ciclos en el gráfico de respuesta al pulso rectangular.

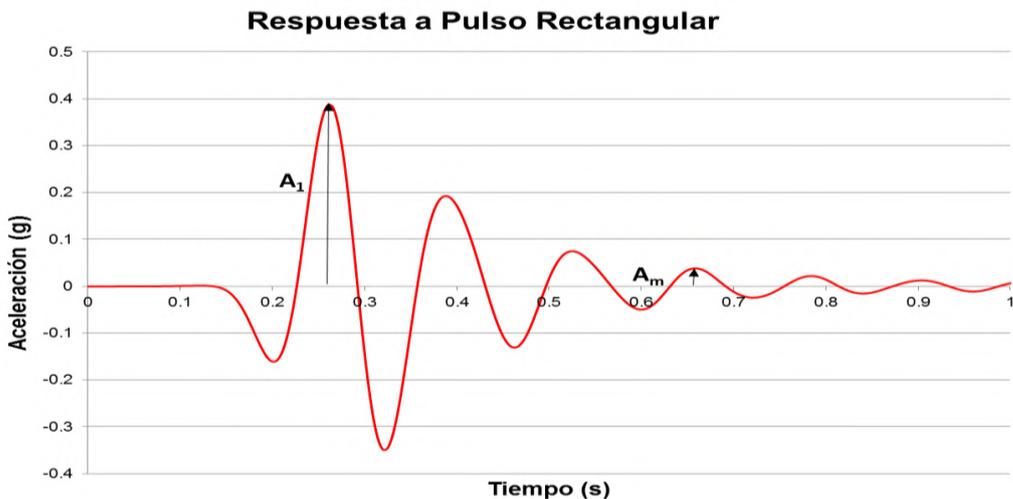


Fig. 5.3 Amplitudes de dos ciclos del gráfico de respuesta al pulso rectangular.

El amortiguamiento se obtuvo como el cociente del decremento logarítmico entre el producto de dos veces π por el número de ciclos entre picos. (el amortiguamiento disipa la energía de la estructura, reduciendo sus desplazamientos. Chopra, 2014). Partimos de:

$$\delta_m = \ln\left(\frac{A_1}{A_m}\right) \dots\dots\dots (5.2)$$

Donde:

A_1 : Amplitud de la aceleración en el primer ciclo de vibración en g.

A_m : Amplitud de la aceleración del último ciclo considerado en g (la cantidad de ciclos considerados es criterio del ingeniero). Luego:

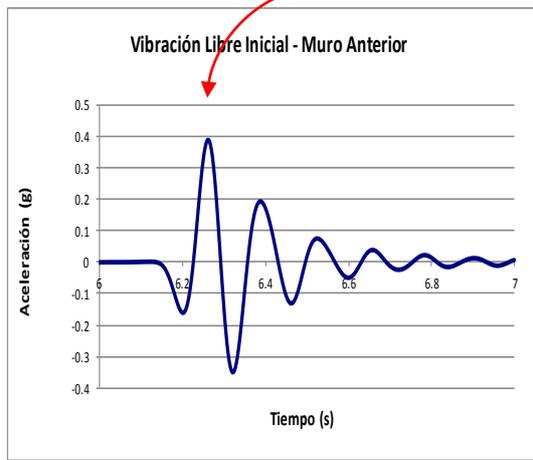
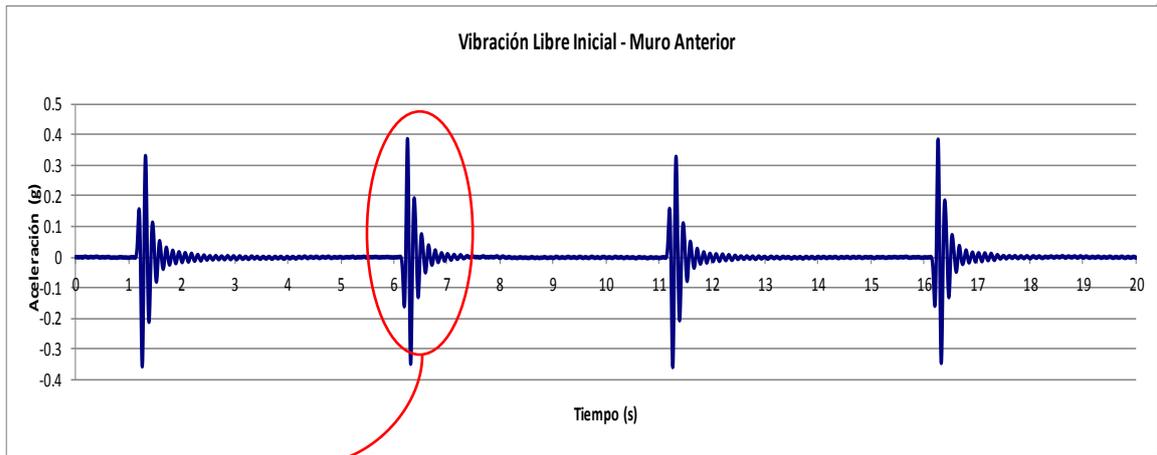
$$\xi = \frac{\delta_m}{2\pi m} \dots\dots\dots (5.3)$$

Donde:

m : Número de ciclos considerados en el cálculo de δ_m .

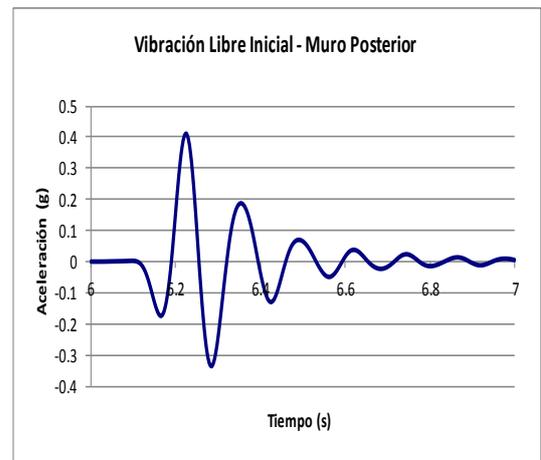
A continuación se muestra el procedimiento de cálculo de las características dinámicas propias de la estructura en vibración libre, tras someterla al pulso rectangular.

La Fig. 5.4 muestra: una ventana donde se amplió el gráfico de respuesta, luego se hizo lo mismo con los demás muros y con el uso de las fórmulas se determinaron las características de cada elemento en vibración libre.



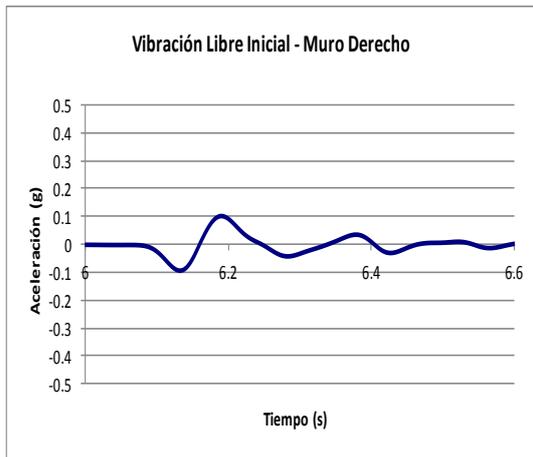
Valores obtenidos:

ξ	=	12,89 %
T	=	0,13 s
ω	=	48,22 rad/s



Valores obtenidos:

ξ	=	12,83 %
T	=	0,13 s
ω	=	48,39 rad/s



Valores obtenidos:

ξ	=	18,08 %
T	=	0,16 s
ω	=	39,89 rad/s



Valores obtenidos:

ξ	=	9,21 %
T	=	0,14 s
ω	=	44,92 rad/s

Fig. 5.4 Respuesta de cada muro en vibración libre inicial (antes de Fase I)

La **Tabla 5.1** muestra el resultado de parámetros dinámicos de todos los muros para cada fase del ensayo.

Tabla 5.1 Parámetros dinámicos: período (T), frecuencia y amortiguamiento para cada muro a nivel de techo.

VIBRACIÓN LIBRE	MURO	T (s)	FREC. (Hz)	AMORT. (%)
INICIAL	MA	0,13	48,22	12,89
	MP	0,13	48,39	12,83
	MD	0,16	39,89	18,08
	MI	0,14	44,92	9,21
POST FASE I	MA	0,12	52,48	9,45
	MP	0,12	52,04	8,93
	MD	0,13	46,79	27,81
	MI	0,10	62,74	17,10
POST FASE II	MA	0,16	38,16	11,44
	MP	0,16	38,41	11,12
	MD	0,18	35,38	15,65
	MI	0,12	51,52	11,88
POST FASE III	MA	0,17	36,97	10,87
	MP	0,17	37,57	10,35
	MD	0,18	35,49	17,29
	MI	0,14	44,71	32,76

En la **Tabla 5.1** se observa:

1. El período de vibración de MA y MP ha ido aumentando de 0,13 a 0,17s, lo que muestra que la estructura ha sufrido daños durante el ensayo sísmico.

El período de MD disminuye en la Fase II y luego aumenta.

El período de MI disminuye en la Fase II y regresa al valor inicial en la Fase IV, lo cual es inconsistente con el deterioro que presenta este elemento.

2. La frecuencia de MA y MP aumenta de 48,00 a 52,00 en Fase II y luego disminuye a 37,00. Este registro es consistente con el período y el deterioro de la estructura.

La frecuencia de MD también aumenta para Fase II y luego disminuye hasta Fase IV.

La frecuencia de MI aumenta para Fase II, disminuye para Fase III y vuelve a su valor inicial para Fase IV, lo cual es inconsistente con el deterioro del elemento.

3. Los valores de amortiguamiento son inconsistentes:

MA y MP muestran valores similares que varían entre 9,00 y 12,00, el amortiguamiento disminuye pero no presenta una variación significativa.

MD presenta mayor amortiguamiento en las primeras fases y en general tiene mayor amortiguamiento que el MI aunque sus valores debieran ser similares porque ambos muros están sometidos a esfuerzo cortante.

MI aumenta su amortiguamiento lo cual es consistente con el daño observado (es el muro que presenta mayor cantidad de daño).

5.2 Comportamiento Observado en cada Fase del Ensayo

El comportamiento de los muros en cada Fase del ensayo se registró mediante fotografías y vídeos de las zonas que tuvieron deterioro.

5.2.1 Después de la Fase I.

Solamente se encontraron tres fisuras en el primer piso del MI cerca a la arista con MD. Los demás elementos permanecieron incólumes, asumiéndose que permanecieron en el rango elástico. La Fig. 5.5 muestra los daños producidos en la vivienda ensayada.

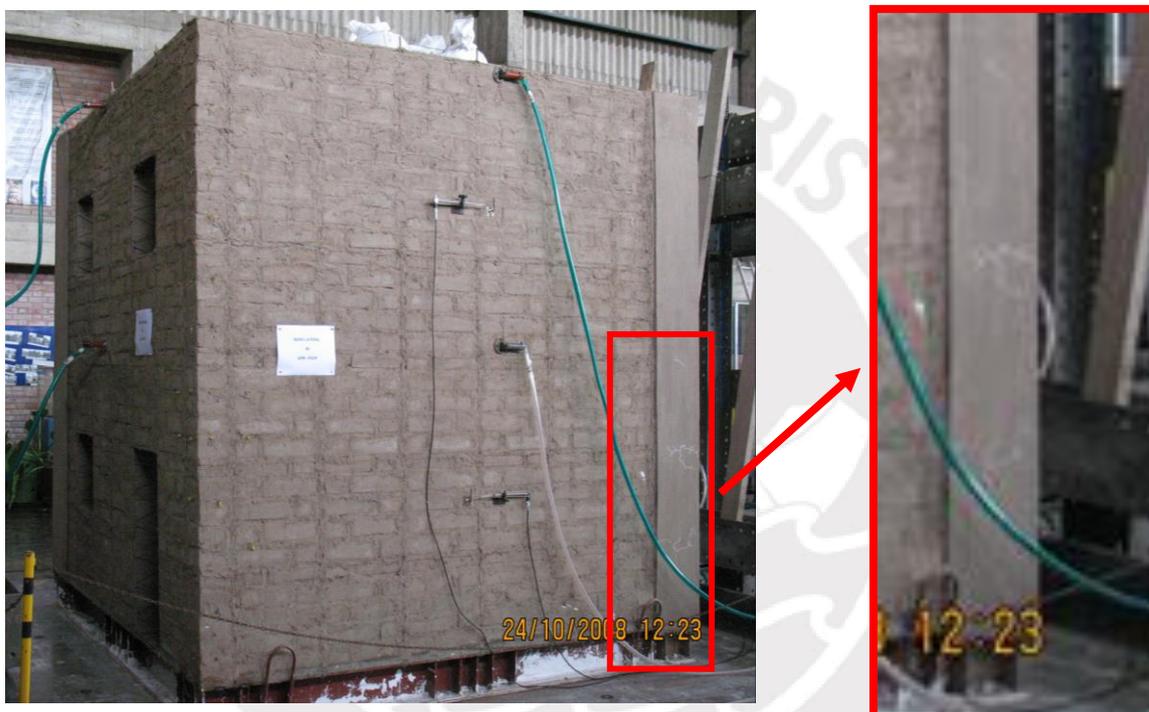


Fig. 5.5 Muestra tres fisuras en el primer piso de MI.

5.2.2 Después de la Fase II.

Se empezaron a notar fisuras en el primer piso del MD; en MP y MI se mostró una fisura horizontal a la altura del alféizar de las ventanas del segundo piso y otras de menor longitud que separaron los marcos de las cerchas con los bloques de adobe, se empezó a desprender el tarrajeo cerca de la arista de MI y MA. Las Fig. 5.6 y 5.7 muestran los daños producidos en la vivienda ensayada.

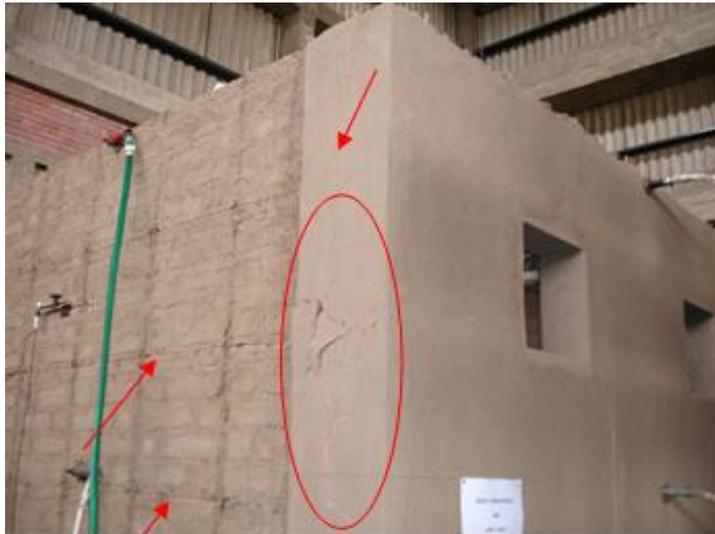


Fig. 5.6 Muestra fisuras horizontales y verticales en MI, tarrajeo empezó a desprenderse.

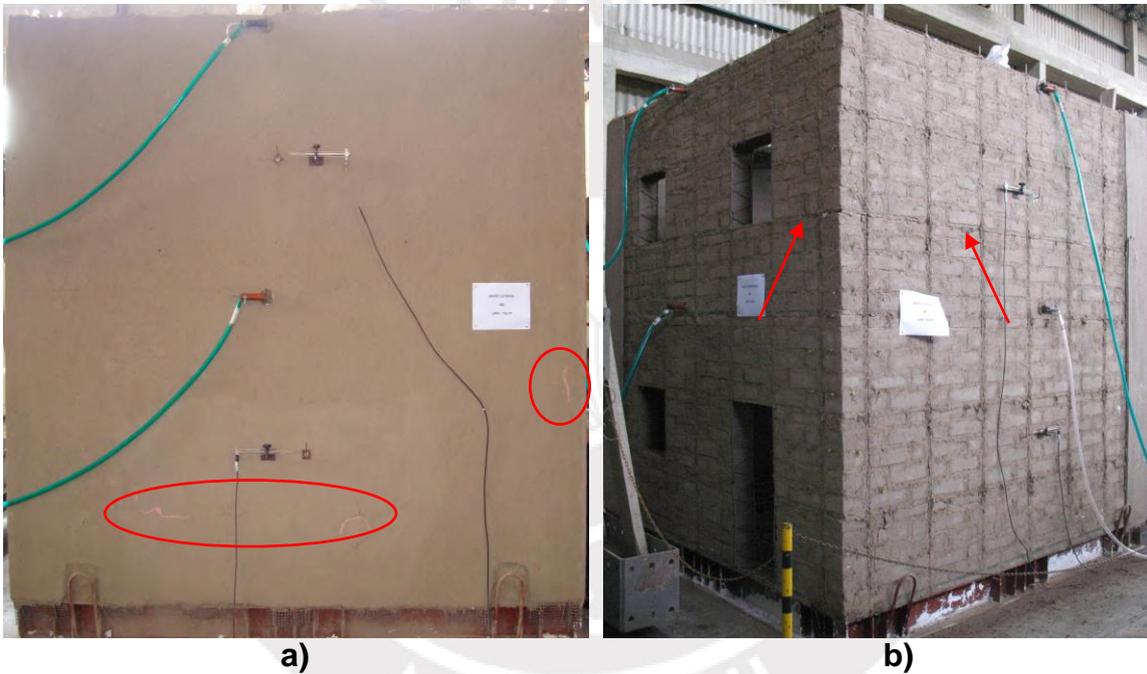


Fig. 5.7 a) Muestra tres fisuras en MD. b) MP y MI presentan fisura horizontal en alféizar de ventanas de segundo piso y otras con la forma de los bloques dentro de las cerchas.

5.2.3 Después de la Fase III.

Se formaron múltiples fisuras en MD (principalmente en el primer piso) y MI, que mostraron separación de los bloques y los marcos de las cerchas. En MP se deformaron las cerchas en el vano de la puerta. Las Fig. 5.8 y 5.9 muestran los daños producidos en la vivienda ensayada.



Fig. 5.8 Muestra daño en MD del modelo experimental.



Fig. 5.9 a) Muestra deformación en vano de puerta MP. b) MD muestra fisuras internas.

5.2.4 Después de la Fase IV.

Se formaron múltiples fisuras en MD (principalmente en el primer piso) y empezó a desprenderse el tarrajeo del muro, los bloques de adobe de la esquina entre MD y MA empezaron a desprenderse a la altura de techo, generándose una fisura en MA. En MP y MI, se apreció separación de los bloques y los marcos de las cerchas, las medias unidades instaladas en el encuentro de estos muros se desprendieron aunque ninguna se cayó. En MP se deformaron las cerchas en los vanos de puerta y ventanas, la ventana izquierda del segundo

piso presentó fisuras hasta el extremo del muro. Las Fig. 5.10 y 5.11 muestran los daños producidos en la vivienda ensayada.

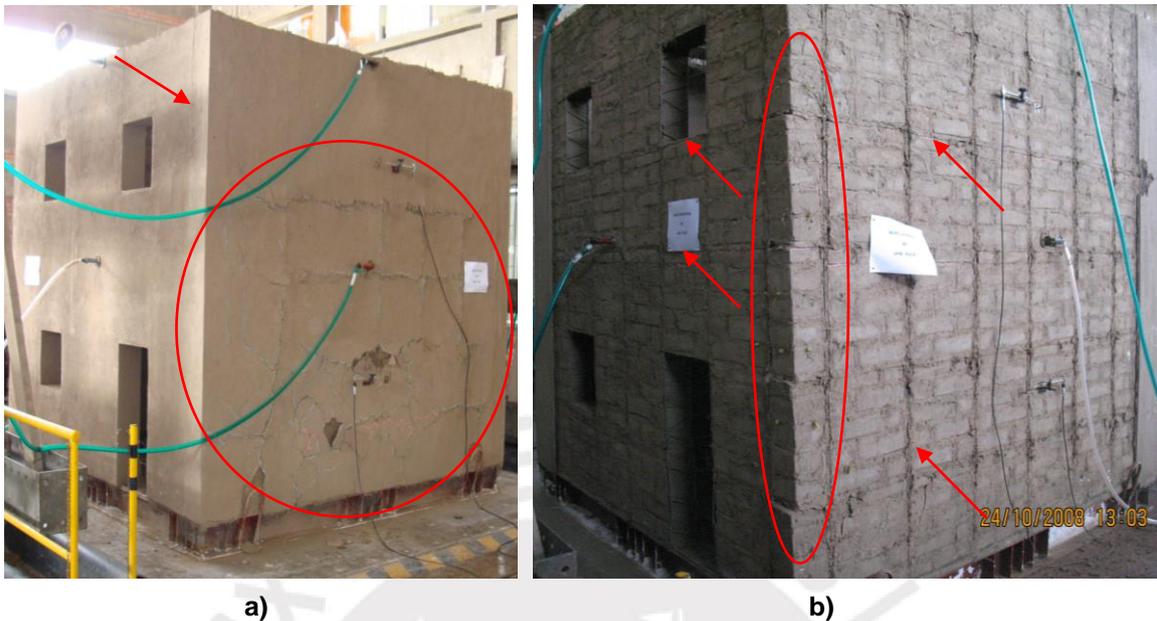


Fig. 5.10 a) Muestra deterioro en MA y MD. b) Muestra separación de los bloques de adobe y deterioro en MP y MI.



Fig. 5.11 Muestra fisuras en ventana izquierda de segundo piso MP.

No se apreció colapso parcial ni total de la estructura, el refuerzo con SAI cumplió su objetivo y la vivienda quedó en condiciones de ser reparada.

Los muros tarrajeados presentaron menos daño que los muros sin tarrajeo.

Los muros a flexión y corte no formaron los bloques de falla típicos, debido a que estuvieron contenidos en las cerchas.

Los daños más profundos se registraron en el primer piso y en los dinteles de los vanos, en los que se deformaron las cerchas durante Fases III y IV.

5.3 Procesamiento de Datos Experimentales

Luego de cada fase de ensayo, con los registros de los instrumentos obtenidos, se procesaron las mediciones para generar:

Los gráficos Desplazamiento vs. Tiempo y Aceleración vs. Tiempo, que representan directamente los datos obtenidos por los instrumentos instalados en los puntos de interés que para una vivienda de dos pisos se ubican al centro de los muros a nivel de entrepiso y techo.

Los gráficos de lazos de histéresis, que representan la tendencia del modelo a permanecer en su posición inicial a pesar de las fuerzas aplicadas externamente, dándonos una noción de la capacidad elástica de la estructura (mientras más definidos, más elástica será).

La Fig. 5.12 muestra la aceleración y desplazamiento producidos en la mesa vibradora durante la Fase IV del ensayo, tanto los desplazamientos como las aceleraciones en las diferentes Fases, tuvieron la misma forma con magnitud diferente que se fue incrementando.

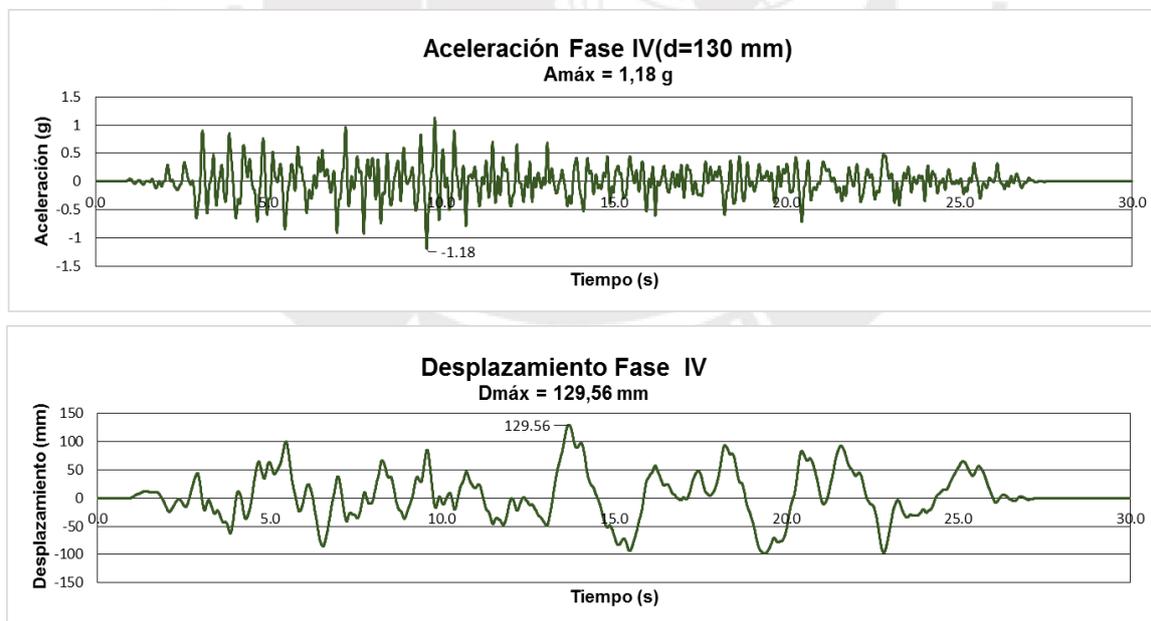


Fig. 5.12 Registro de Aceleración y Desplazamiento en la mesa vibradora durante Fase IV.

En esta sección se muestran tres matrices que describen en resumen el comportamiento de un muro sometido a flexión (MA) y un muro sometido a corte

(MD), ambos fueron seleccionados como elementos representativos para todas las fases del ensayo de simulación sísmica.

El procesamiento de datos de los demás elementos se incluye en el Anexo.

La Fig. 5.13 muestra los gráficos Desplazamiento vs. Tiempo a nivel de techo del MA (flexión) y MD (corte) durante las cuatro fases del ensayo de simulación sísmica, se puede observar que la amplitud fue incrementándose, los valores más altos se produjeron casi en el mismo momento para las tres primeras fases, el MA mostró desplazamientos mayores que el MD, sobre todo en Fases III y IV.

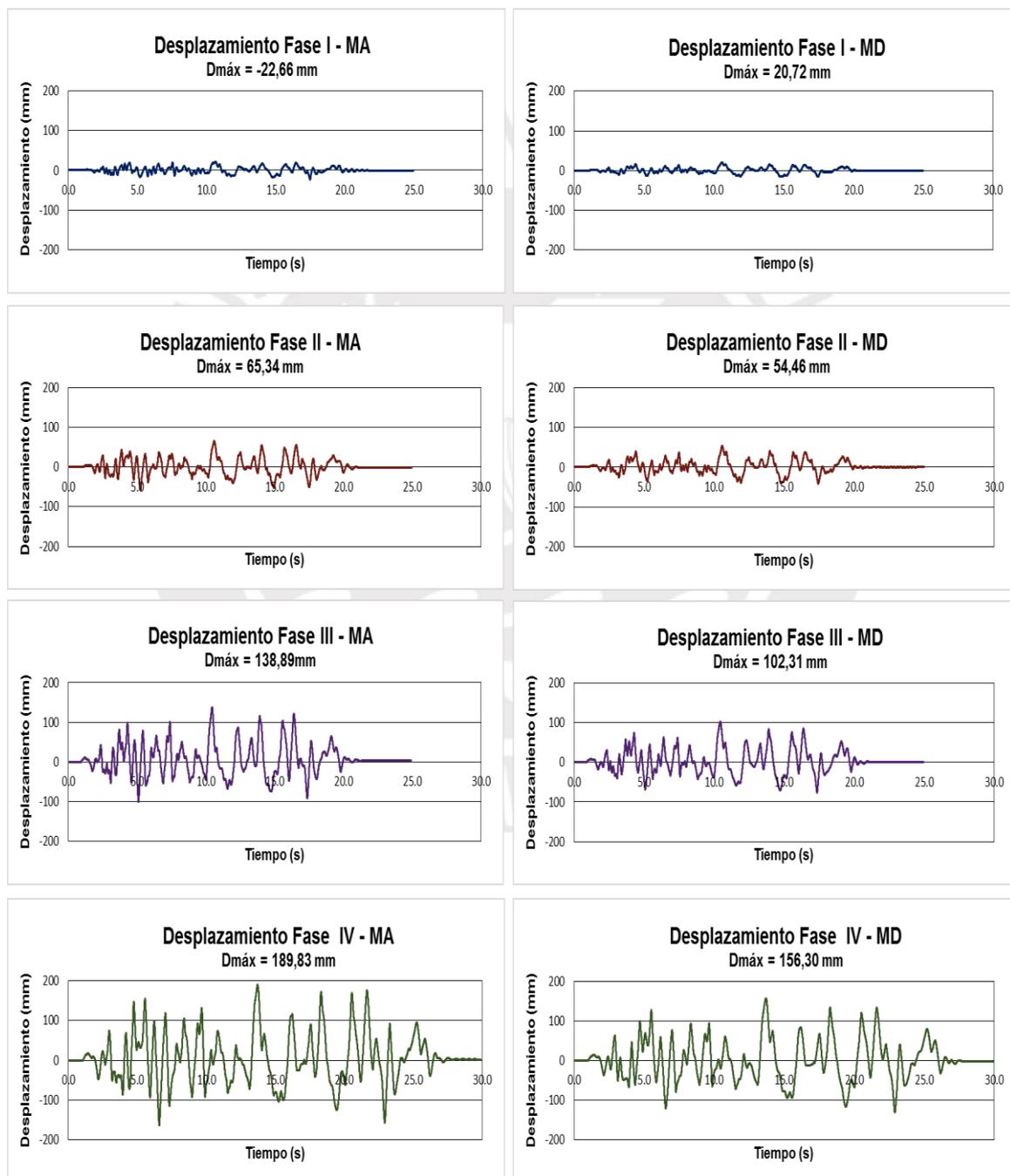


Fig. 5.13 Gráficos de Desplazamiento vs. Tiempo de MA (flexión) y MD (corte).

La Fig. 5.14 muestra los gráficos Aceleración vs. Tiempo a nivel de techo del MA (flexión) y MD (corte) durante las cuatro fases del ensayo de simulación sísmica, podemos observar que la magnitud se incrementó hacia la Fase IV, decreciendo con respecto a la Fase III en el MA, los valores máximos se produjeron en diferentes instantes, el MD mostró el valor máximo de aceleración en la Fase IV.

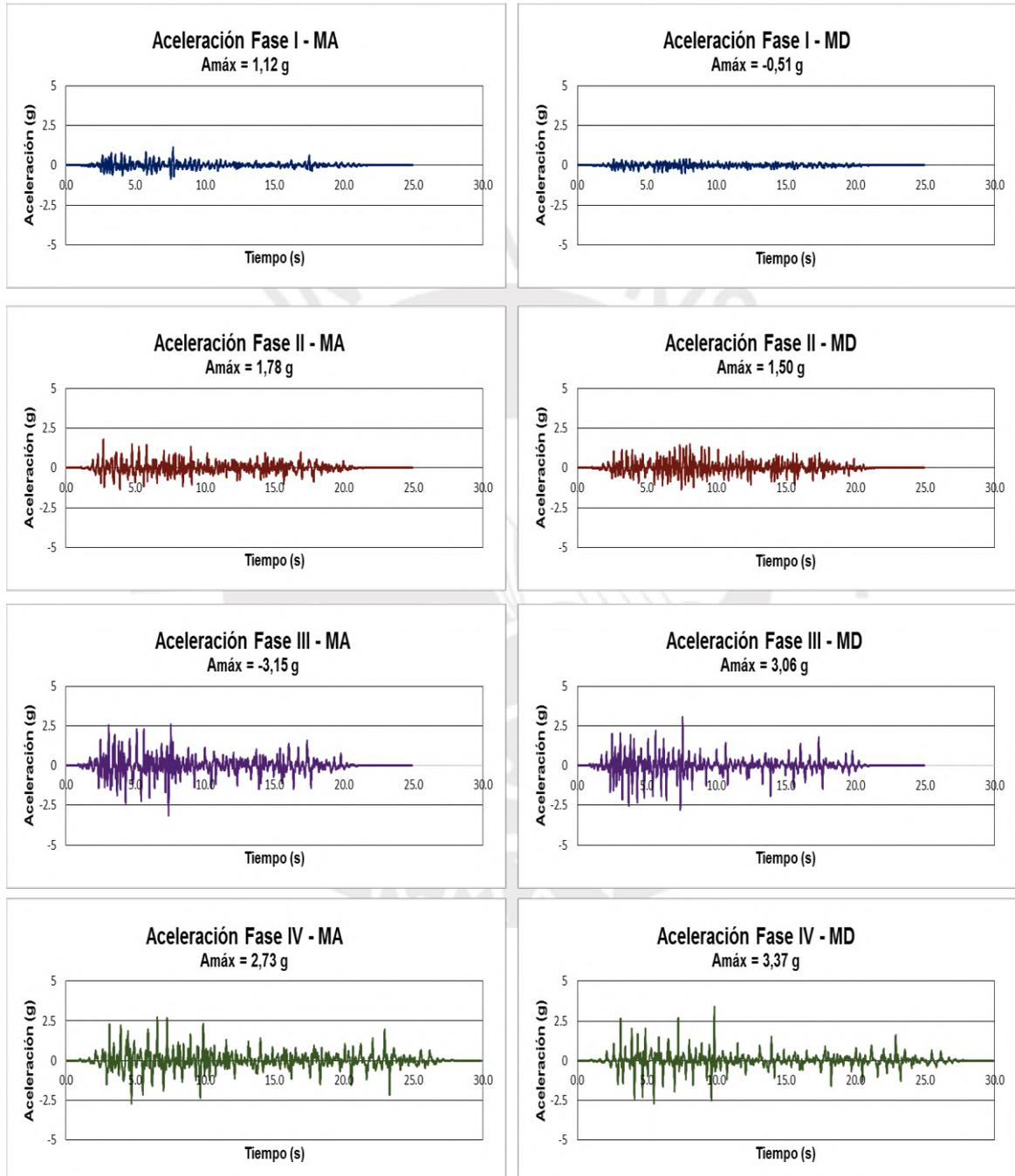


Fig. 5.14 Gráficos de Aceleración vs. Tiempo de MA (flexión) y MD (corte).

La Fig. 5.15 muestra los lazos de histéresis a nivel de techo del MA (flexión) y MD (corte) durante las cuatro fases del ensayo de simulación sísmica.

Para el MA los lazos de histéresis mostraron que en la Fase I hubo comportamiento elástico, fue posible determinar la rigidez del elemento; en todas las siguientes fases el comportamiento fue no lineal. Para el MD, hubo comportamiento claramente elástico en las Fases I y II, comportamiento no lineal en las Fases III y IV (daño estructural).

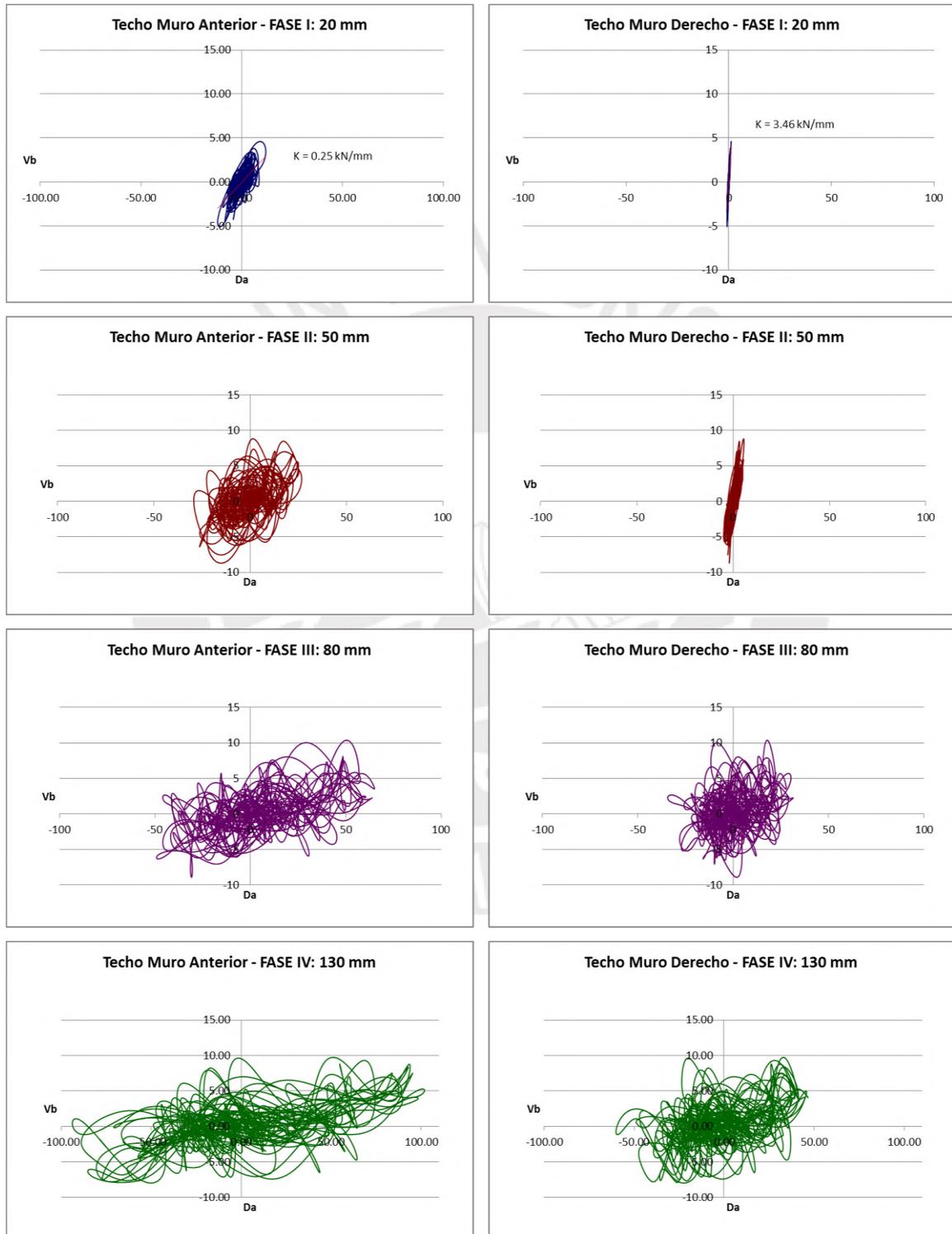


Fig. 5.15 Lazos de histéresis a nivel de techo de MA (flexión) y MD (corte).

Los valores máximos de desplazamiento a nivel de entrepiso y techo para MA y MD se resumen en las Tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5.

Tabla 5.2 Valores máximos de desplazamiento en la mesa vibradora, primer y segundo piso del MA e instante en que se producen.

FASE DEL ENSAYO	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO MA (FLEXIÓN)					
	MESA VIB.	INSTANTE	PRIMER PISO	INSTANTE	SEGUNDO PISO	INSTANTE
	(mm)	(s)	(mm)	(s)	(mm)	(s)
FASE I	20,56	10,57	20,67	10,61	-22,66	17,49
FASE II	50,45	10,58	59,72	10,59	65,34	10,60
FASE III	82,29	10,43	93,25	10,44	138,89	10,45
FASE IV	129,56	13,69	158,88	13,71	189,83	13,71

Tabla 5.3 Valores máximos de desplazamiento en la mesa vibradora, primer y segundo piso del MD e instante en que se producen.

FASE DEL ENSAYO	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO MD (CORTE)					
	MESA VIB.	INSTANTE	PRIMER PISO	INSTANTE	SEGUNDO PISO	INSTANTE
	(mm)	(s)	(mm)	(s)	(mm)	(s)
FASE I	20,56	10,57	20,49	10,58	20,72	10,58
FASE II	50,45	10,58	54,05	10,57	54,46	10,58
FASE III	82,29	10,43	96,95	10,45	102,31	10,45
FASE IV	129,56	13,69	147,94	13,73	156,30	13,71

Podemos ver que para las tres primeras fases (excepto en la Fase I para MA) el desplazamiento máximo se presenta a los 10,60 s y en la última fase se da a los 13,70 s (porque la señal tiene mayor duración).

El porcentaje de incremento de desplazamiento en techo de MA llega al 69% en Fase III, mientras en MD llega al 24% también en Fase III. El porcentaje de incremento para la Fase IV es menor en ambos casos.

El MD presenta menor incremento de desplazamiento que el MA.

Los valores máximos de aceleración a nivel de entrepiso y techo para MA y MD se resumen en las Tablas 5.4 y 5.5.

Tabla 5.4 Valores máximos de aceleración en la mesa vibradora, primer y segundo piso del MA e instante en que se producen.

FASE DEL ENSAYO	ACELERACIÓN MÁXIMA MA (FLEXIÓN)					
	MESA VIB.	INSTANTE	PRIMER PISO	INSTANTE	SEGUNDO PISO	INSTANTE
	(g)	(s)	(g)	(s)	(g)	(s)
FASE I	-0,28	7,49	0,58	7,72	1,12	7,72
FASE II	-0,73	7,49	-0,96	5,58	1,78	2,70
FASE III	-1,17	7,36	1,26	7,52	-3,15	7,39
FASE IV	-1,18	9,59	-1,39	6,27	2,73	6,58

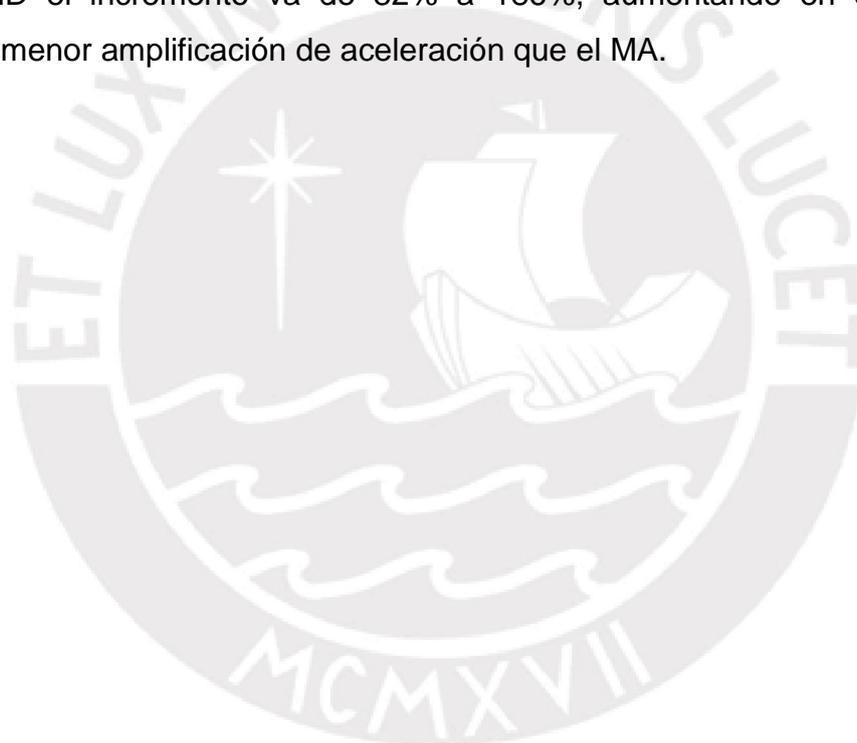
Tabla 5.5 Valores máximos de aceleración en la mesa vibradora, primer y segundo piso del MD e instante en que se producen.

FASE DEL ENSAYO	ACELERACIÓN MÁXIMA MD (CORTE)					
	MESA VIB.	INSTANTE	PRIMER PISO	INSTANTE	SEGUNDO PISO	INSTANTE
	(g)	(s)	(g)	(s)	(g)	(s)
FASE I	-0,28	7,49	-0,50	7,51	-0,51	7,77
FASE II	-0,73	7,49	1,29	8,11	1,50	8,11
FASE III	-1,17	7,36	2,21	7,58	3,06	7,58
FASE IV	-1,18	9,59	-2,17	4,16	3,37	9,86

La aceleración máxima en MA y MD se presenta en diferentes instantes, entre los 2 y 9 s.

El porcentaje de incremento de aceleración en techo de MA es del 300% en Fase I y luego varía a 131% en Fase IV, no muestra una tendencia definida.

En MD el incremento va de 82% a 186%, aumentando en cada Fase. Presenta menor amplificación de aceleración que el MA.



6. Modelo Numérico de los Ensayos

6.1 Análisis Lineal con el Método de Elementos Finitos

El Modelo Matemático, a través de fórmulas matemáticas y simplificaciones de la realidad es capaz de expresar el comportamiento de sistemas complejos, como la vivienda de adobe de dos pisos reforzada con SAI ante situaciones difíciles de observar en la realidad, como el comportamiento de esta vivienda durante la ocurrencia de un sismo.

El análisis estructural empleando el Método de Elementos Finitos (MEF), permite estudiar modelos lineales que usan parámetros definidos y asumen que el material no es deformado plásticamente. La tensión en el material varía con la cantidad de deformación. En este trabajo se pretendió representar el comportamiento de la vivienda reforzada con SAI durante la Fase I del ensayo de simulación sísmica en el que la estructura actúa en el rango elástico.

Se utilizó el programa SAP2000 en el rango lineal para representar las características dinámicas y desplazamientos máximos de la estructura.

Tratando de replicar las propiedades de la estructura (período fundamental inicial) y su comportamiento global (desplazamiento en MA a flexión y MD en corte), se elaboraron cinco modelos analíticos con variaciones en su estructura y distribución de bloques de adobe.

6.2 Propiedades Mecánicas de los Elementos

Para el desarrollo del modelo matemático pudo haberse modelado todas las cerchas con su geometría y dimensiones reales, pero la simulación de las soldaduras y/o amarre con alambre de construcción en cada punto de intersección era trabajoso y dejar algunos puntos sueltos hubiera distorsionado el comportamiento de la estructura. Otro inconveniente que se presentó fue la inclusión de los bloques de adobe, cuya interacción con barras es sencilla mas no con cerchas.

Se generó un área circular equivalente y se introdujo el uso de modificadores para lograr la inercia de la sección inicial (Teorema de Steiner). Las cerchas se modelaron utilizando elementos frame. La Fig. 6.1 muestra las propiedades geométricas de la cercha y su área circular equivalente.

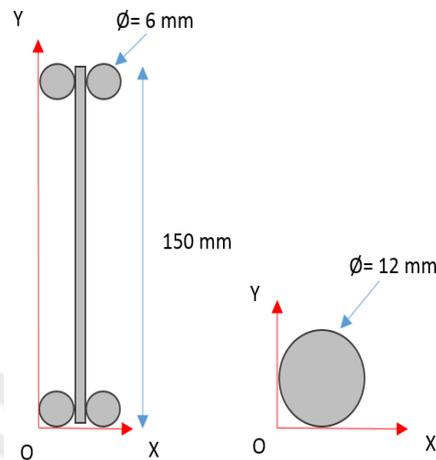


Fig. 6.1 Sección transversal de la cercha y su sección equivalente.

El desarrollo analítico se formuló modelando los adobes como elementos shell thin. Las planchas de triplay en entrepiso y techo, se modelaron como elementos plate thick, porque ellos aportan únicamente rigidez a la flexión y cero rigidez lateral (que hubiera interferido con el movimiento lateral de la estructura).

Durante análisis preliminares, se determinó que los bloques de adobe, eran muy rígidos, por lo que su módulo de elasticidad se incrementó en 20%, de 220 a 264 MPa. Este cambio se hizo en la definición del material. Se escaló la rigidez del adobe por diferentes factores en algunos modelos analíticos, para alterar su matriz de rigidez y lograr mayores desplazamientos.

Se generaron diferentes tamaños de malla que representaron distintas condiciones de anclaje a las cerchas para cada modelo analítico, la propiedad más importante del enmallado es la transmisión de fuerzas y esfuerzos al actuar como pequeños elementos interconectados, que finalmente se traslada en pequeñas porciones a los elementos frame a los que se conecta.

Los modelos analíticos fueron “soltando” los puntos medios de los vanos para que las cerchas tuvieran mayor libertad de movimiento y logran desplazamientos más amplios.

La Fig. 6.2 a) muestra el modelo experimental, enfocándolo desde la arista del MI y MA, este es el ángulo en que se mostrarán todos los modelos analíticos, también se puede apreciar la ubicación de dos instrumentos para la lectura del desplazamiento a nivel de entrepiso y techo al centro de cada muro. En 6.2 b) se observa el modelo experimental desde la arista del MD y MP, en la parte superior se distinguen las cerchas, la plancha de triplay y cómo estuvieron sujetos los costales de arena a nivel de entrepiso y techo.

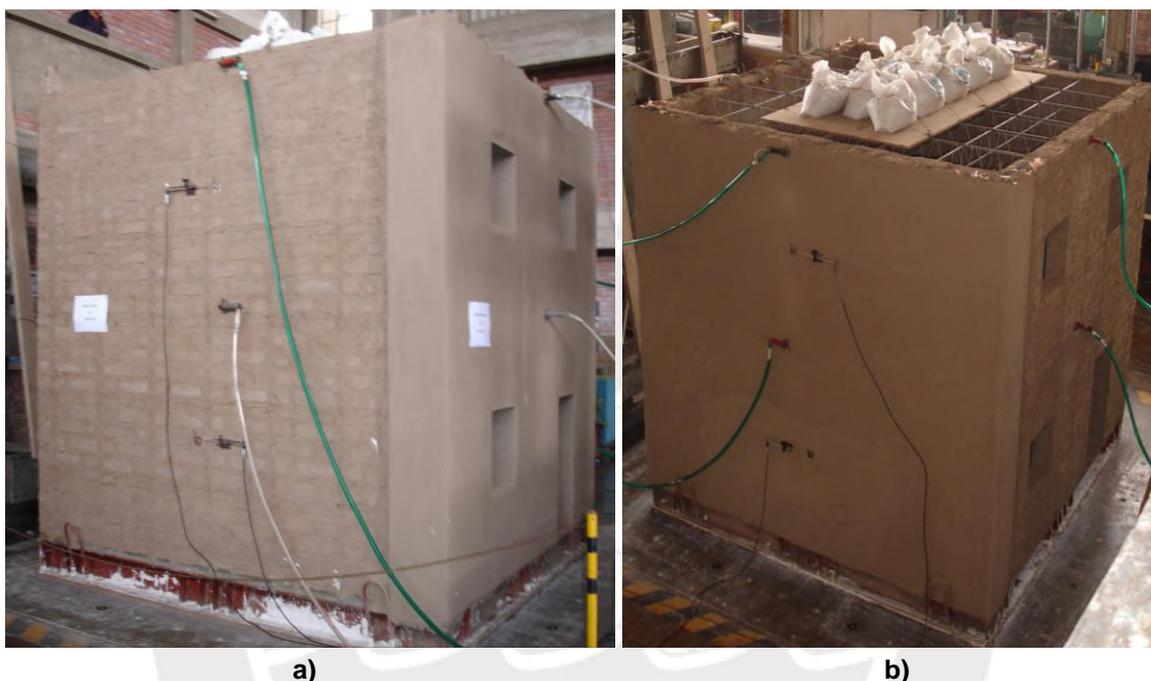


Fig. 6.2 a) Muestra MI y MA. b) Muestra MD y MP.

6.3 Modelos Analíticos

Utilizando las definiciones y características de los elementos estructurales, se elaboraron diversos modelos que trataron de reproducir el comportamiento observado en el laboratorio.

6.3.1 Modelo SAI CERCHAS TECHO.

Fue el primer modelo matemático elaborado. En él, se representaron las cerchas de entrepiso y techo modeladas con cerchas: una varilla superior e inferior equivalente a las dos varillas del modelo experimental y la varilla en zigzag debidamente fijada, simulando la soldadura. En los muros de la vivienda se representaron las cerchas verticales y horizontales mediante elementos frame con área e inercia equivalente tanto en el caso de cerchas individuales como en

las uniones de estos elementos en esquinas (cercha doble). Los bloques de adobe fueron idealizados como elementos shell thin, discretizados representando la misma cantidad de filas que el modelo sin juntas, a los que se asignaron las propiedades mecánicas de las unidades y pilas de adobe definidas en la sección 3.1.1 y el módulo de elasticidad asumido de 264 MPa. En cada punto de la base se asignaron restricciones en desplazamiento y giro en las tres direcciones, representando con ello el empotramiento al anillo de cimentación. En este primer intento, se colocó la sobrecarga en entrepiso y techo como carga uniformemente distribuida sobre las cerchas y se colocaron tirantes metálicos representando la capacidad restrictiva de las planchas de triplay.

En la Fig. 6.3, se muestra el modelo analítico generado y en la esquina inferior derecha, la discretización de elementos shell que representa a los bloques de adobe.

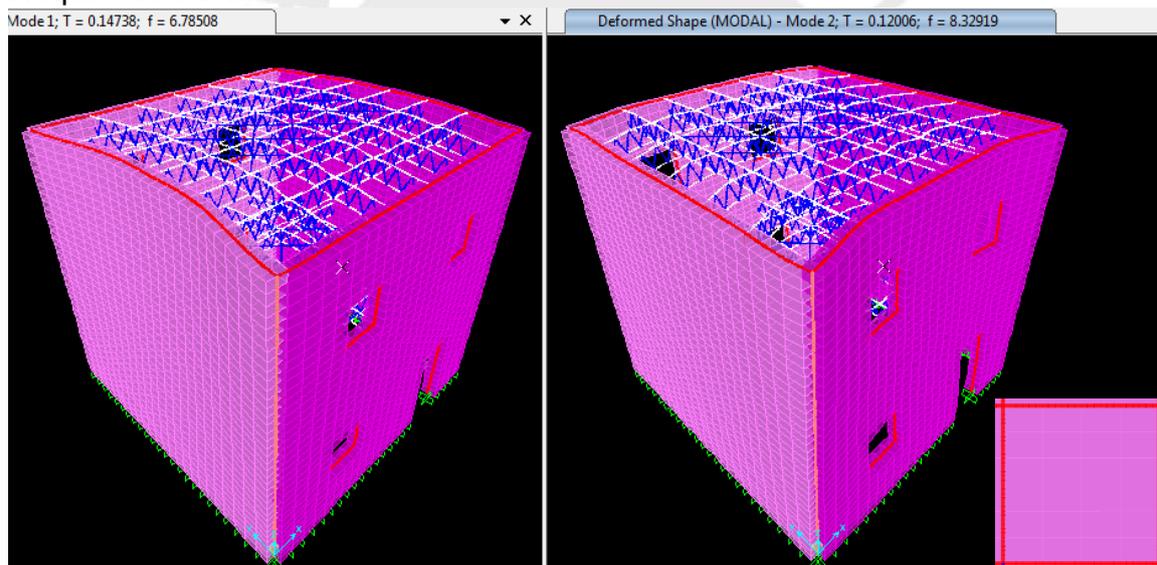


Fig. 6.3 Modelo SAI CERCHAS TECHO, cerchas en entrepiso y techo.

Se logró obtener períodos muy cercanos a los de MA y MD del modelo experimental. Los desplazamientos estaban en el orden de un centésimo del valor buscado, por lo que no se muestran gráficos de ellos. Se creó un modelo SAI CERTECHO MOD en el que se modificó la rigidez (factor de 0,00025 dirección del plano y perpendicular a éste) de los elementos shell, lográndose el desplazamiento máximo posible para este modelo. En las Fig. 6.4 6.5 y 6.6, se muestra el comportamiento del nuevo modelo y los desplazamientos logrados con esta variación.

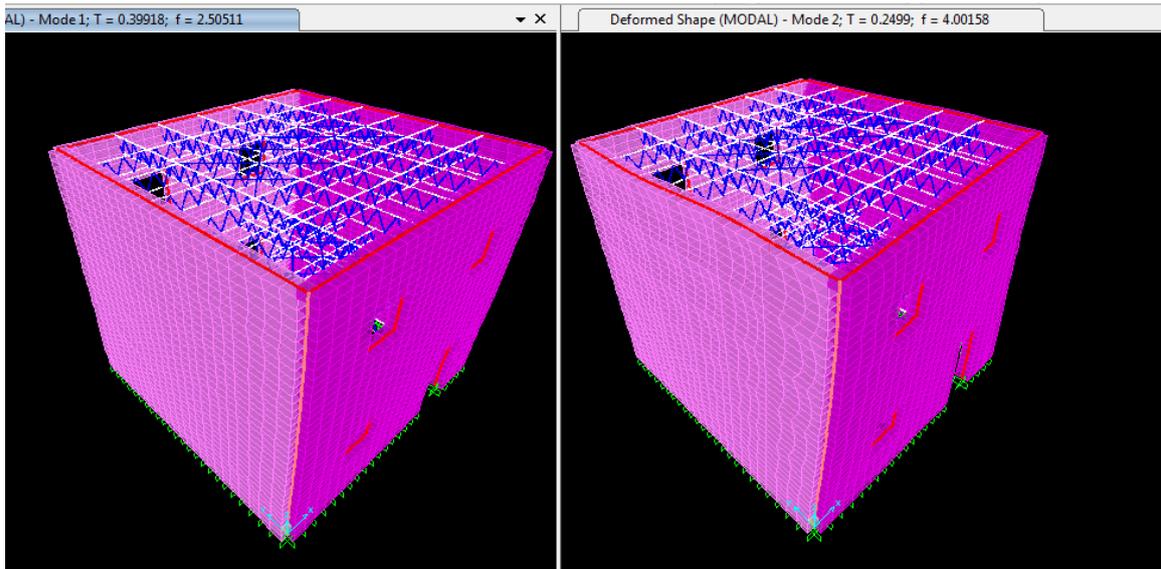


Fig. 6.4 Modelo SAI CERTECHO MOD, al asignarle un factor de 0,00025 a los bloques de adobe.

Gráfico Comparativo: Desplazamiento de Modelos Muro a Flexión

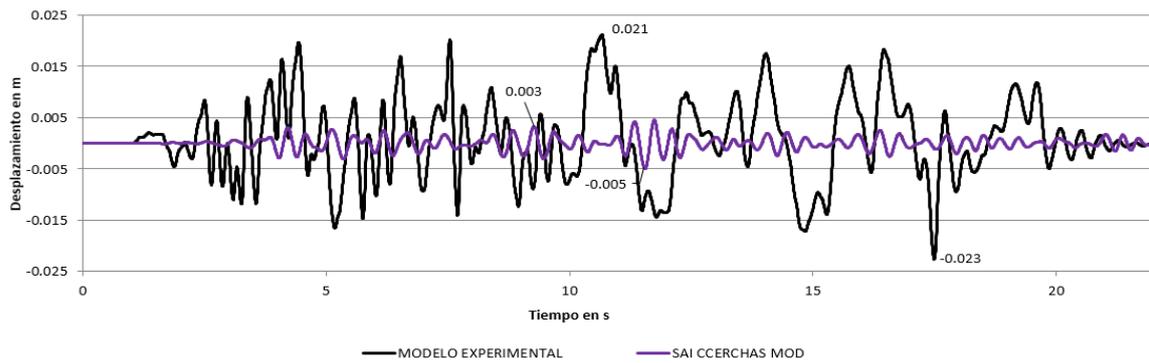


Fig. 6.6 Desplazamiento de MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI CERTECHO MOD.

Gráfico Comparativo: Desplazamiento de Modelos Muro en Corte

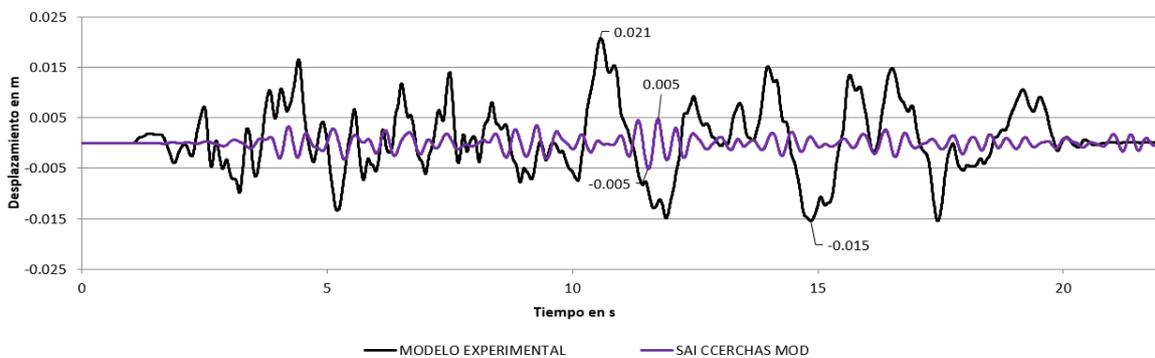


Fig. 6.5 Desplazamiento de MD (corte) a nivel de techo. Modelo experimental vs. SAI CERTECHO MOD

El período obtenido por SAI CERTECHO MOD fue prácticamente el doble del modelo experimental.

El desplazamiento logrado por SAI CERTECHO MOD alcanzó aproximadamente la cuarta parte del valor esperado.

Este modelo es muy rígido, lo que podría deberse a que el peso del anillo de cimentación y las planchas de triplay se han incluido como cargas uniformemente distribuidas sobre las cerchas de entrepiso y techo. Ya que no es aceptable, se generó un nuevo modelo.

6.3.2 Modelo SAI ADOBES SUJETOS

En este modelo matemático se representaron todas las cerchas verticales y horizontales de la vivienda mediante elementos frame con área e inercia equivalentes, tanto en el caso de cerchas individuales como en las uniones de estos elementos en esquinas con dos cerchas. Los bloques de adobe fueron idealizados como elementos shell thin, discretizados representando la misma cantidad de filas del modelo experimental sin juntas, con las propiedades mecánicas de las unidades y pilas de adobe definidas en la sección **3.1.1** y el módulo de elasticidad asumido de 264 MPa. En cada punto de la base se asignaron restricciones en desplazamiento y giro en las tres direcciones, representando con ello el empotramiento al anillo de cimentación. En este caso, para representar la sobrecarga en entrepiso y techo, se modelaron las planchas de triplay como elementos plate thick y el peso de los costales de arena se distribuyó uniformemente sobre toda su área.

En la **Fig. 6.7**, se muestra el modelo analítico generado, constituido en su totalidad por elementos frame equivalentes con planchas de triplay en entrepiso y techo. En el extremo inferior derecho se muestra un detalle del entramado de los elementos shell thin.

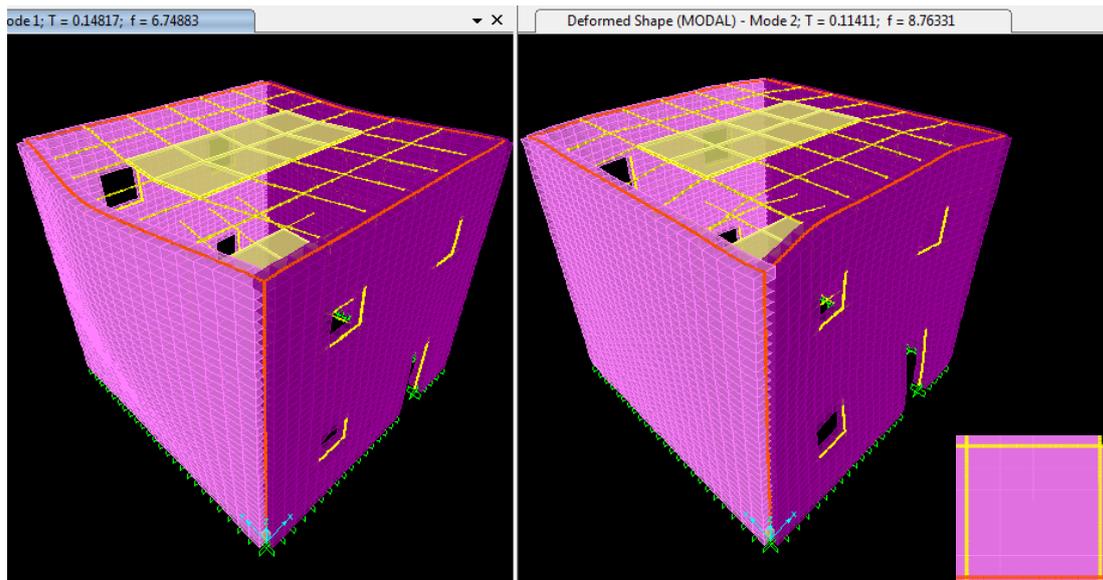


Fig. 6.7 Modelo SAI ADOBES SUJETOS, constituido por elementos frame equivalentes con planchas de triplay en entrepiso y techo.

Este modelo obtuvo períodos ligeramente inferiores a los de MA y MD del modelo experimental.

Los desplazamientos fueron menores al centésimo del valor buscado, por lo que no se muestran gráficas de ellos. En forma similar se creó SAI ADOSUJETOS MOD en el que se modificó la rigidez (factor de 0,005 en la dirección del plano y perpendicular a éste) de los elementos shell. En las Fig. 6.8, 6.9 y 6.10, se muestran tanto el comportamiento del nuevo modelo como los desplazamientos logrados con esta variación.

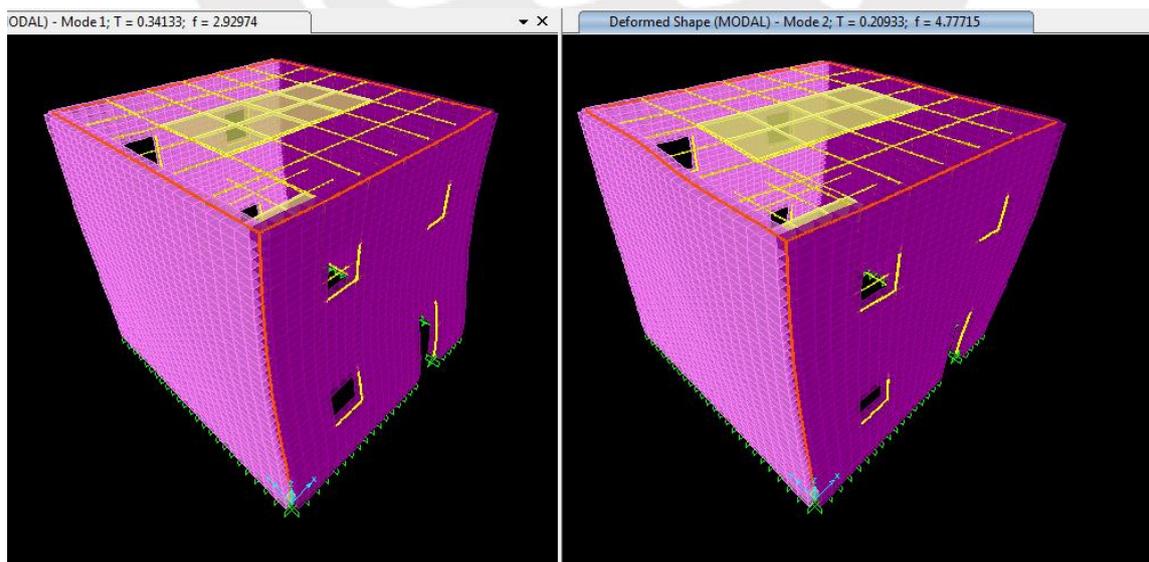


Fig. 6.8 Modelo SAI CERTECHO MOD, asignando un factor de 0,005 a los bloques de adobe.

Gráfico Comparativo: Desplazamiento de Modelos Muro a Flexión

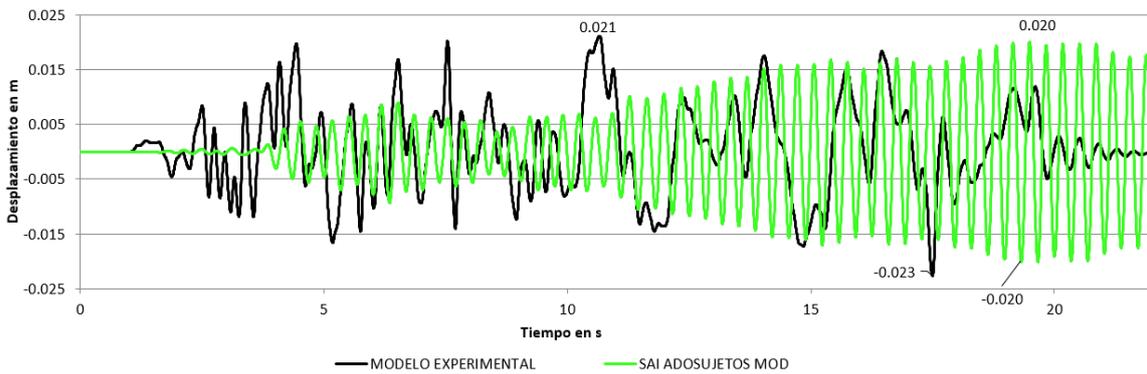


Fig. 6.10 Desplazamiento en MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI ADOSUJETOS MOD.

Gráfico Comparativo: Desplazamiento de Modelos Muro en Corte

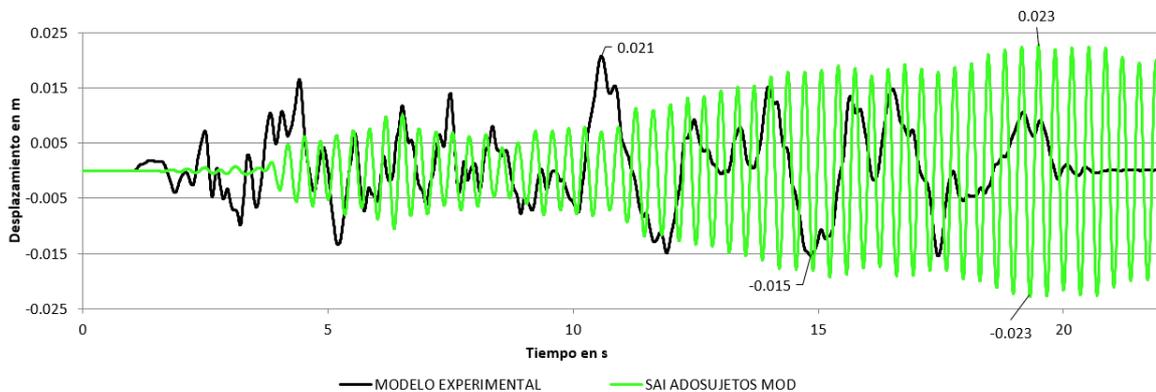


Fig. 6.9 Desplazamiento de MD (corte) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI ADOSUJETOS MOD.

Los períodos obtenidos por SAI ADOSUJETOS MOD fueron prácticamente el doble con respecto al modelo experimental.

El desplazamiento logrado por SAI ADOSUJETOS MOD alcanzó el valor de desplazamiento esperado.

Con el modelo SAI ADOSUJETOS MOD se obtuvo un desplazamiento máximo similar al del ensayo y el periodo representó con cierta exactitud las curvas del modelo. Sin embargo, se nota que la respuesta del modelo analítico es armónica y de longitud variable, debido a que domina el primer período de vibración, el modelo fue incapaz de reproducir el comportamiento deseado.

Se generaron modelos en los que se fueron “soltando” los bloques de sus marcos para determinar el grado de influencia de la rigidez aportada por los bloques de adobe en los marcos de cercha. Se consideró superado el

inconveniente de rigidez por exceso de sobre carga y se modificó únicamente la discretización de la malla de adobe y sus uniones con las cerchas.

6.3.3 Modelo SAI 4 PUNTOS.

En este modelo matemático se representaron todas las cerchas verticales y horizontales de la vivienda mediante elementos frame con área e inercia equivalentes tanto en el caso de cerchas individuales como cerchas dobles en las uniones de estos elementos en esquinas. Los bloques de adobe se idealizaron como elementos shell thin y fueron modelados como cuadriláteros irregulares del mismo tamaño y forma unidos al entramado de cerchas a través de cuatro puntos de contacto en las aristas. En cada punto de la base se asignaron restricciones en desplazamiento y giro en las tres direcciones, representando con ello el empotramiento al anillo de cimentación. Para representar la sobrecarga en entrepiso y techo, se colocaron planchas de triplay y el peso de los costales de arena se distribuyó uniformemente sobre ellas.

En la Fig. 6.11, se muestra el modelo analítico generado y en la esquina inferior derecha un detalle de la discretización de elementos shell que representan a los bloques de adobe.

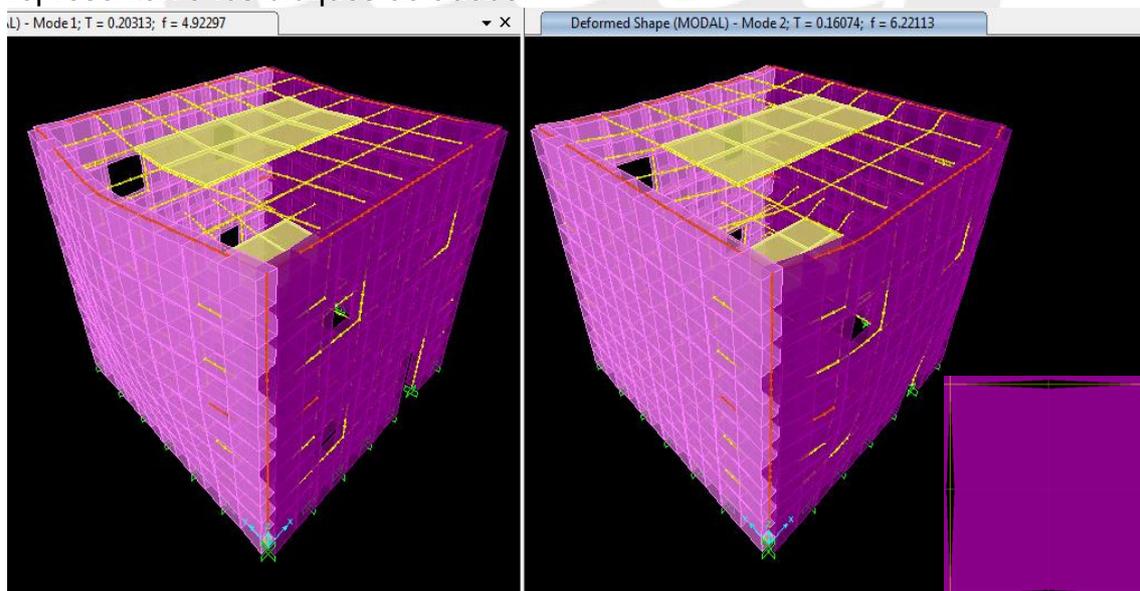


Fig. 6.11 Modelo SAI 4 PUNTOS, bloques de cuatro adobes unidos en las aristas de las cerchas.

Se lograron períodos 25% mayores que los esperados, nuevamente los desplazamientos fueron muy pequeños (1/50 de la amplitud requerida), por lo que no se muestran gráficos de ellos. Se creó SAI 4PTOS MOD en el que se modificó la rigidez (factor de 0,0043 en la dirección del plano y perpendicular a éste) de los elementos shell, con ello se logró el desplazamiento máximo posible para este modelo el cual prácticamente iguala los valores de desplazamiento buscados. En las Fig. 6.12, 6.13 y 6.14, se muestran tanto el comportamiento del nuevo modelo como los desplazamientos logrados con esta variación.

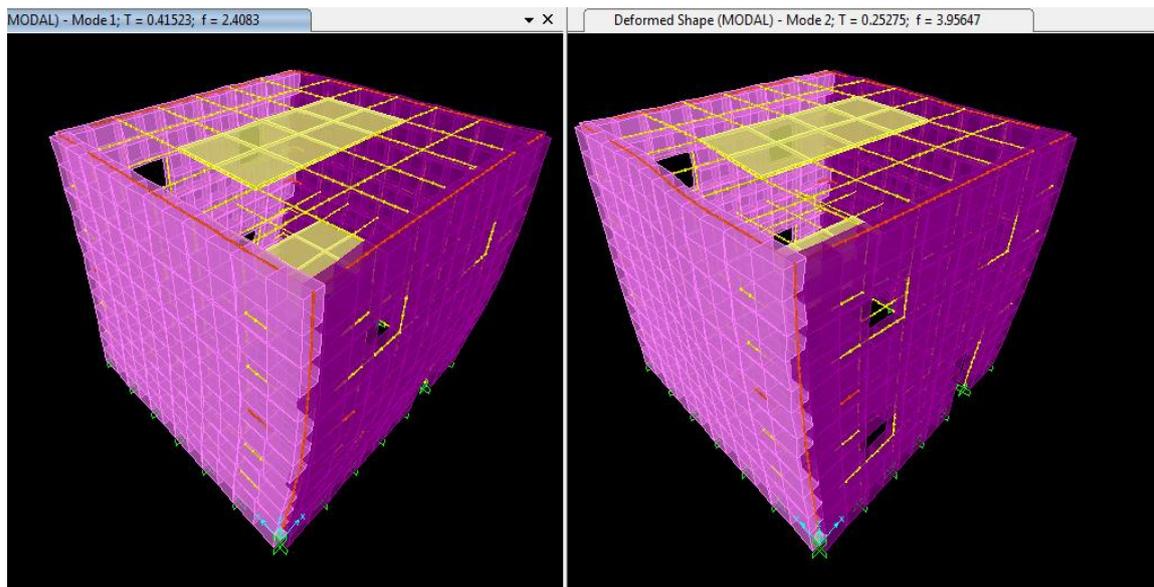


Fig. 6.12 Modelo SAI 4PTOS MOD, con factor de 0,0043 en los bloques de adobe.

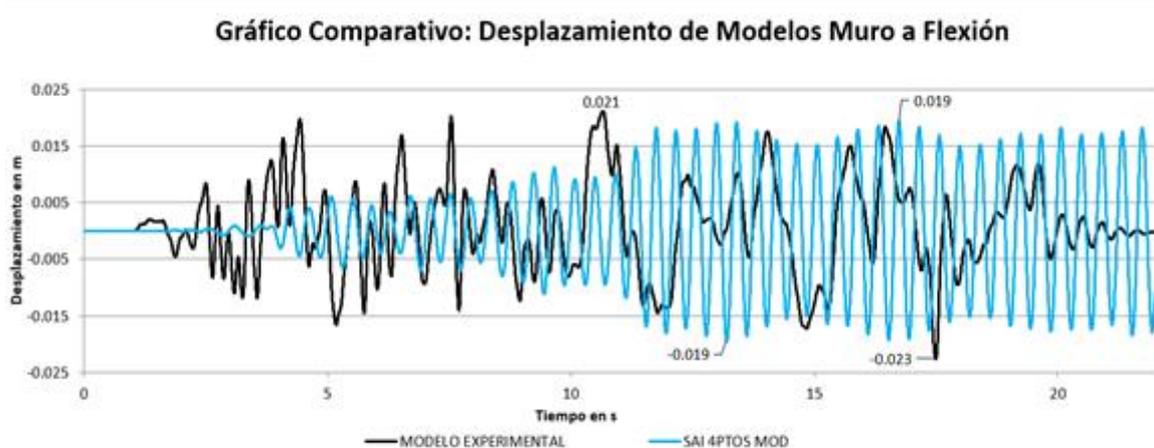


Fig. 6.13 Desplazamiento en MD (corte) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI 4PTOS MOD.

Gráfico Comparativo: Desplazamiento de Modelos Muro en Corte

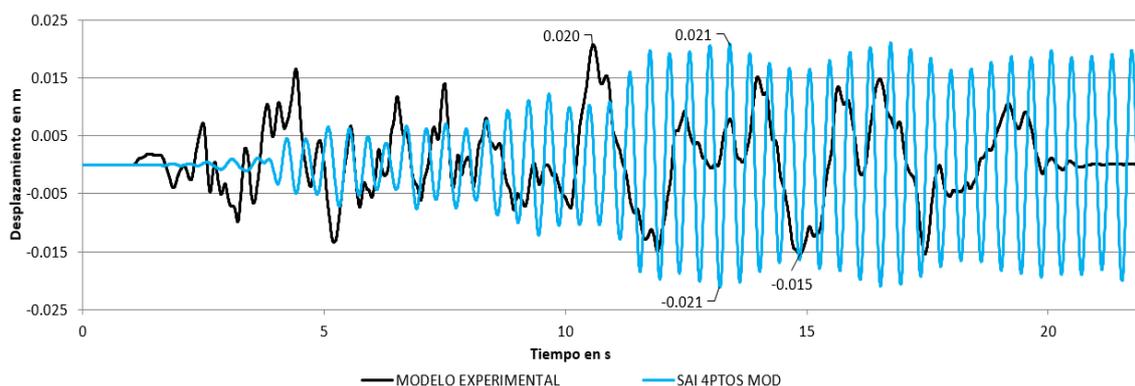


Fig. 6.14 Desplazamiento de MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI 4PTOS MOD.

Los períodos obtenidos por SAI 4PTOS MOD fueron 2,5 veces el valor del modelo experimental.

El desplazamiento logrado por SAI 4PTOS MOD alcanzó el valor de desplazamiento esperado.

Aunque el período fue razonablemente similar y la amplitud logró los valores deseados, la forma de la gráfica fue diferente. Sin embargo, se podría decir que es la mejor aproximación que se puede lograr. Este modelo capta mejor el comportamiento después de los 10 s, cuando la estructura se ha dañado.

Se decidió verificar dos modelos más: uno con los adobes solamente unidos a la base de las cerchas y otro sin adobes.

6.3.4 Modelo SAI SOLO BASE.

En este modelo numérico se representaron todas las cerchas de entrepiso, techo, verticales y horizontales de la vivienda mediante elementos frame con inercia y módulo de elasticidad equivalentes tanto en el caso de cerchas individuales como cerchas dobles en las uniones de estos elementos en esquinas. Los adobes fueron idealizados como elementos shell thin y fueron modelados como rectángulos del tamaño de un vano, dejando espacios de un mm a los lados y en la parte superior, unidos al entramado de cerchas solamente en la base. La primera fila de unidades de albañilería se sujetó a las bases metálicas. En las aristas de los muros se generaron restricciones de desplazamiento vertical ya que los adobes están por debajo de los marcos de

cerchas. En cada punto de la base se asignaron restricciones en desplazamiento y giro en las tres direcciones, representando con ello el empotramiento al anillo de cimentación. Para representar la sobrecarga en entrepiso y techo, se colocaron planchas de triplay y el peso de los costales de arena se distribuyó uniformemente sobre ellas. La Fig. 6.15, muestra el modelo analítico generado y en la esquina inferior derecha un detalle de la inclusión de elementos shell sin dividir que representan al bloque de adobes. Las Fig. 6.16 y 6.17 muestran las gráficas Desplazamiento vs. Tiempo.

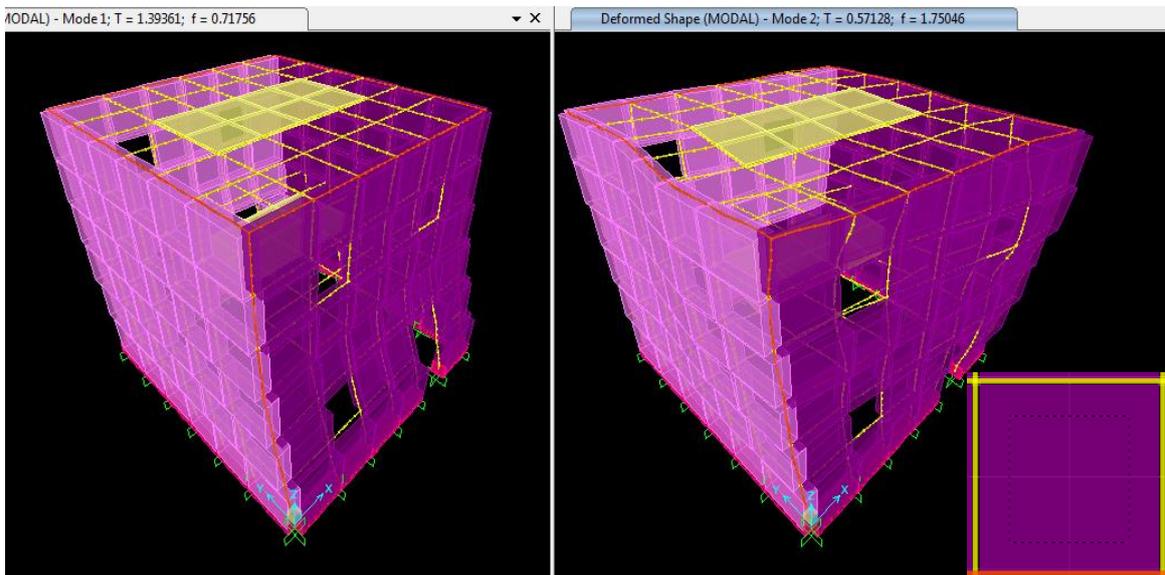


Fig. 6.15 Modelo SAI SOLO BASE, con un bloque de adobe unido a la base en cada vano.

Gráfico Comparativo: Desplazamiento de Modelos Muro a Flexión

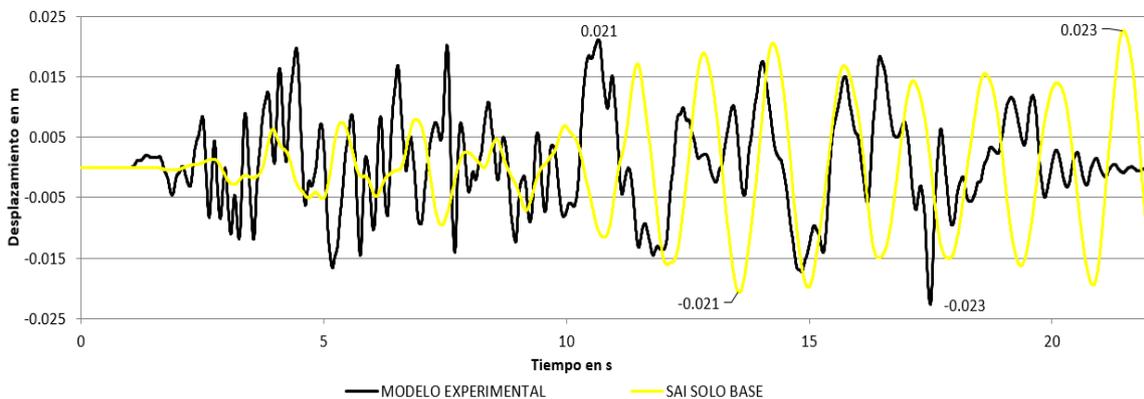


Fig. 6.16 Desplazamiento de MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI SOLO BASE.

Gráfico Comparativo: Desplazamiento de Modelos Muro en Corte

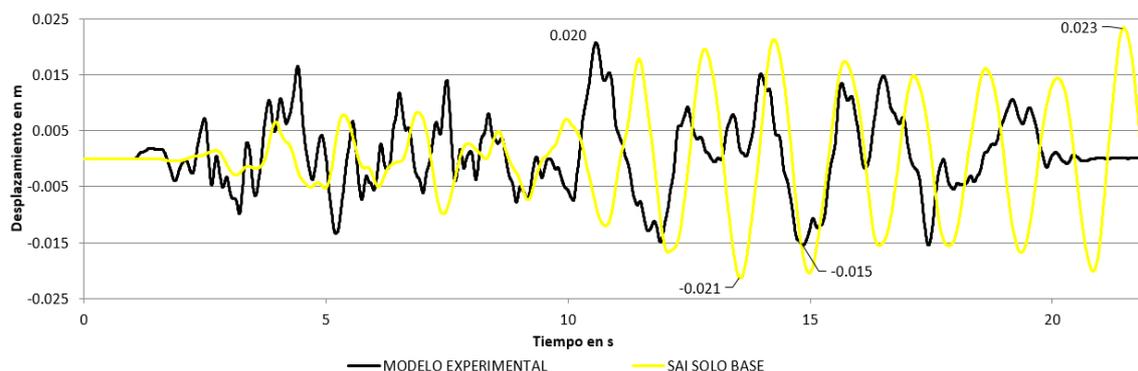


Fig. 6.17 Desplazamiento en MD (corte) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI SOLO BASE.

Los períodos obtenidos por SAI SOLO BASE fueron casi 9 veces los del modelo original.

El desplazamiento logrado por SAI SOLO BASE superó el valor de desplazamiento esperado.

Este modelo alcanzó el desplazamiento requerido pero tuvo períodos muy altos, la estructura es muy flexible, lo cual se debe probablemente al movimiento de los adobes colocados en las cerchas más altas, que incrementan el desplazamiento pero también amplían el período.

Se generó un último modelo de la estructura sin adobes.

6.3.5 Modelo SAI SOLO CARGAS.

En este modelo matemático se representaron todas las cerchas de entrepiso, techo, verticales y horizontales de la vivienda mediante elementos frame con inercia y módulo de elasticidad equivalentes tanto en el caso de cerchas individuales como cerchas dobles en las uniones de estos elementos en esquinas. Los adobes no se incluyeron, se asignó carga distribuida sobre las cerchas horizontales equivalente al peso de estos elementos. Se aplicaron restricciones de desplazamiento vertical en las aristas de los muros, ya que no se colocaron los adobes. En cada punto de la base se restringió el desplazamiento y giro en las tres direcciones, representando con ello el empotramiento al anillo de cimentación. Para representar la sobrecarga en

entrepiso y techo, se colocaron planchas de triplay y el peso de los costales de arena se distribuyó uniformemente sobre ellas.

En la Fig. 6.18, se muestra el modelo analítico generado y en la esquina inferior derecha un detalle de las cerchas libres que caracterizan este modelo.

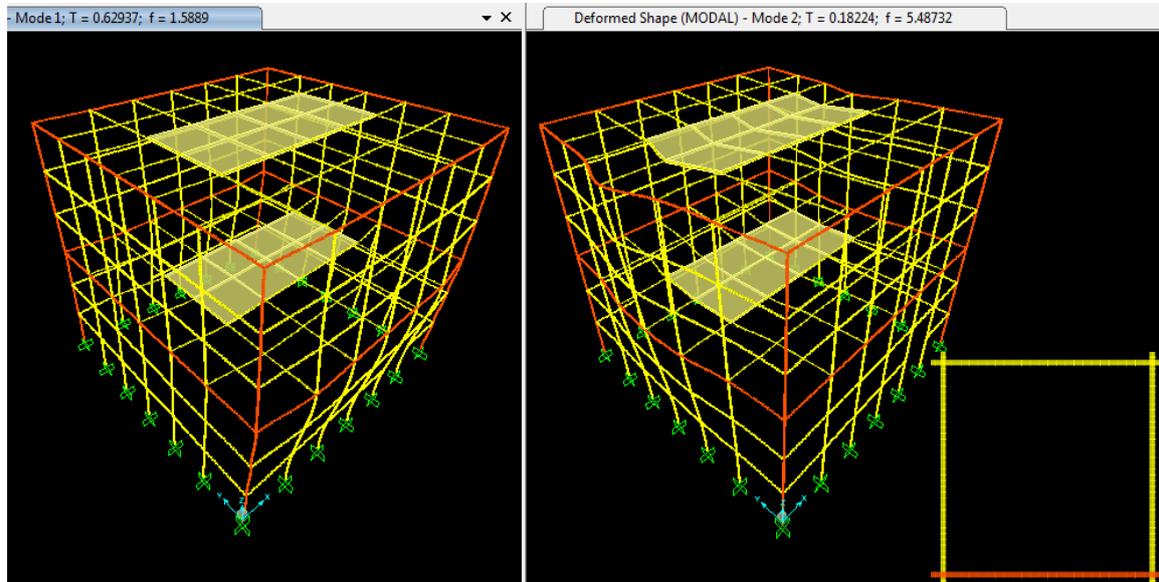


Fig. 6.18 Modelo SAI SOLO CARGA, constituido en su totalidad por elementos frame equivalentes con planchas de triplay en entrepiso y techo.

En la Fig. 6.19, se muestra el desplazamiento del punto central a la altura del techo del MA, comparado con el desplazamiento registrado por el instrumento en posición análoga el día del ensayo.

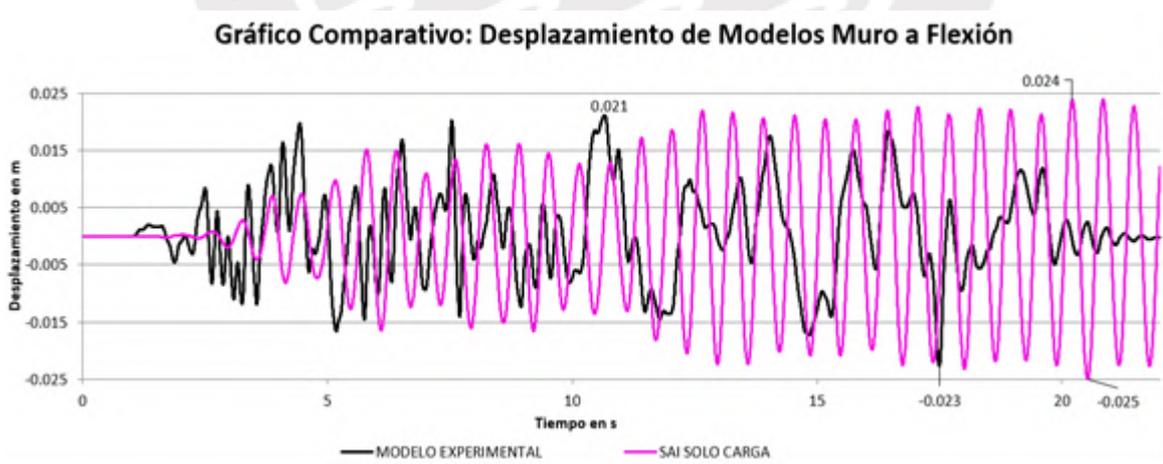


Fig. 6.19 Desplazamiento de MA (flexión) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI SOLO CARGA.

En la Fig. 6.20, se muestra el desplazamiento del punto central a la altura del techo del MD, comparado con el desplazamiento registrado por el instrumento en posición análoga el día del ensayo.

Gráfico Comparativo: Desplazamiento de Modelos Muro en Corte

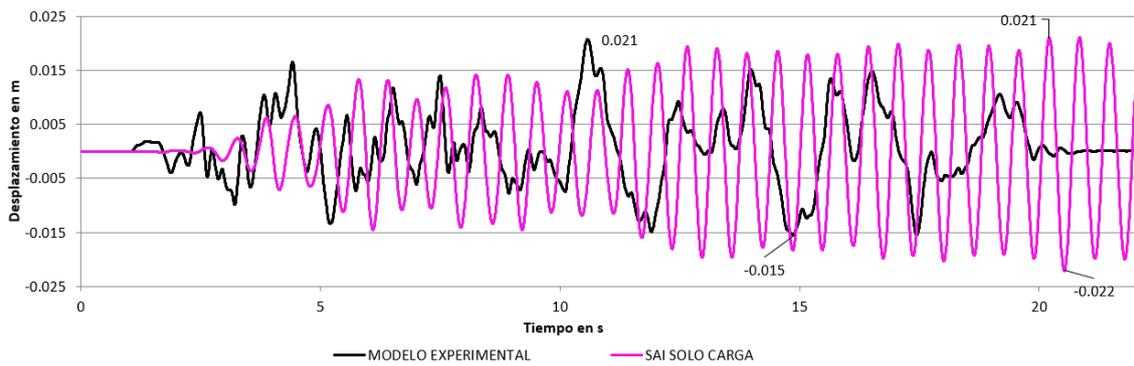


Fig. 6.20 Desplazamiento en MD (corte) a nivel de techo, modelo experimental vs. modelo SAI SOLO BASE.

Los períodos obtenidos por SAI SOLO CARGA fueron casi 4 veces los del modelo original, es un modelo demasiado flexible.

El desplazamiento logrado por SAI SOLO CARGA superó el valor de desplazamiento esperado.

Este modelo superó el desplazamiento requerido pero tuvo períodos muy altos, la estructura es muy flexible, lo cual se debe a la falta de bloques de adobe.

La **Tabla 6.1**, muestra los datos de interés del modelo experimental y los obtenidos de los modelos matemáticos que sirvieron para determinar la precisión y validez de los mismos.

Tabla 6.1 Tabla resumen de datos principales de los modelos analíticos.

MODELO	PERÍODO MURO		PESO ESTRUCTURA (kN)	SOBRE CARGA (kN)	MÁXIMO DESPLAZAMIENTO MURO		OBSERVACIONES
	FLEXIÓN (s)	CORTE (s)			FLEXIÓN (mm)	CORTE (mm)	
MODELO EXPERIMENTAL	0,16	0,13	94,71	7,64	-22,66	20,72	Datos del modelo de ensayo PUCP 2008.
SAI CERTECHO MOD	0,39	0,25	85,35	17,75	-4,95	-5,17	Período razonablemente similar, desplazamiento sólo alcanza el 25% del valor esperado. No representa al modelo.
SAI ADOSUJETOS MOD	0,34	0,20	93,29	7,75	-22,80	20,10	Período razonablemente similar, desplazamiento alcanza el valor esperado. Forma del desplazamiento se aproxima a comportamiento armónico, no describe con suficiente exactitud al modelo.
SAI 4PTOS MOD	0,41	0,25	92,80	7,64	-19,50	-21,20	Período razonablemente similar, desplazamiento alcanza el valor esperado. Forma del desplazamiento se aproxima al modelo después de los 10s. No es exacto pero es la mejor aproximación.
SAI SOLO BASE	1,39	0,57	92,21	7,75	22,90	23,10	Período demasiado alto, supera el desplazamiento requerido. El modelo es demasiado flexible, no representa el comportamiento del modelo.
SAI SOLO CARGA	0,63	0,18	9,91	92,75	-25,02	-22,30	Período mayor al del modelo, supera ligeramente el desplazamiento requerido. El modelo es demasiado flexible, no representa el comportamiento del modelo.

Los modelos analíticos presentados son linealmente elásticos, sin embargo, el modelo experimental es altamente no lineal, por lo tanto, la estructura no refleja el comportamiento observado y tan sólo se puede aproximar a él.

Ninguna de las estructuras logra captar en su totalidad los dos requisitos: frecuencias y amplitud del modelo experimental, no obstante el modelo SAI 4PTOS MOD es el más razonable y representa mejor el comportamiento buscado, además de ser modelo relativamente sencillo de elaborar y por sus simplificaciones requiere también un bajo costo computacional.

Queda pendiente el desarrollo de una investigación con modelos no lineales para determinar si es posible lograr una mejor predicción del modelo experimental.

7. Conclusiones y Recomendaciones

1. El modelo experimental fue capaz de resistir el movimiento sísmico catastrófico sin presentar colapso o daño estructural irreparable, por tanto se puede afirmar que el refuerzo con SAI podría contribuir efectivamente con la reducción de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de hasta dos pisos y se recomienda su uso.

2. Con respecto al deterioro producido en la vivienda, la mayor cantidad de daño en los bloques de adobe se presentó en el primer piso del MD (tarrajeado), a la altura de los vanos en MP y MI (ambos sin tarrajeo) y en los conjuntos verticales de medias unidades asentados en todas las aristas. En cuanto a las cerchas, se produjeron deformaciones en los vanos de puertas y ventanas del primer piso del MP que carece de tarrajeo. El MA permaneció casi intacto.

3. Como parte del procesamiento de datos se elaboraron los gráficos Desplazamiento vs. Tiempo y Aceleración vs. Tiempo utilizando el registro de los instrumentos de medición colocados en el modelo. Se observó que tanto MA como MD presentaron un comportamiento cuya amplitud se incrementa con el daño estructural de la vivienda. El tarrajeo contribuyó a un mejor desempeño de estos elementos. Tanto los desplazamientos como las aceleraciones del MA tuvieron mayores amplitudes que los del MD, esto indica que los muros a flexión fueron los más afectados por el movimiento sísmico.

4. Con respecto a las gráficas de Desplazamiento Relativo vs. Tiempo, para los cuatro instrumentos colocados a los muros en corte, el MD no presentó desplazamiento relativo significativo, sus valores fueron inferiores a 1 mm, en cambio el MI tuvo desplazamientos de casi 5 mm en el primer piso durante la Fase IV. Aunque es un valor bastante pequeño, sirvió para confirmar el desprendimiento de los bloques contiguos dentro de las cerchas.

5. Los lazos de histéresis mostraron una tendencia definida y el comportamiento dentro del rango elástico de los muros durante la Fase I; en ellos se indicó la rigidez de cada elemento como la pendiente de su línea de

tendencia. A partir de la Fase II el comportamiento de los lazos del MD fue errático y bastante disperso, el elemento actuó en el rango inelástico. Se observó también que el MD (corte) tuvo mejor desempeño que el MA (flexión) permaneciendo en el rango elástico hasta la Fase II.

6. Otra parte del procesamiento de datos fue la caracterización del comportamiento dinámico de la estructura para lo cual se determinaron los períodos y frecuencias trabajando en el dominio del tiempo y el amortiguamiento de cada elemento empleando el método de decremento logarítmico para la respuesta de los elementos en vibración libre.

7. Los muros a flexión MA y MP tuvieron un incremento en el período y decremento en la frecuencia, consistente con el daño estructural que experimentaron. El MD experimentó disminución y luego incremento en el período y el MI presentó valores inconsistentes con el deterioro mostrado.

8. Con referencia al amortiguamiento, el MA, MP y MD presentaron una disminución poco significativa de este valor, inconsistente con el daño presentado, en el MI el amortiguamiento se incrementó de manera consistente con el daño observado.

9. La búsqueda de un modelo numérico que representara adecuadamente el modelo de ensayo, generó el desarrollo de cinco aproximaciones. En primer lugar se representó con la mayor exactitud el comportamiento de las cerchas de acero al generar barras circulares equivalentes y luego se intentó determinar el grado de interacción entre los bloques de adobe y las estructuras metálicas, así como una buena aproximación de la elasticidad y rigidez de este material.

10. Los modelos SAI CERCHAS TECHO, SAI ADOBES SUJETOS y SAI 4 PUNTOS, fueron bastante acertados al replicar el período de la estructura pero demasiado rígidos en cuanto a la magnitud del desplazamiento a nivel de techo, por lo cual no se presentó sus gráficos de desplazamiento y se utilizaron solamente como base para generar nuevos modelos con modificadores de rigidez de los bloques de adobe.

11. El modelo SAI CERTECHO MOD, logró período y forma de desplazamiento similares al modelo experimental, pero su amplitud fue apenas el 25% de lo esperado, ello indicó que es demasiado rígido y la malla es demasiado menuda además de estar excesivamente unida a las cerchas. Así mismo el peso del anillo de cimentación las planchas de triplay debieron incluirse en el modelo y no colocarse como sobre carga.

12. El modelo SAI ADOBES SUJETOS, logró representar el período y amplitud del desplazamiento de manera bastante cercana pero la forma del desplazamiento se aproximó a la de un movimiento armónico, mostrando predominancia del primer modo de vibración de la estructura y que se ha forzado demasiado la respuesta.

13. El modelo SAI 4PTOS MOD, logró representar el período, amplitud y forma de desplazamiento de manera más razonable, más que todo después de los 10 s de iniciado el movimiento sísmico, con la estructura ya dañada.

14. El modelo SAI SOLO BASE, excedió la amplitud del desplazamiento y tuvo un período muy grande, lo que indicó que es una aproximación muy flexible y que los bloques de adobe unidos por su base a las cerchas incrementaron los desplazamientos y contribuyeron a flexibilizar la estructura.

15. El modelo SAI SOLO CARGAS, se aproximó a la amplitud de desplazamiento requerida pero excedió el período, resultando también demasiado flexible, lo cual confirmó que existe interacción entre los bloques de adobe y las cerchas, que no puede ignorarse.

16. Ninguna estructura modelada captó todas las características de la respuesta del modelo experimental. El modelo matemático SAI 4PTOS MOD, es el más razonable para la respuesta del Desplazamiento vs. Tiempo.

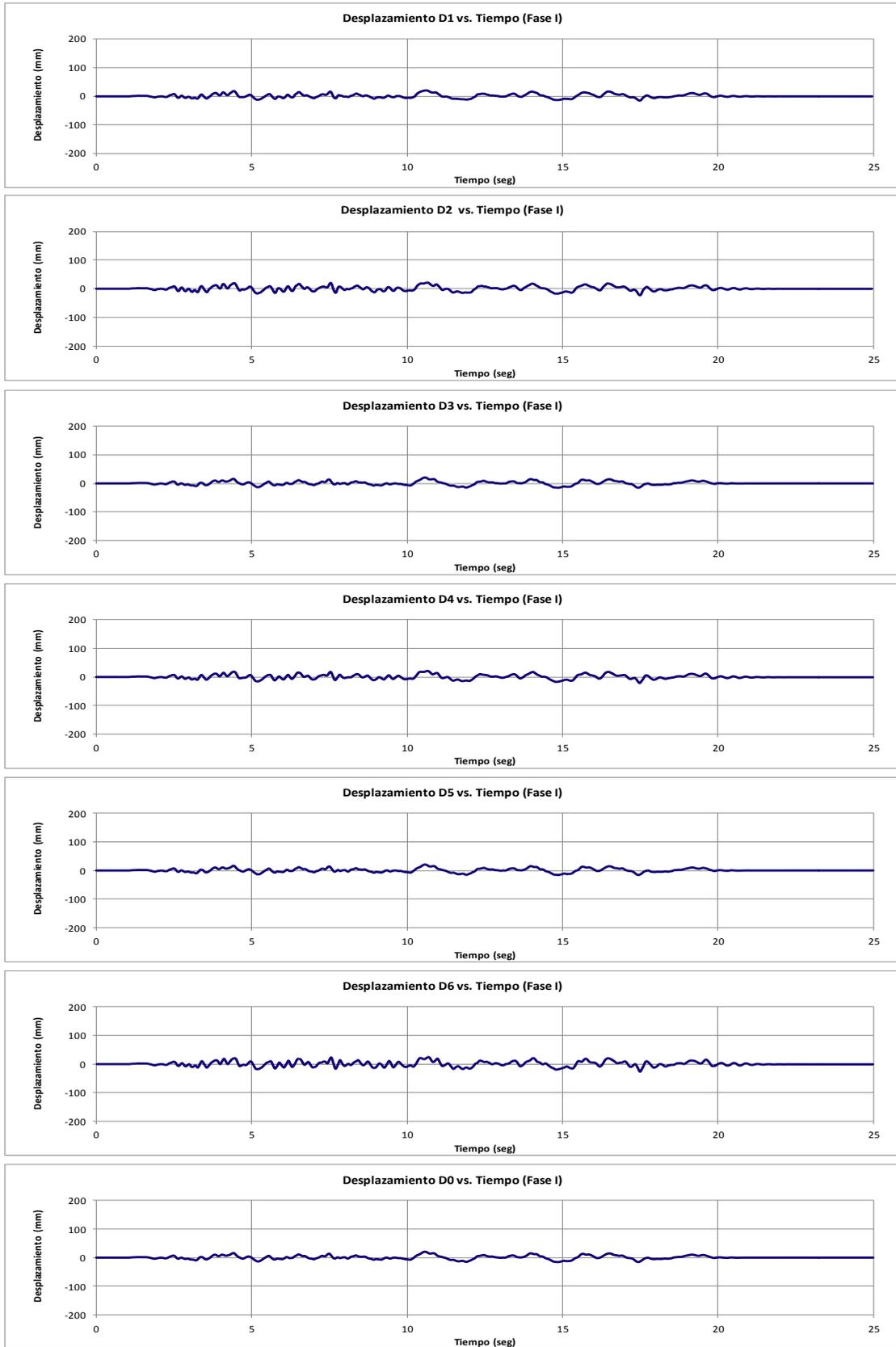
17. La diferencia entre las respuestas del modelo experimental y los modelos matemáticos se debió a que se está tratando de modelar una estructura altamente no lineal con un modelo linealmente elástico; el comportamiento del adobe es muy complejo debido al daño que sufre al someterlo a movimientos sísmicos.

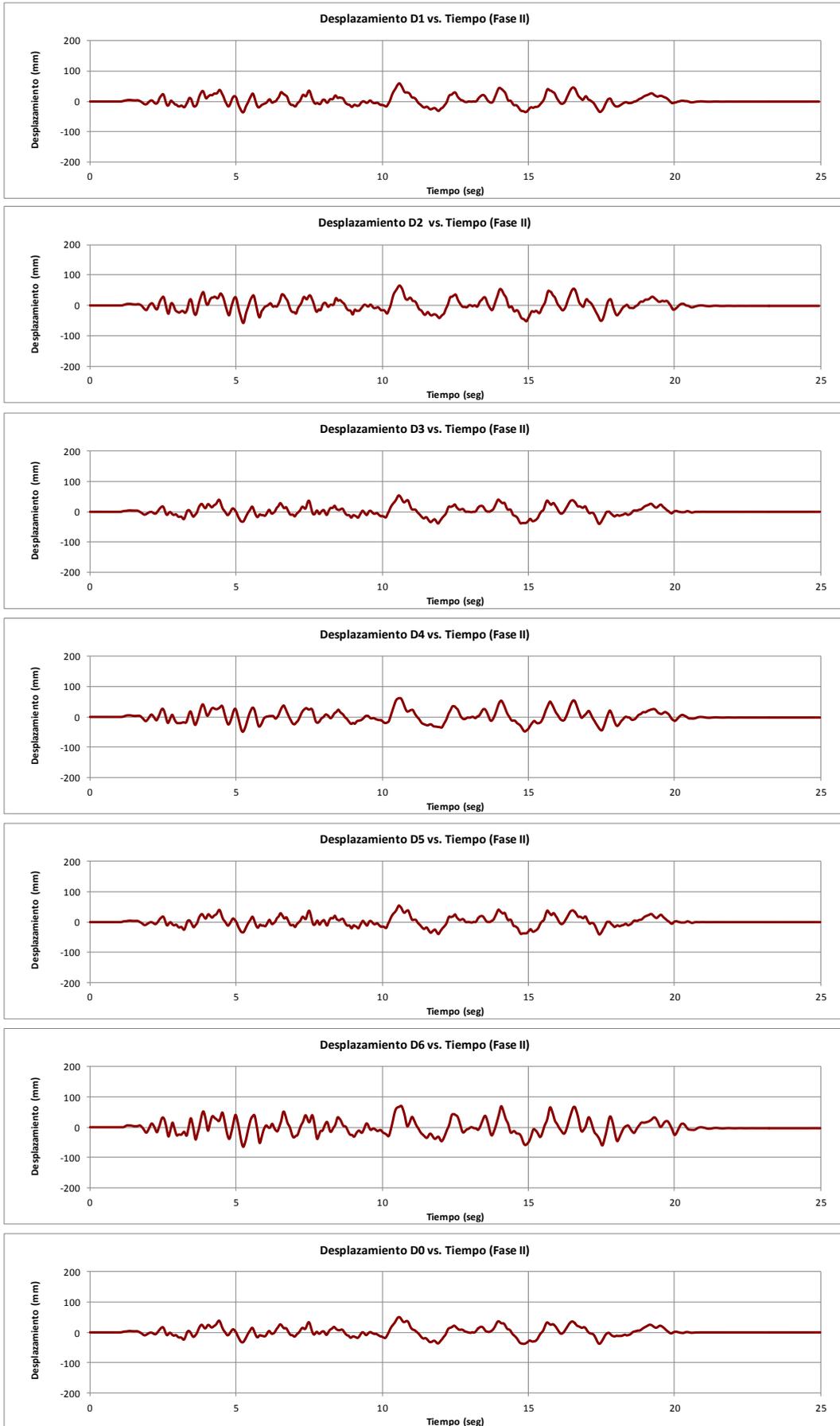
18. Se sugiere como línea de investigación futura, trabajar con modelos no lineales para ver si se puede lograr una predicción más exacta del modelo experimental.

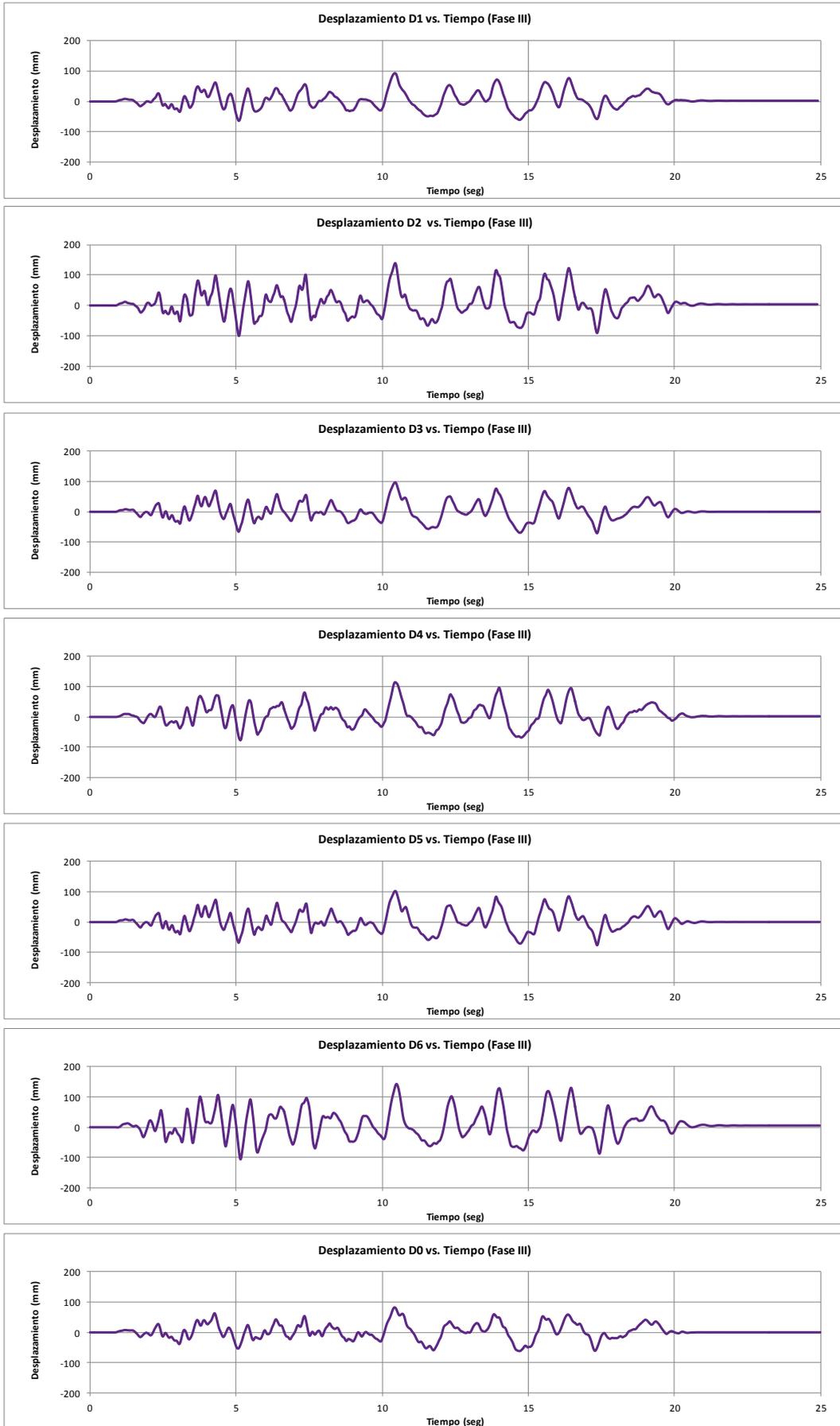


8. Anexos.

Fig. 8.1 GRÁFICAS DE DESPLAZAMIENTO ABSOLUTO vs. TIEMPO PARA TODOS LOS INSTRUMENTOS Y CADA FASE DE ENSAYO







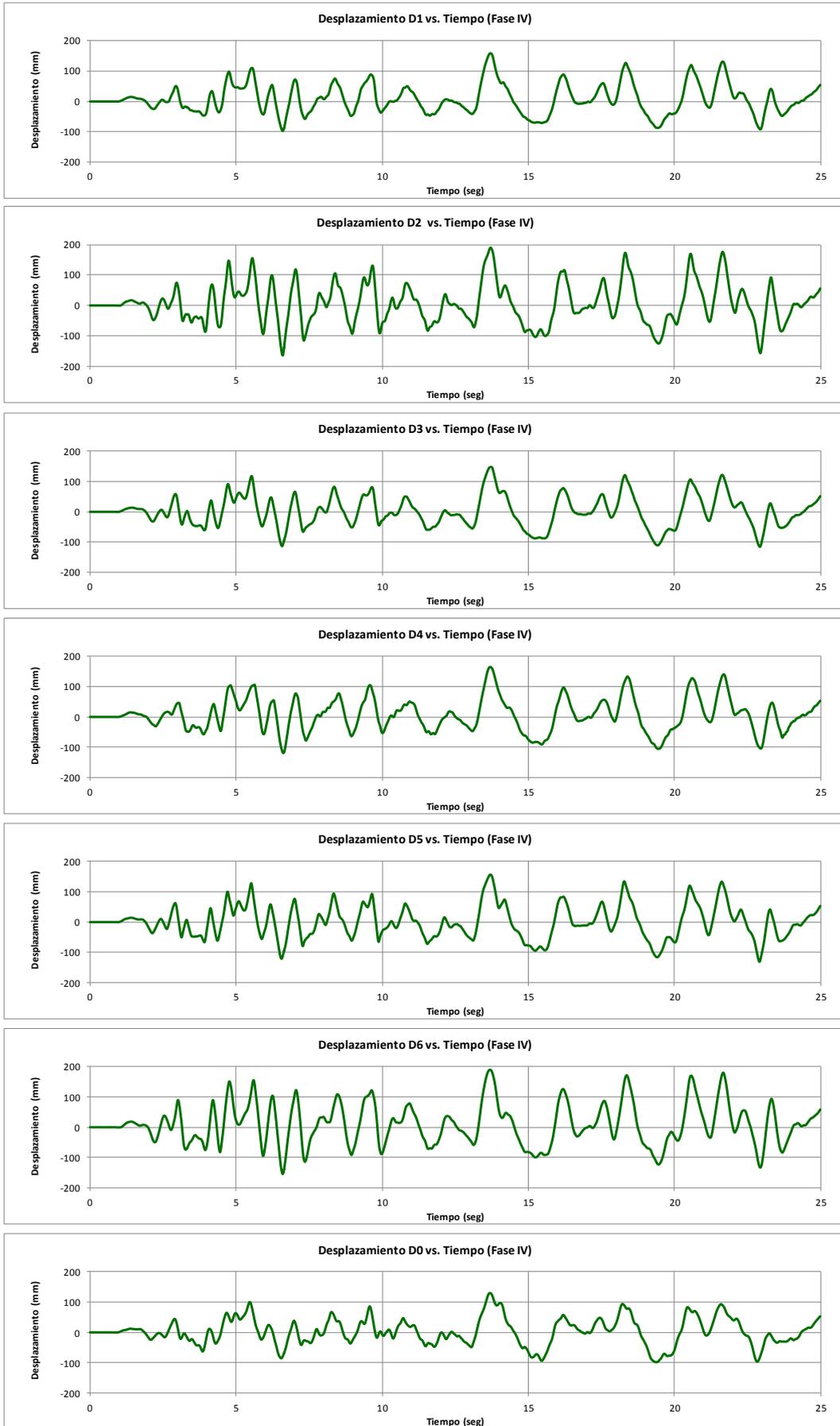
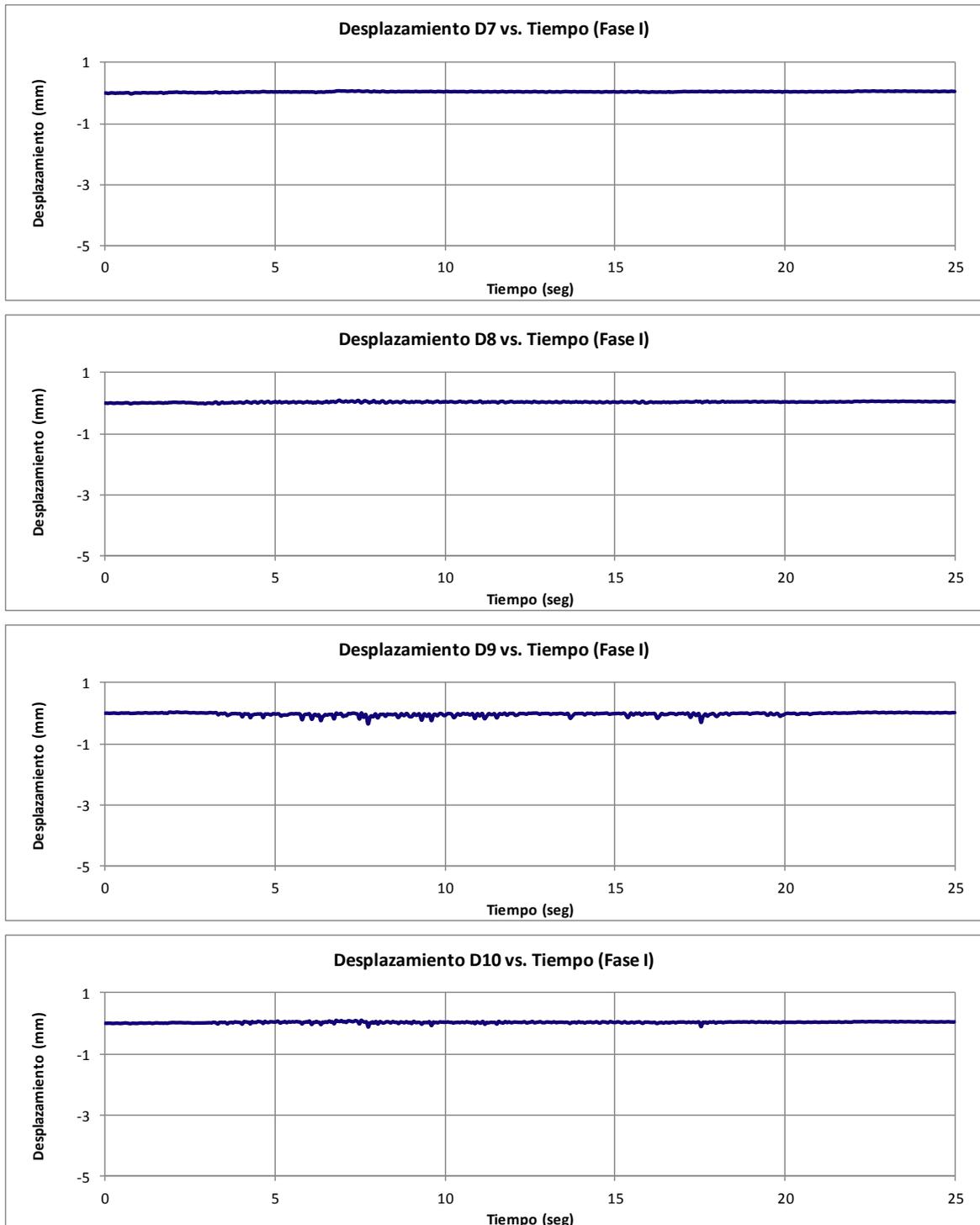
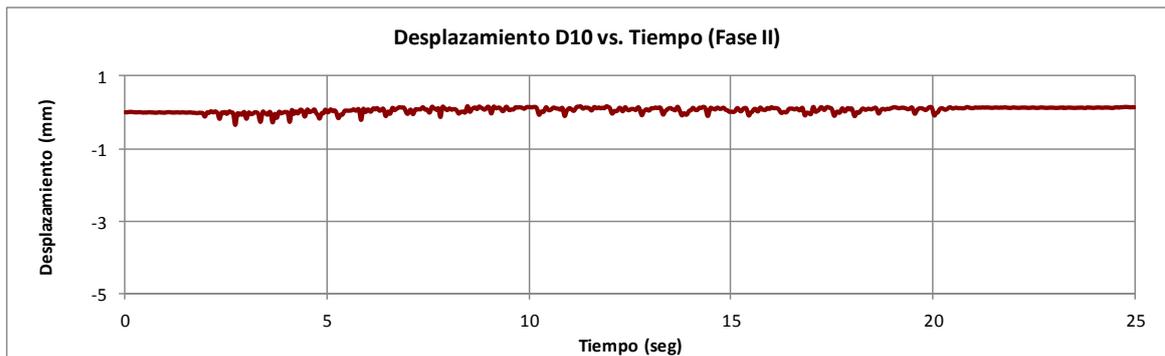
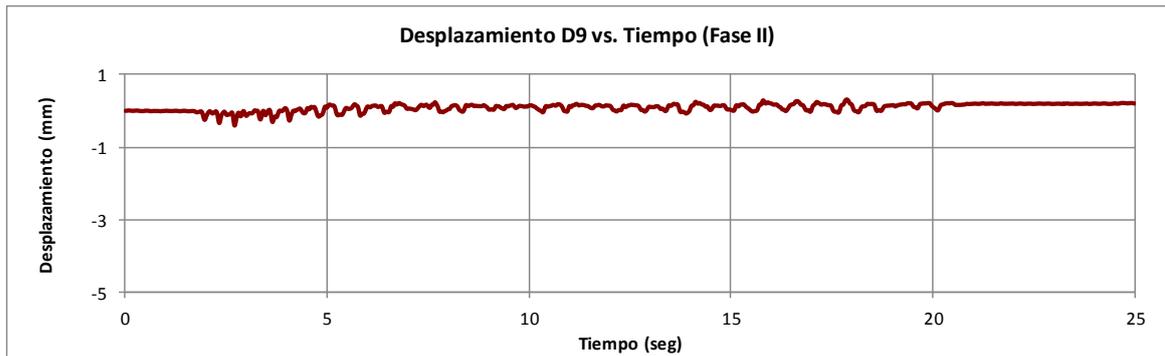
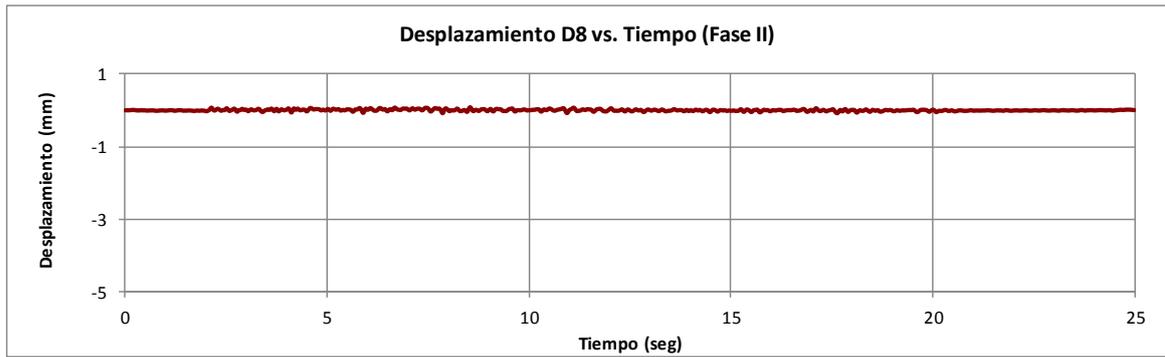
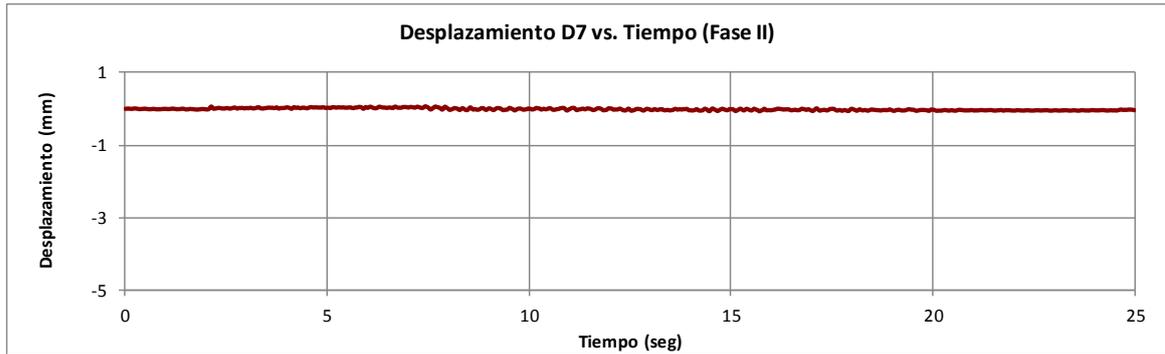
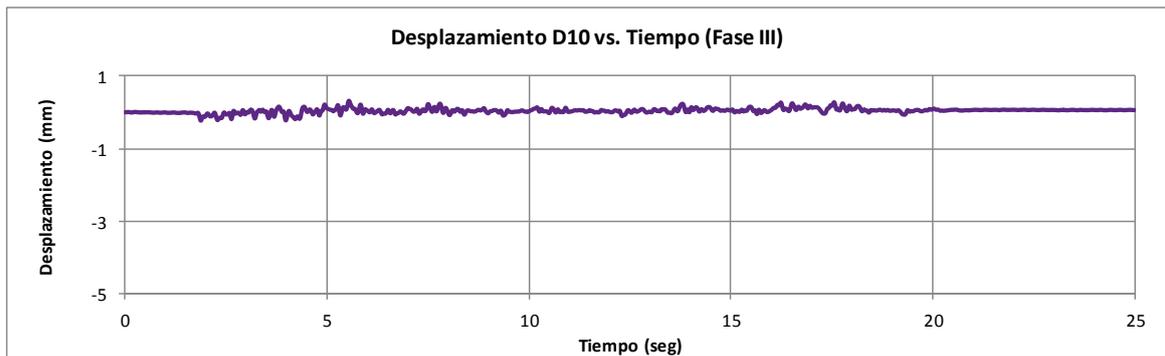
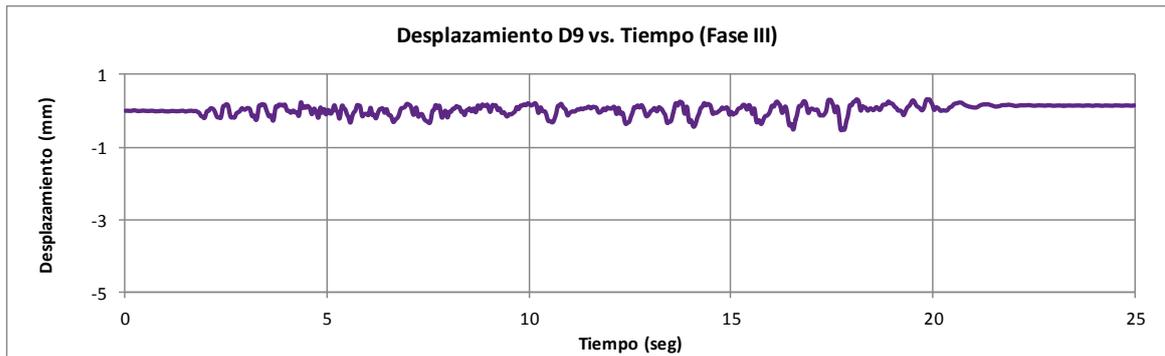
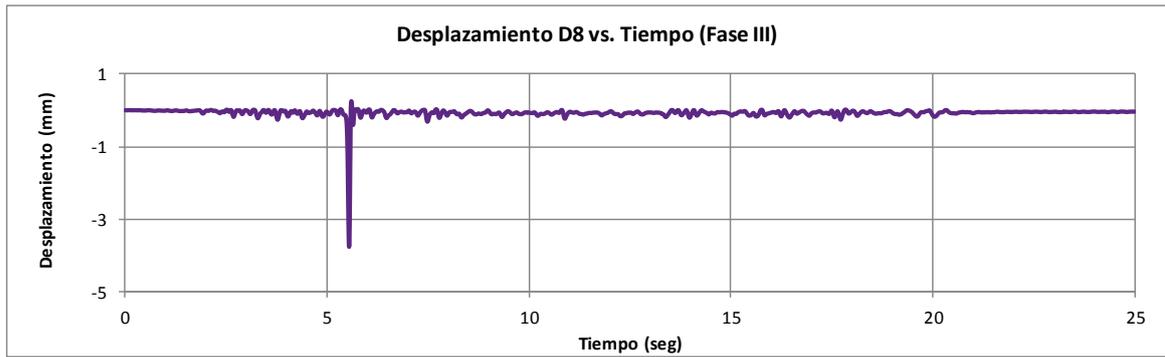
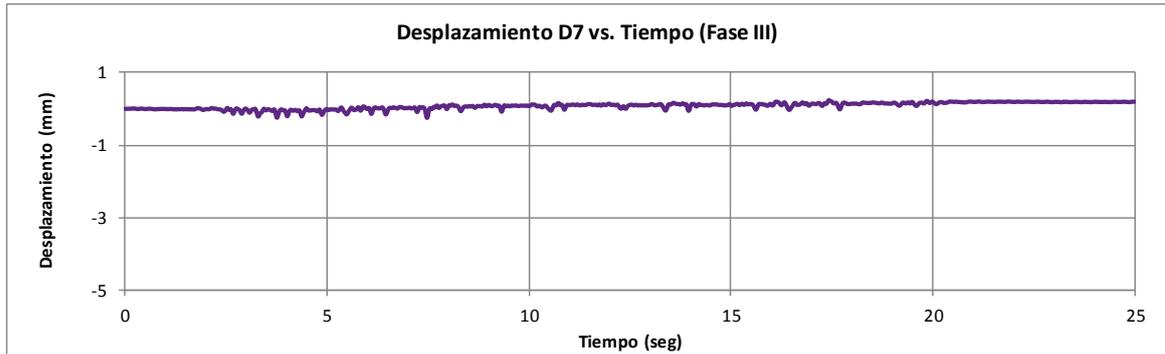


Fig. 8.2 GRÁFICAS DE DESPLAZAMIENTO RELATIVO vs. TIEMPO PARA TODOS LOS INSTRUMENTOS Y CADA FASE DE ENSAYO







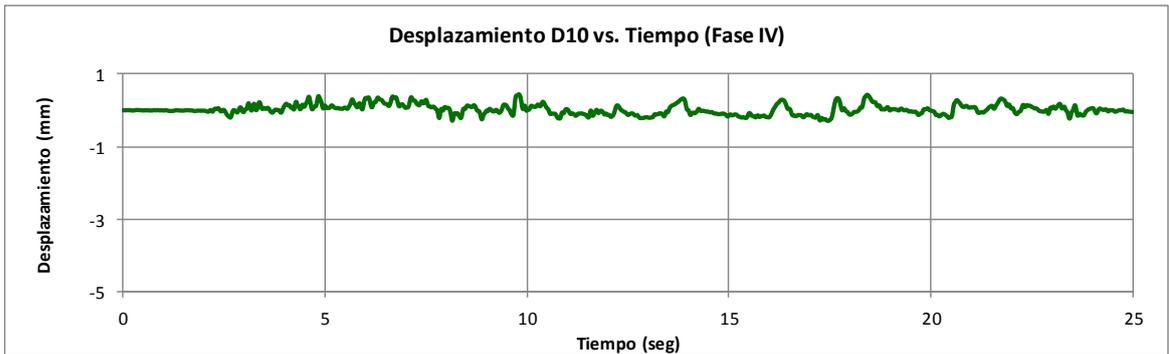
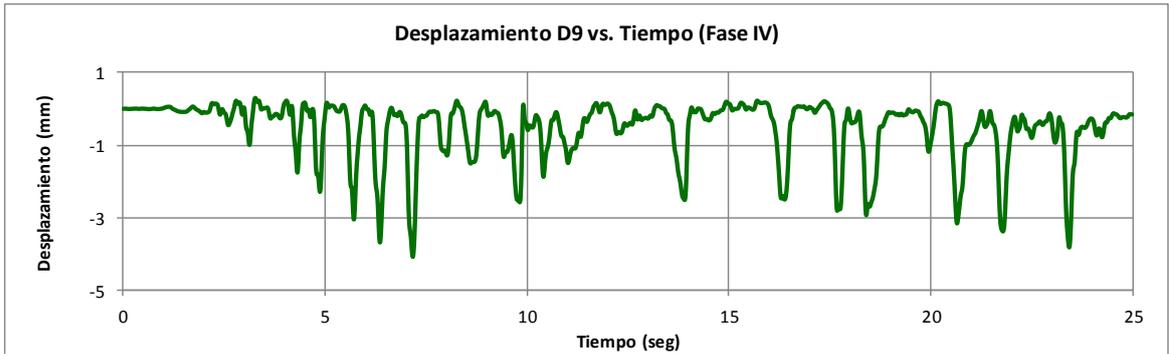
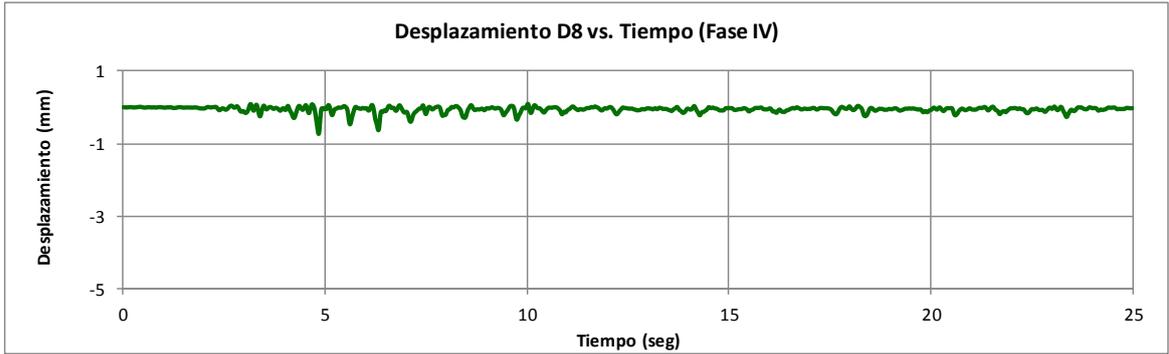
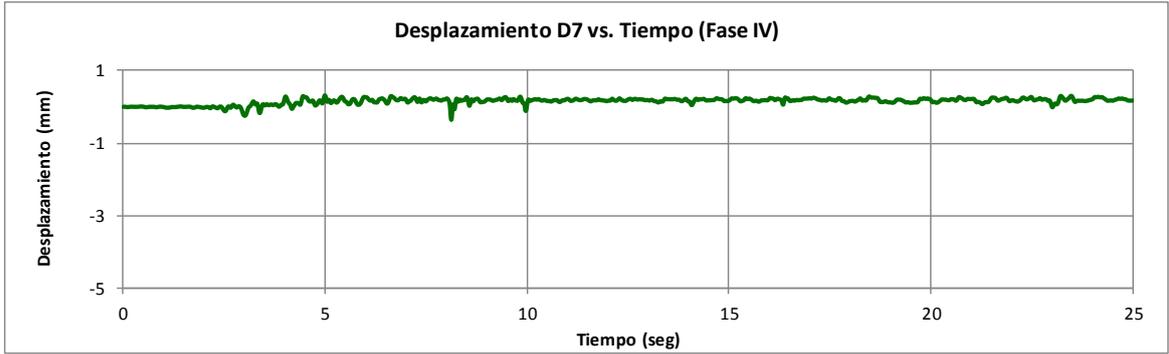
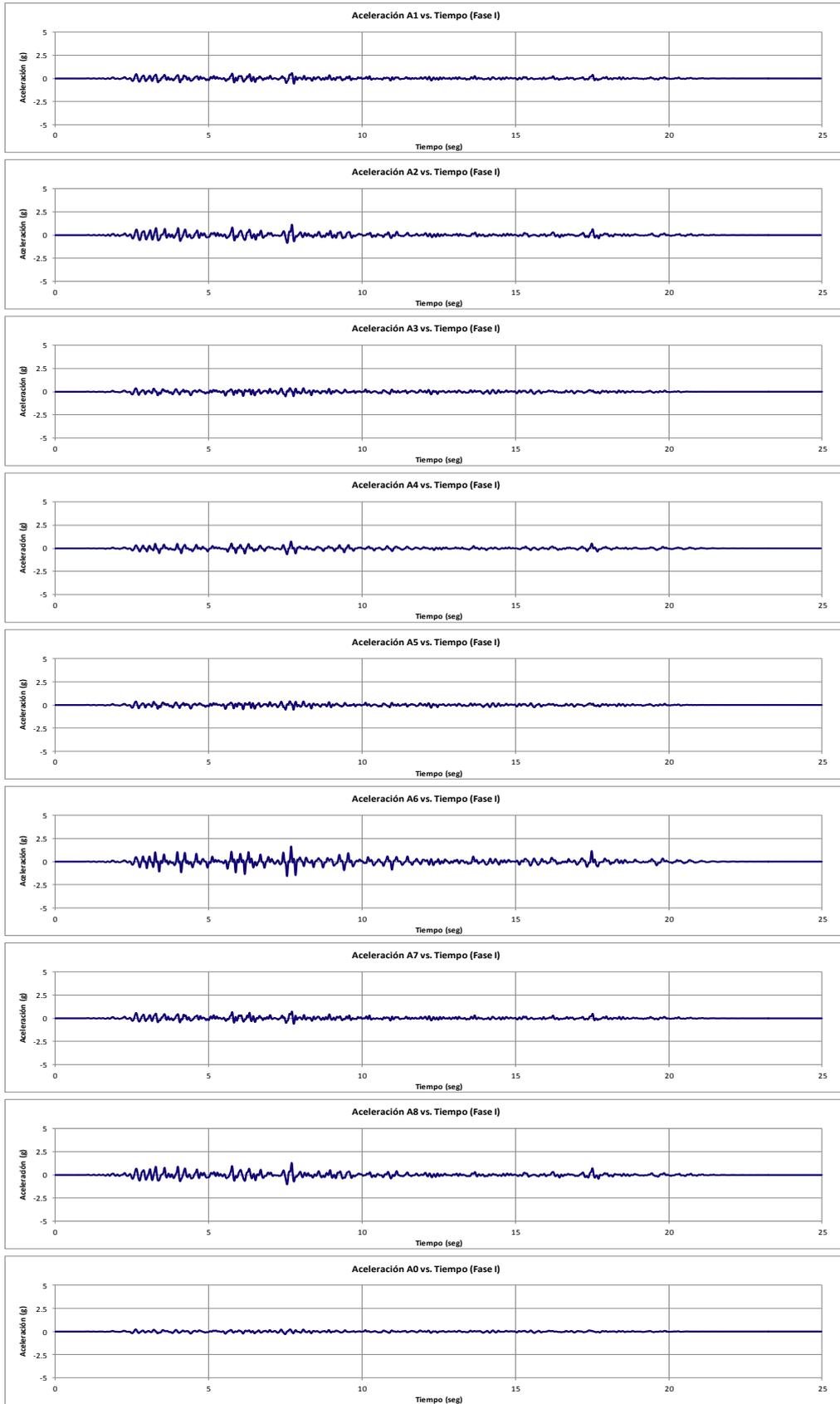
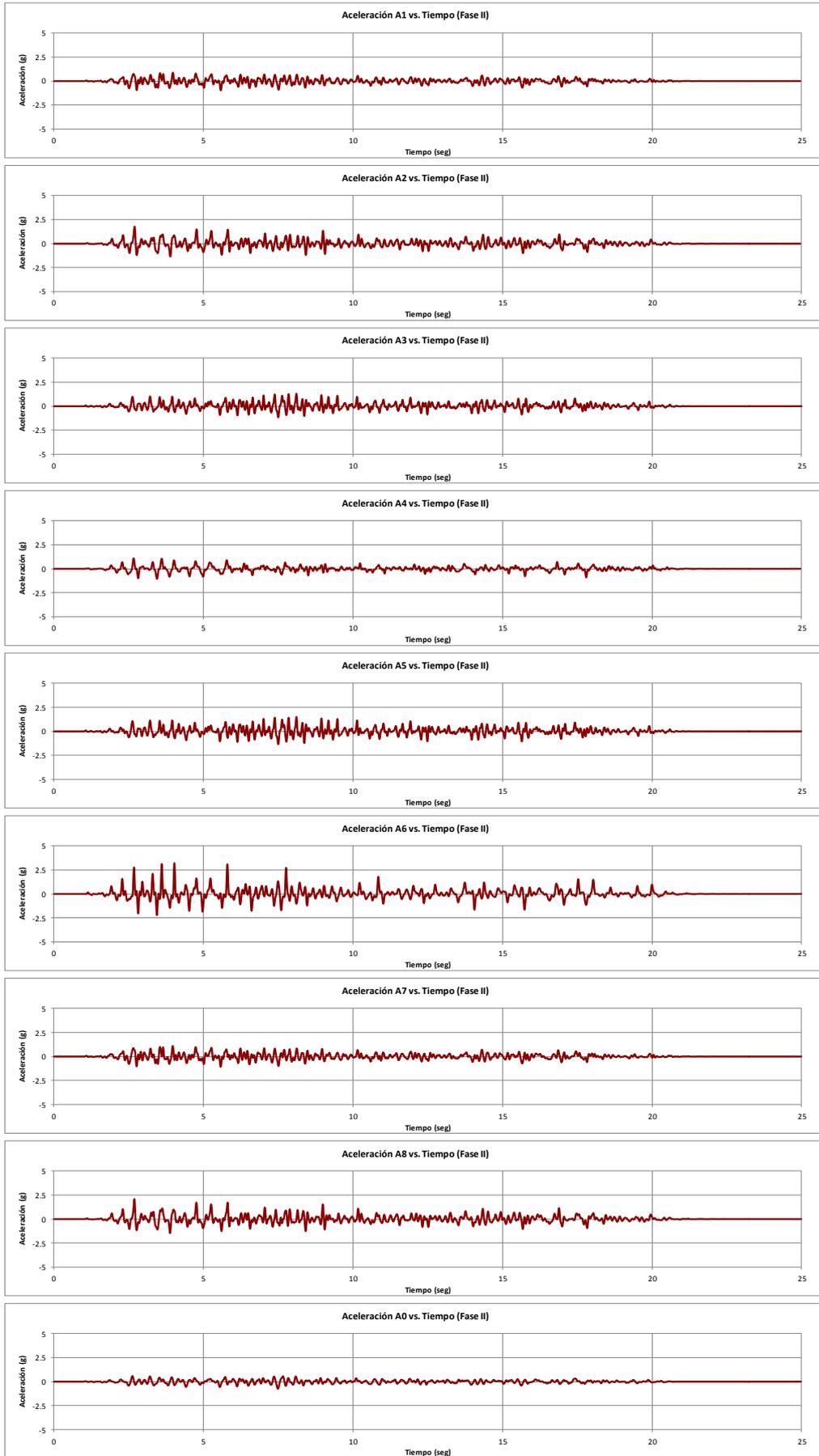
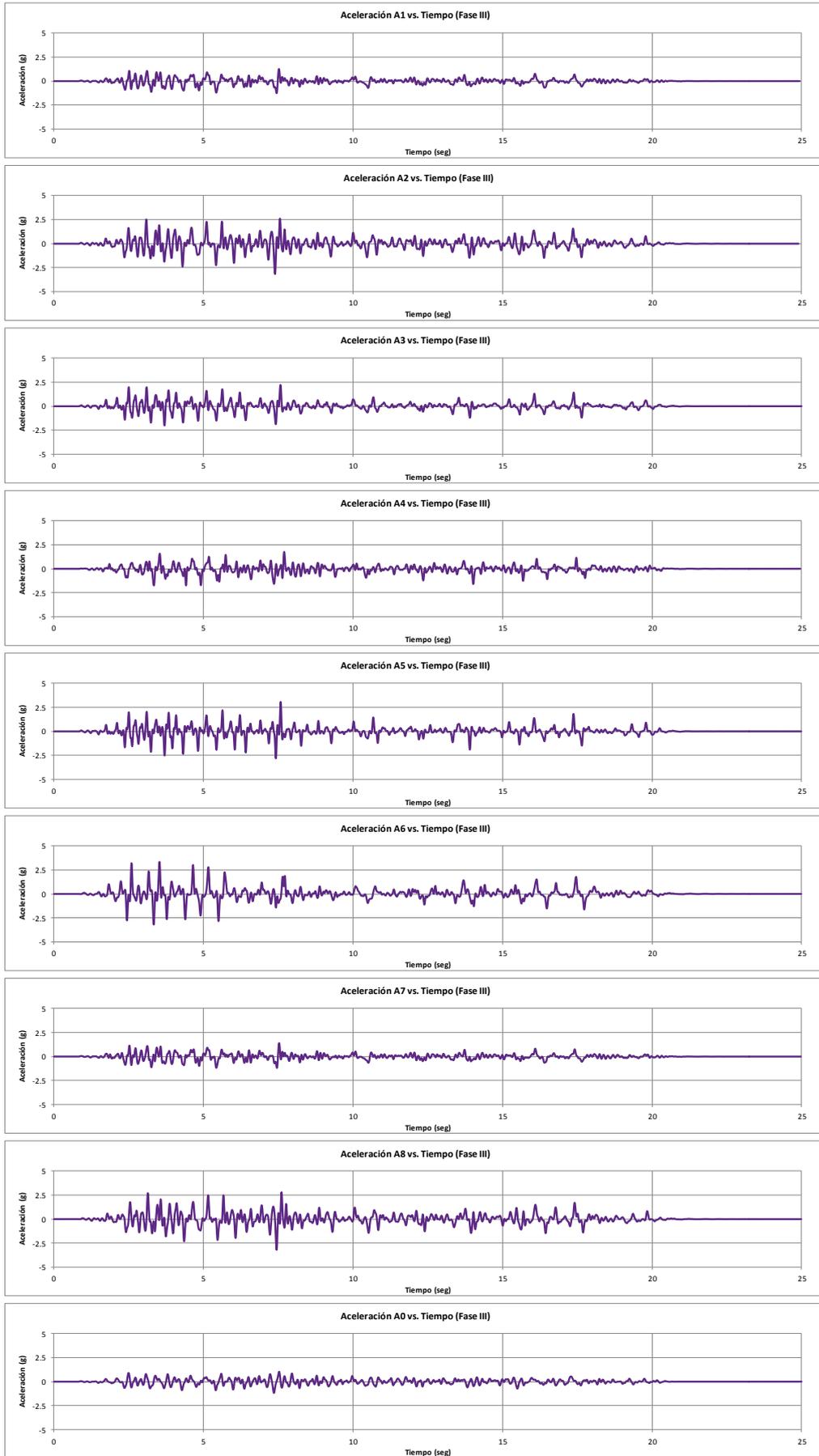


Fig. 8.3 GRÁFICAS DE ACELERACIÓN vs. TIEMPO PARA TODOS LOS INSTRUMENTOS Y CADA FASE DE ENSAYO







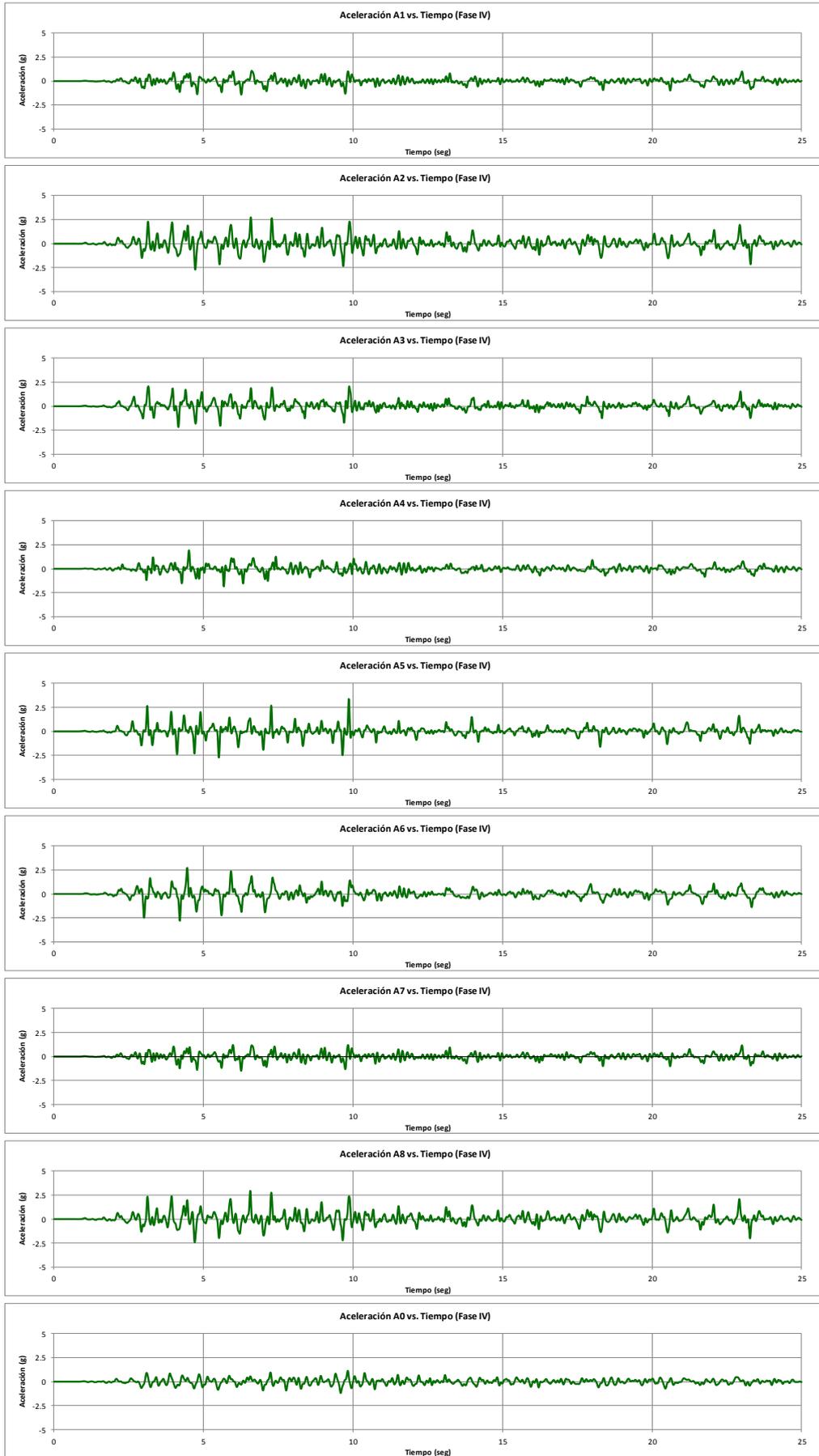
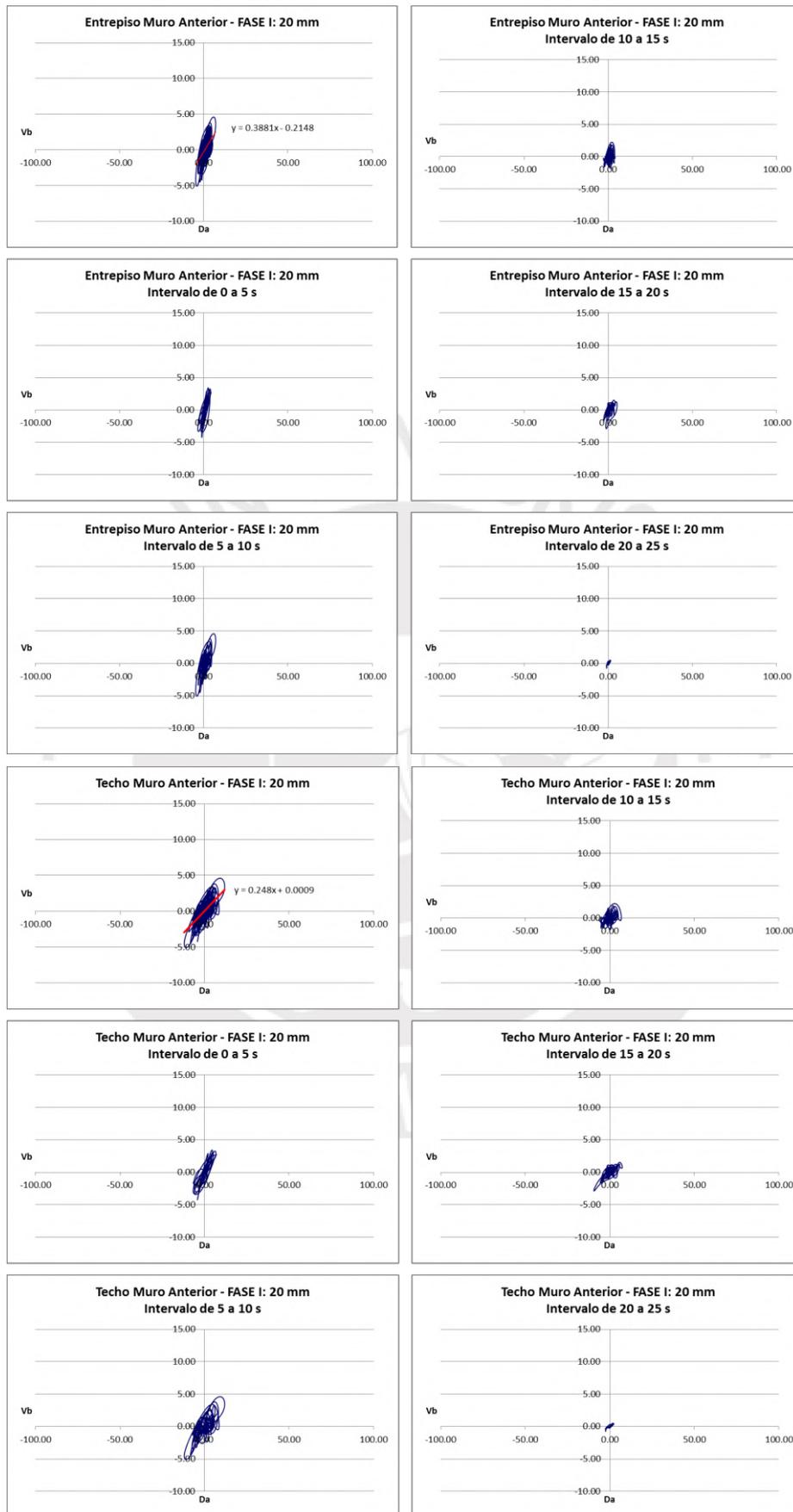
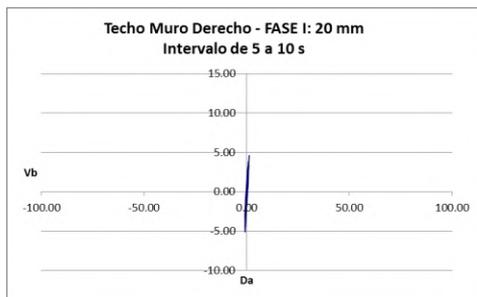
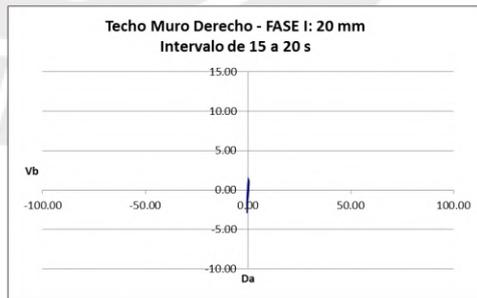
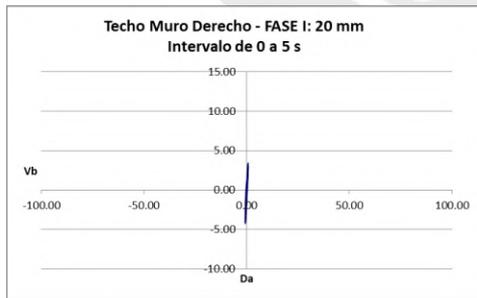
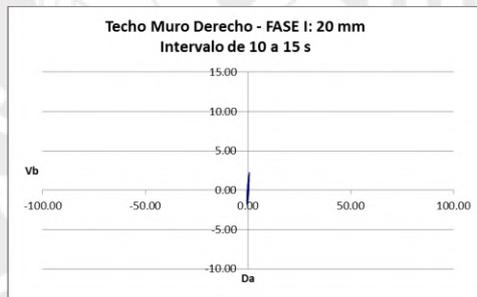
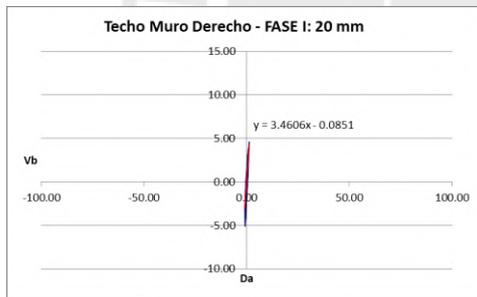
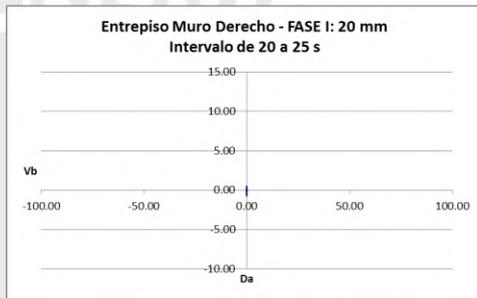
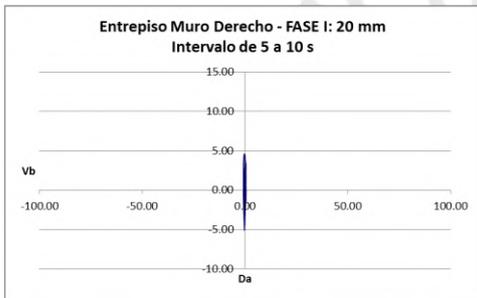
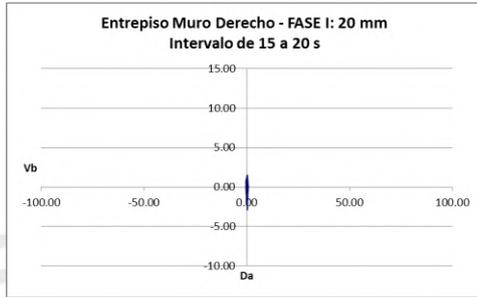
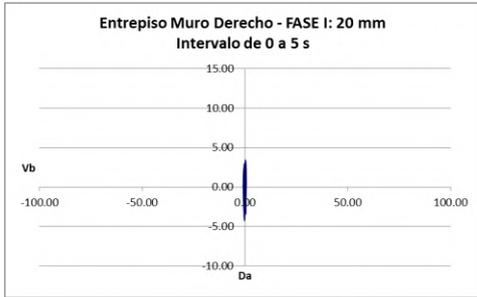
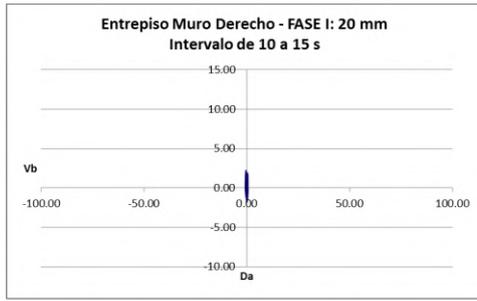
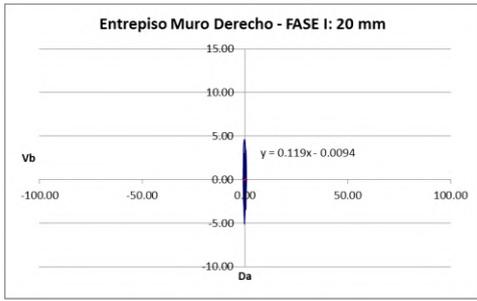
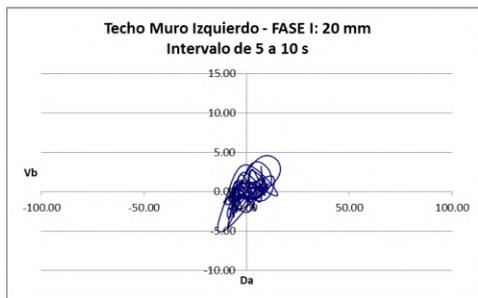
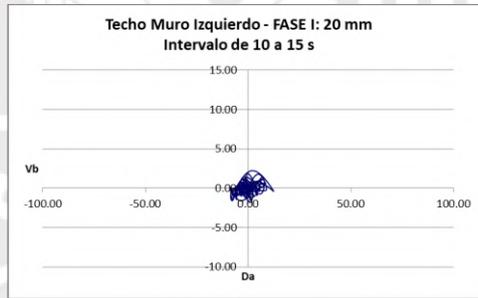
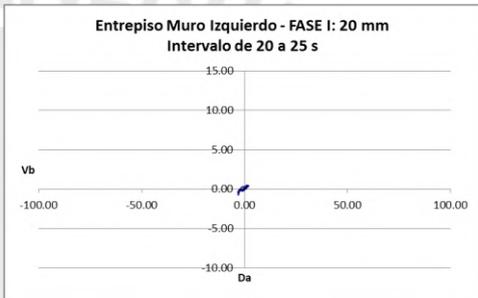
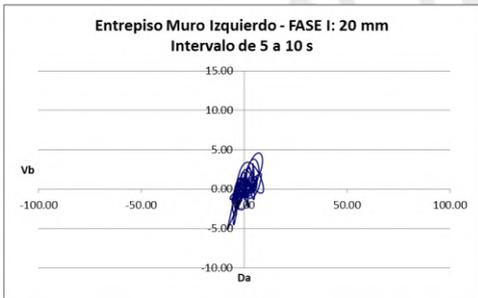
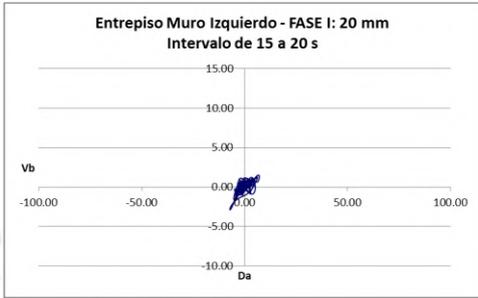
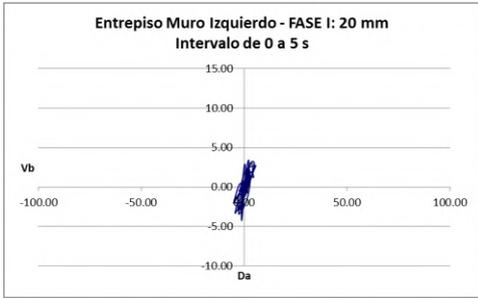
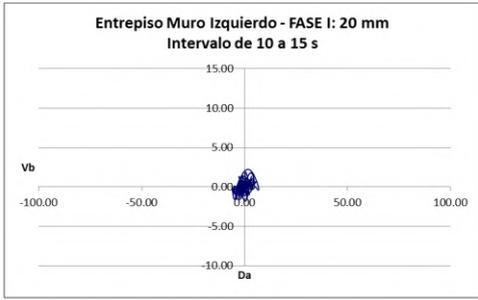
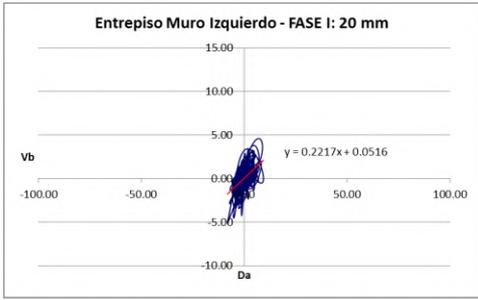
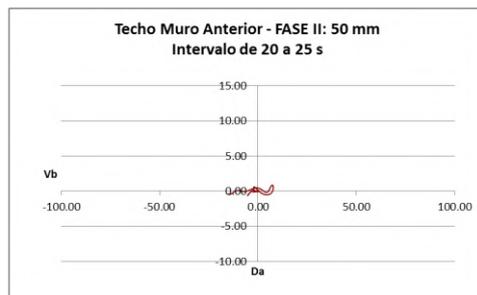
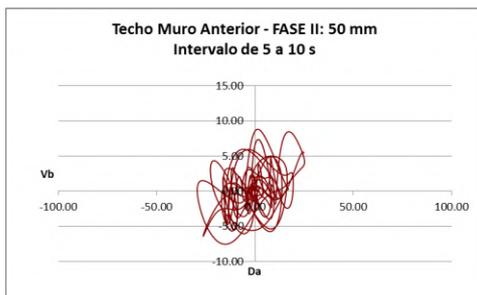
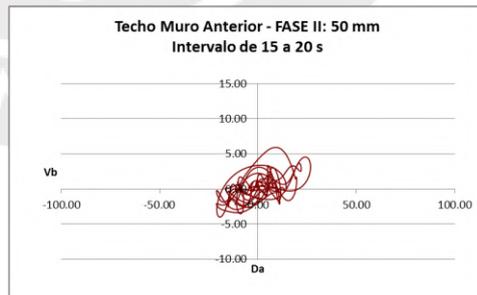
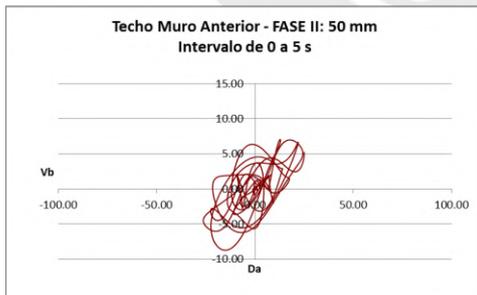
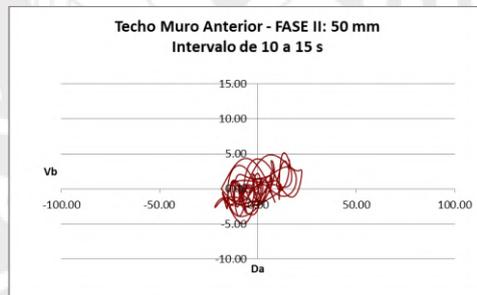
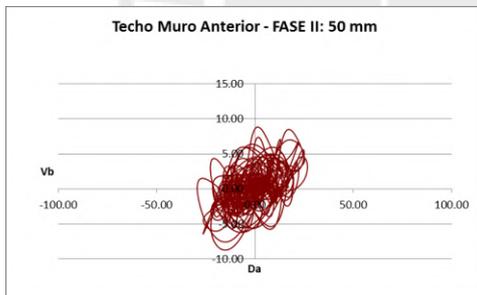
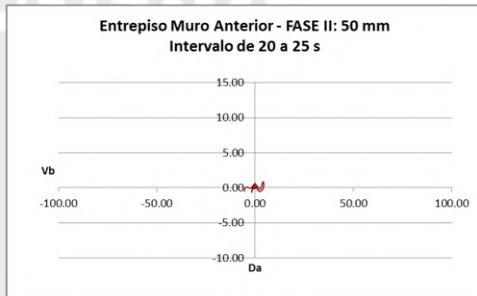
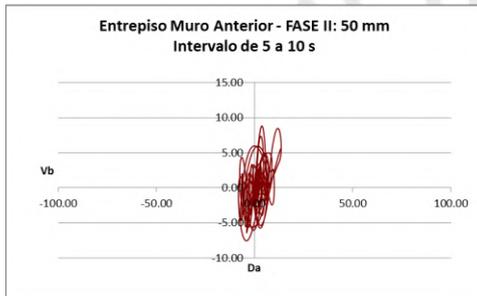
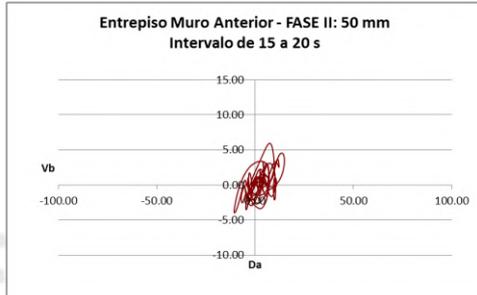
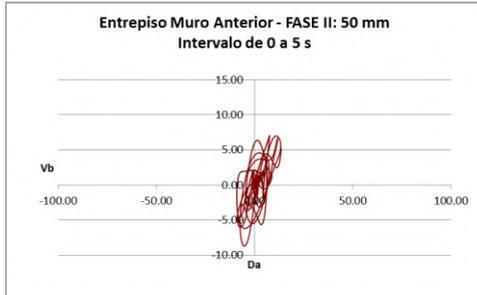
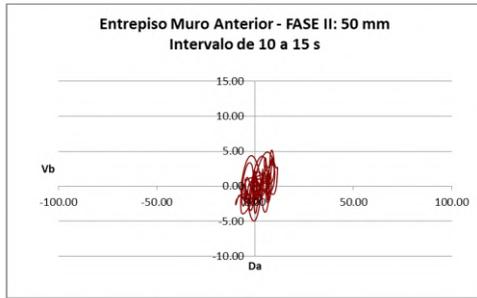
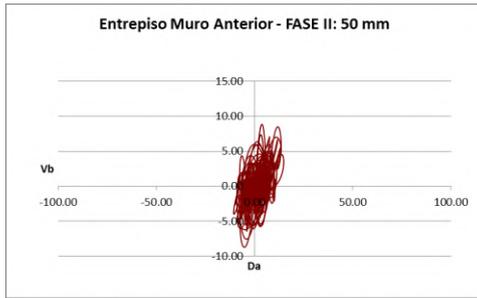


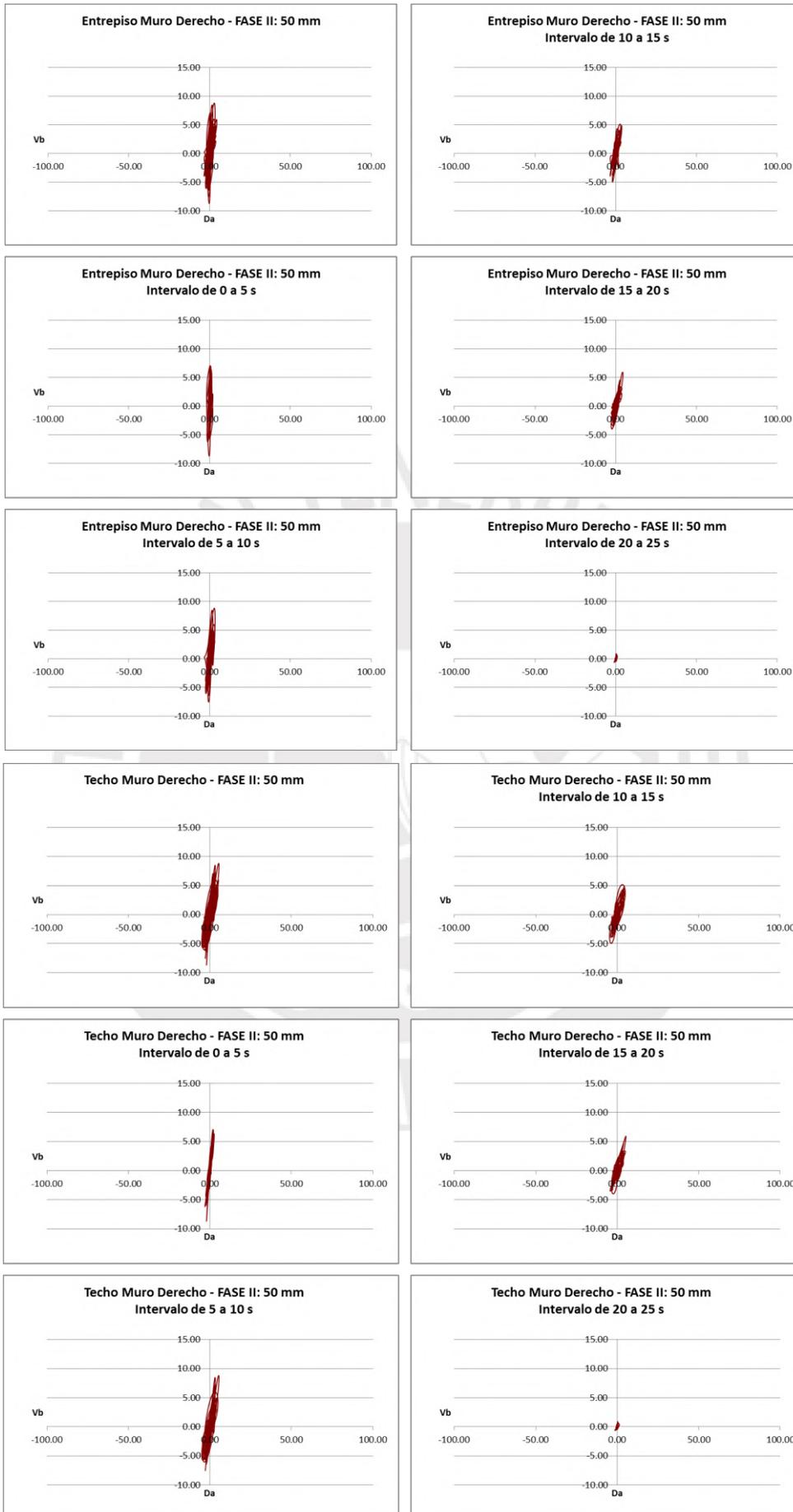
Fig. 8.4 GRÁFICAS DE LAZOS DE HISTÉRESIS PARA CADA INSTRUMENTO DURANTE LAS CUATRO FASES DEL ENSAYO

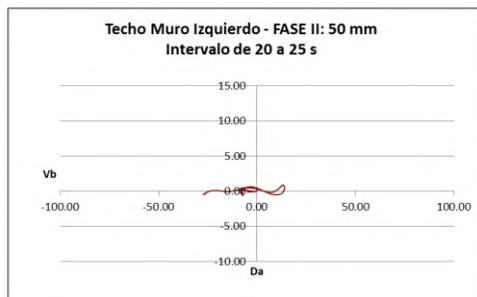
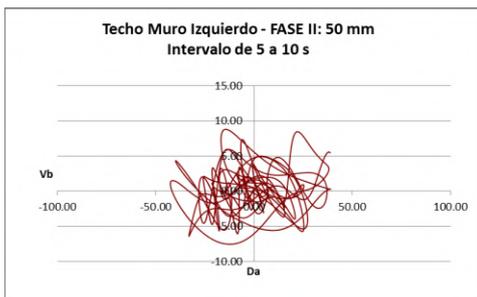
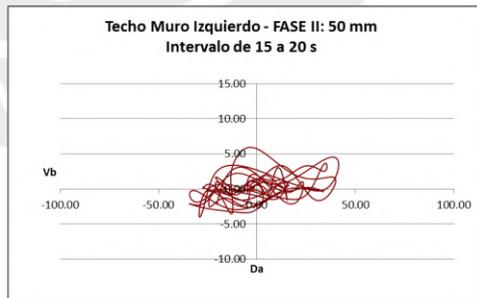
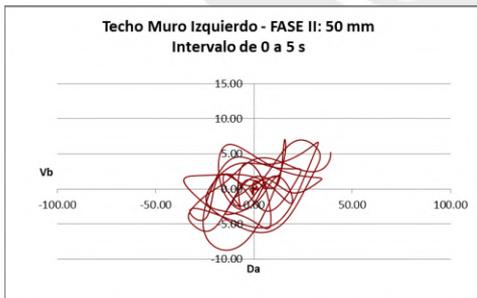
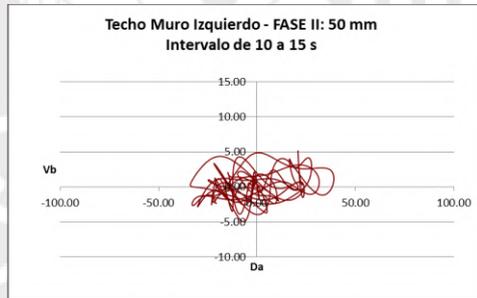
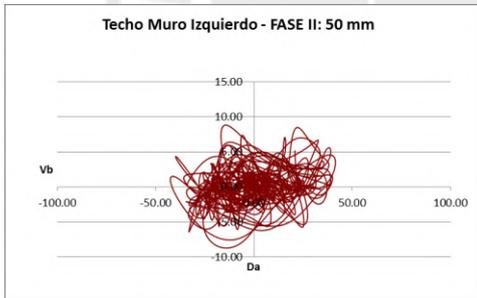
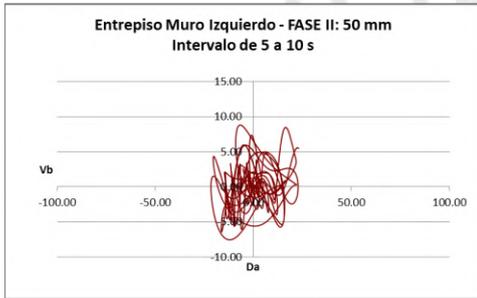
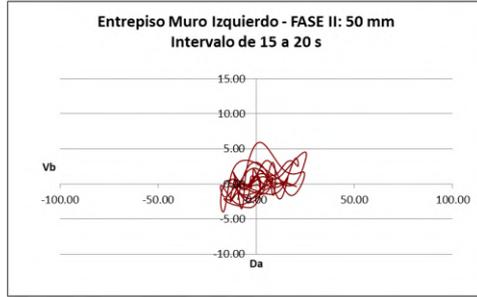
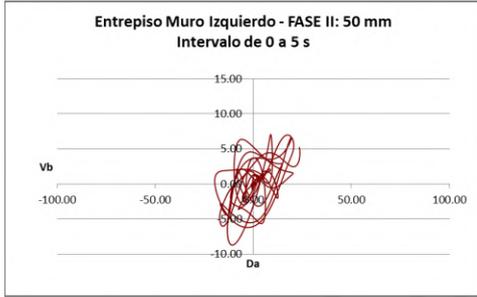
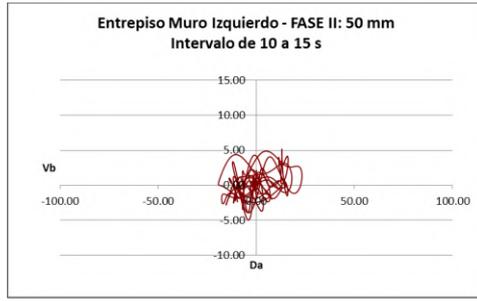
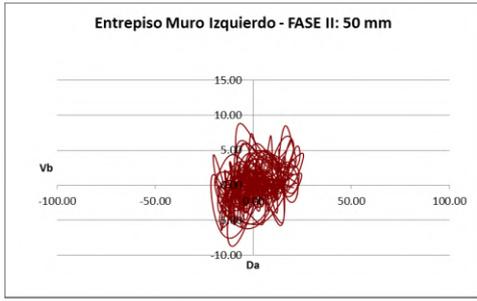


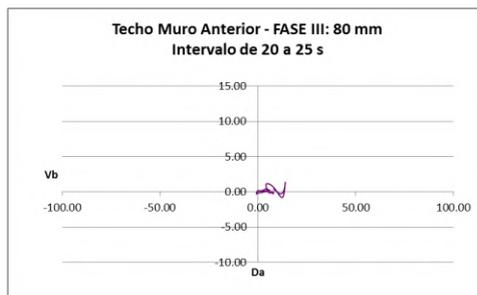
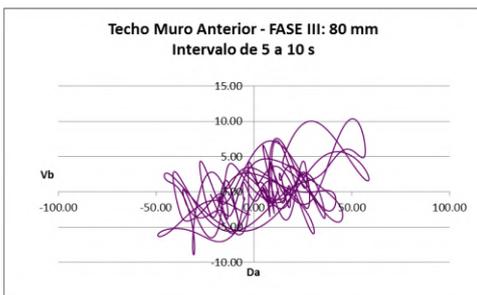
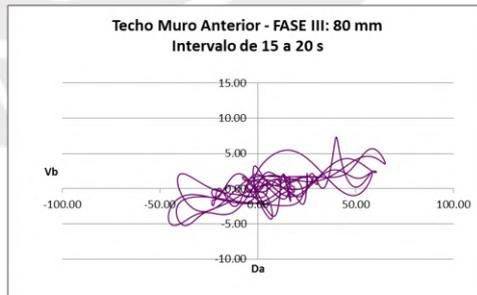
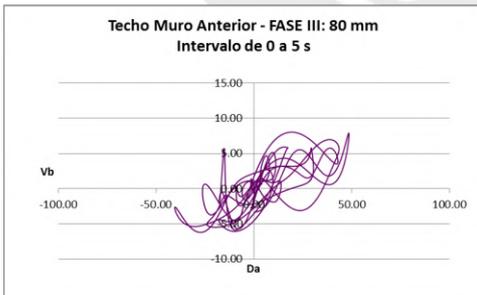
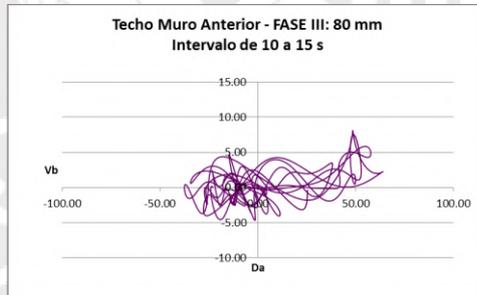
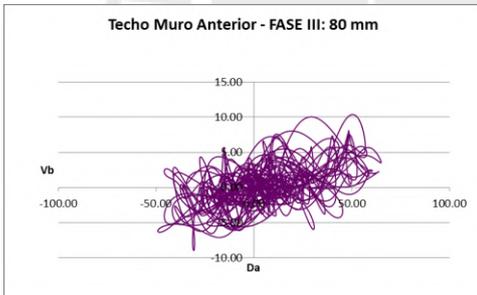
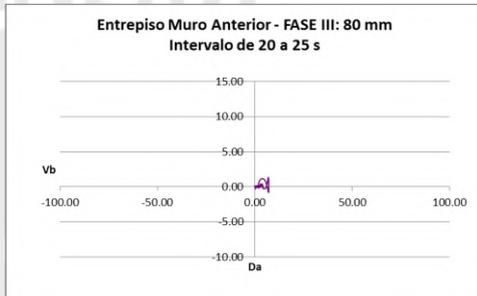
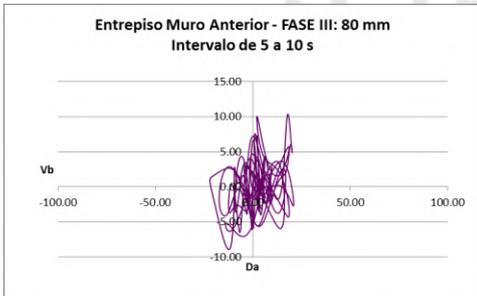
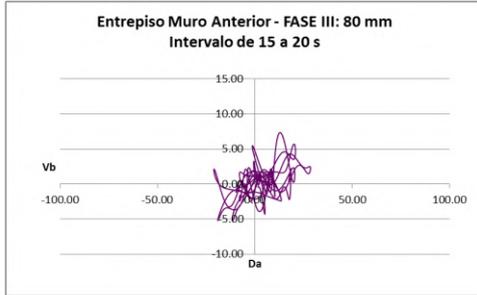
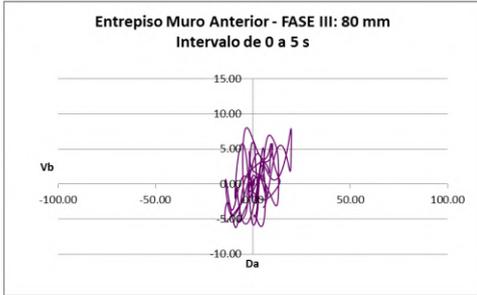
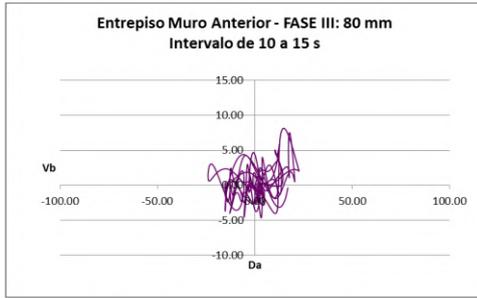
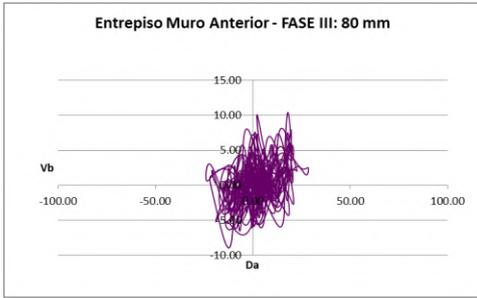




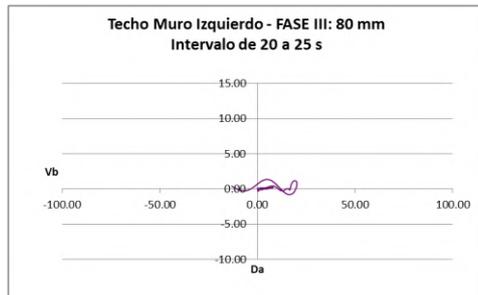
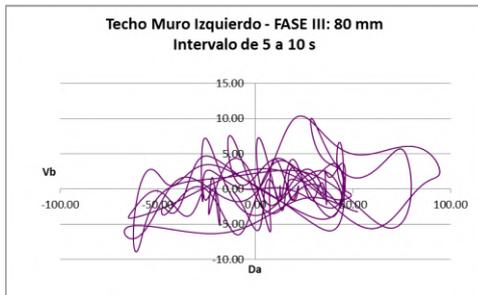
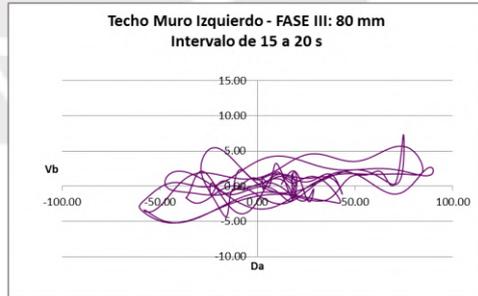
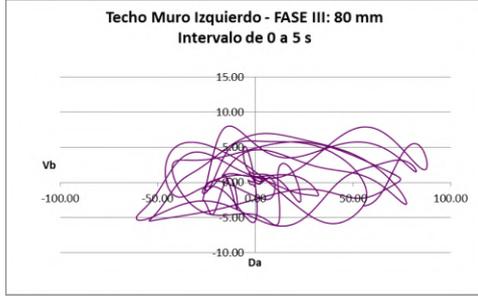
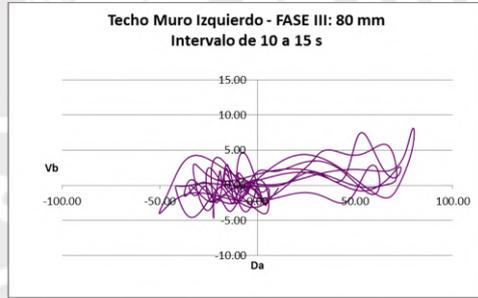
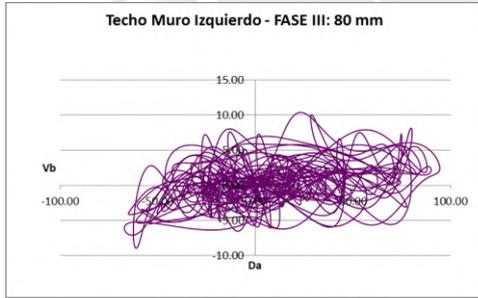
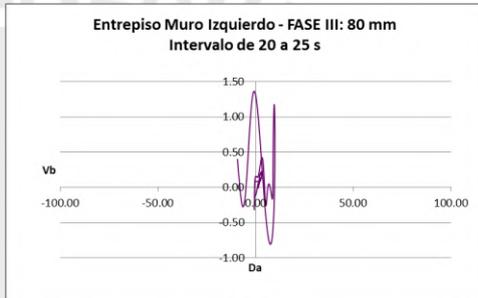
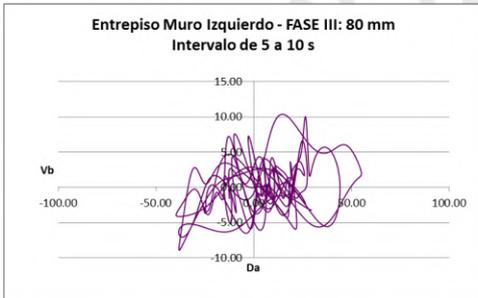
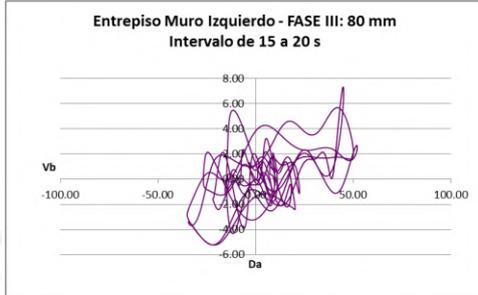
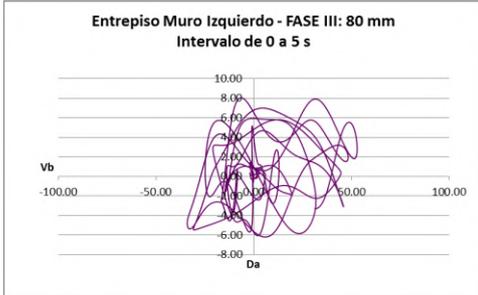
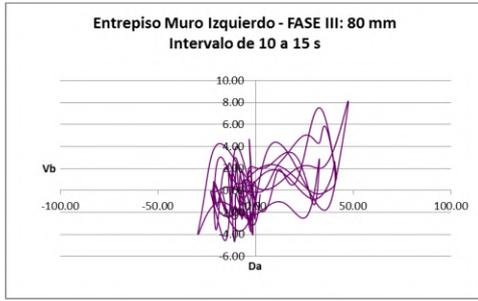
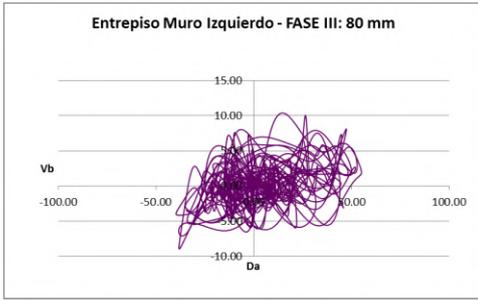


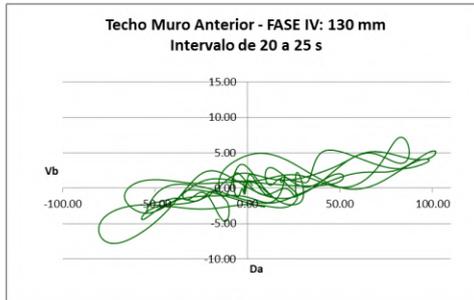
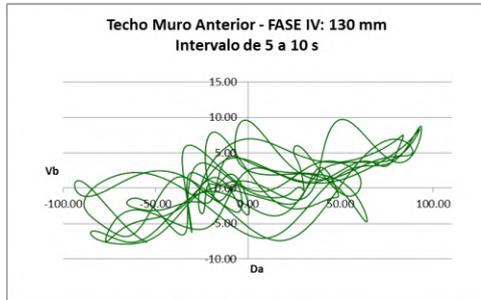
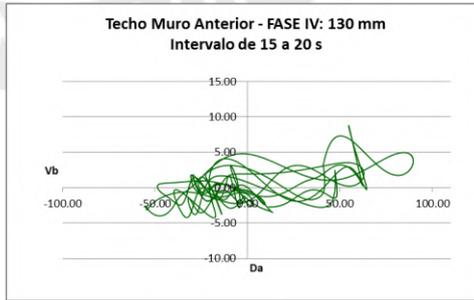
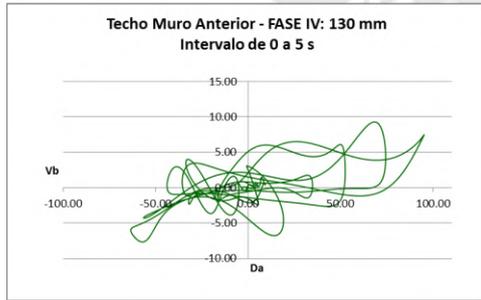
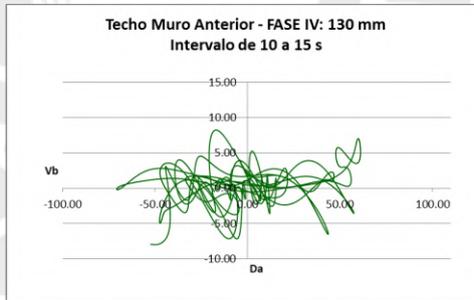
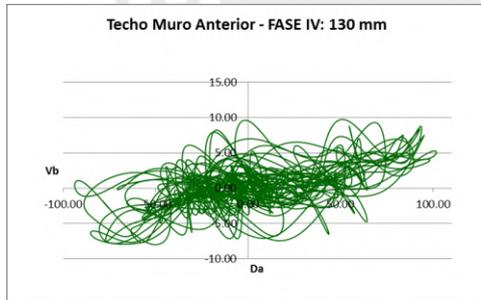
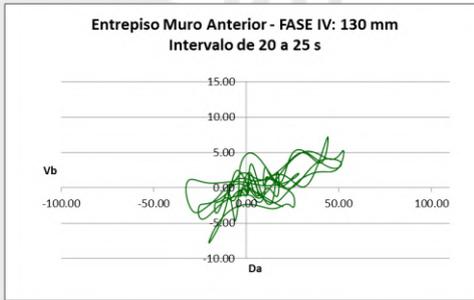
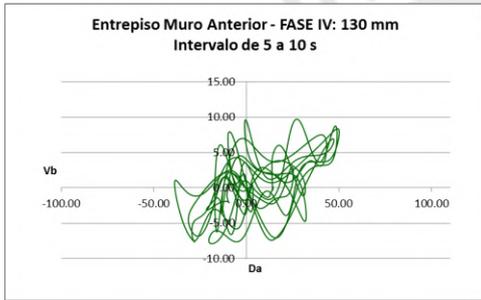
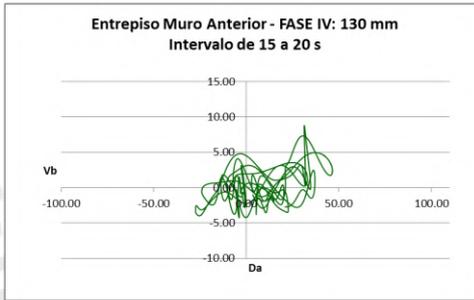
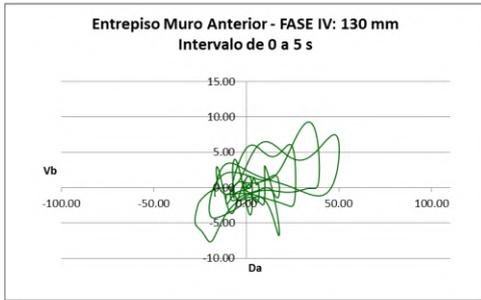
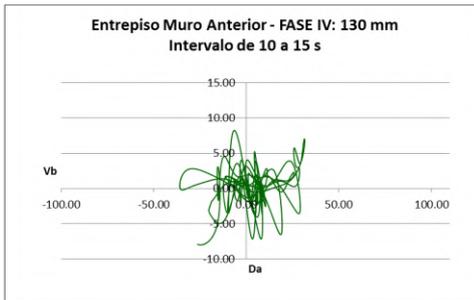
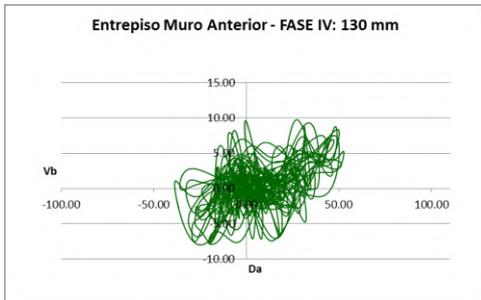


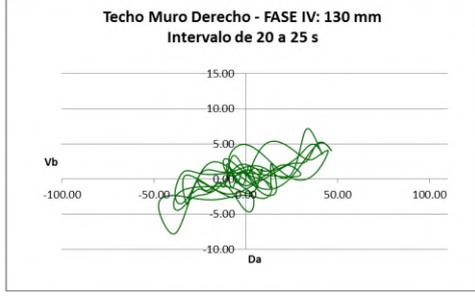
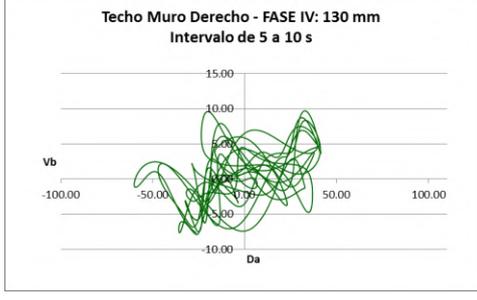
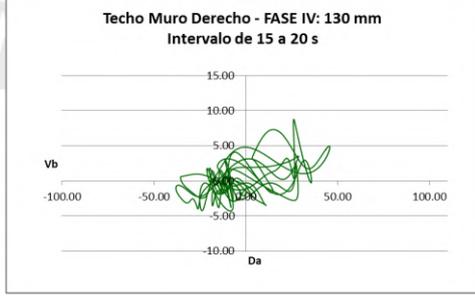
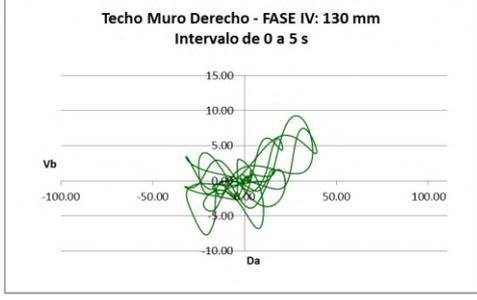
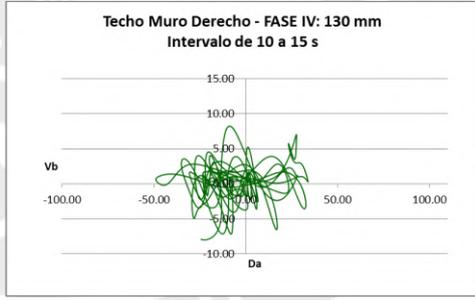
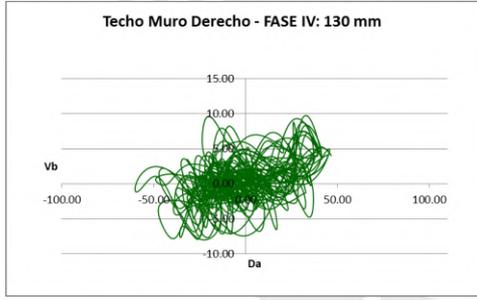
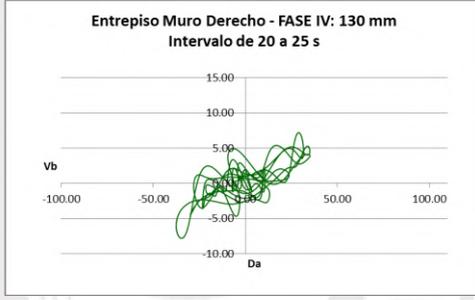
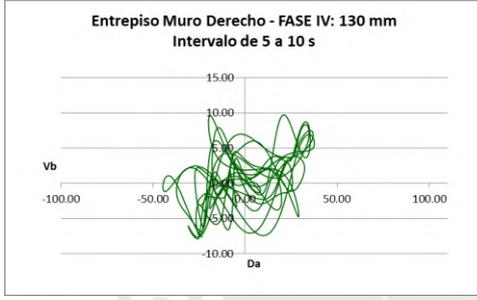
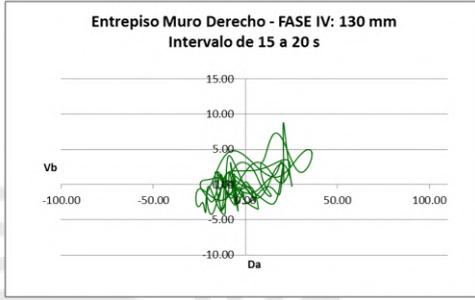
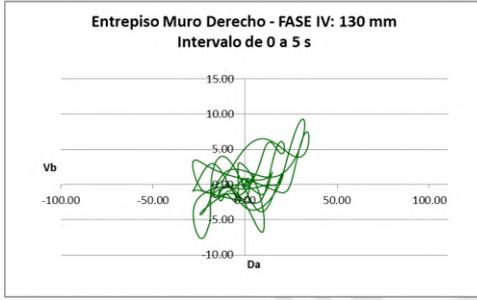
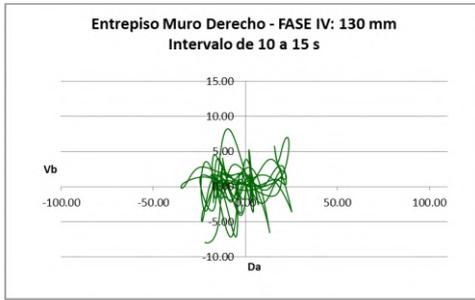
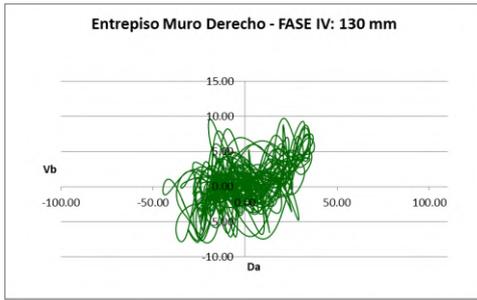


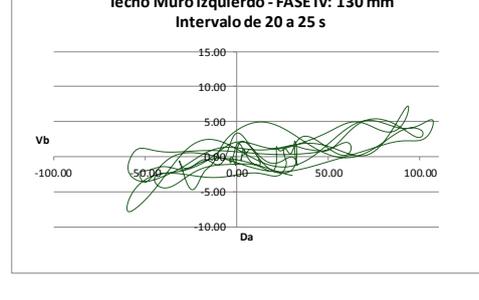
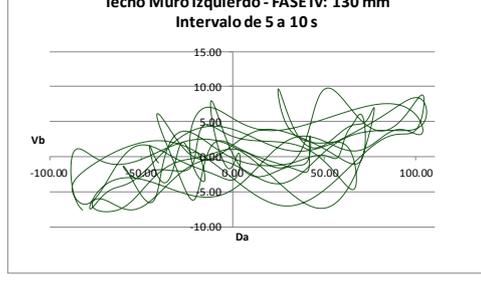
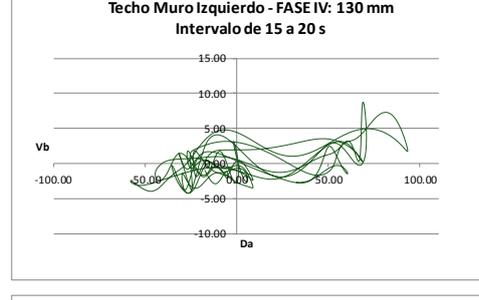
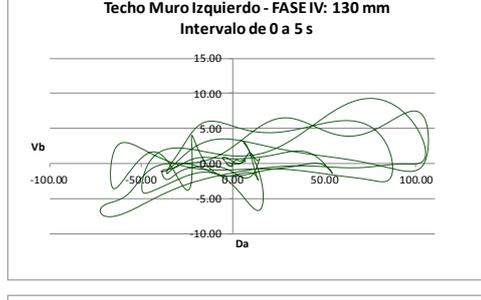
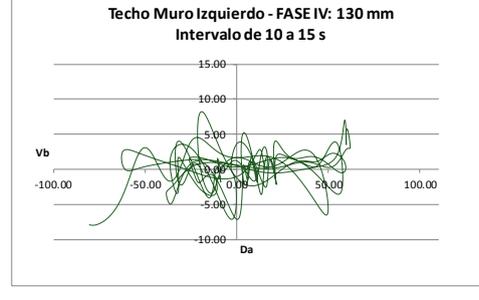
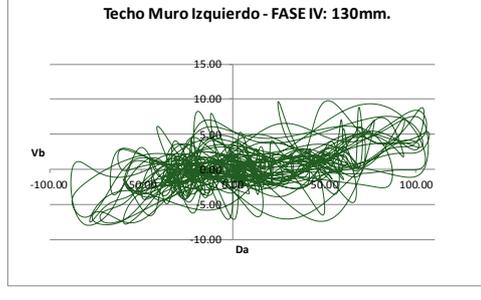
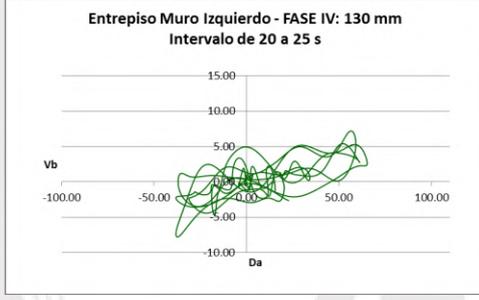
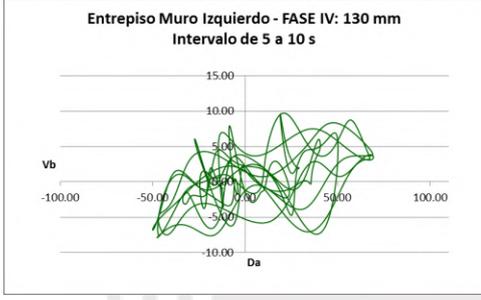
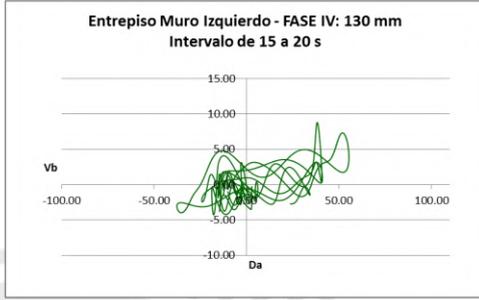
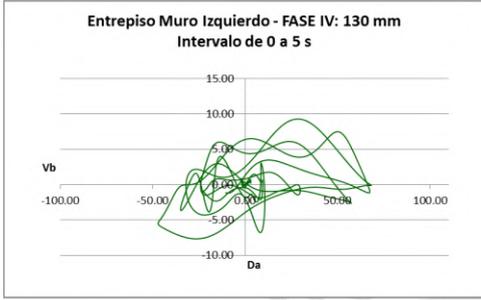
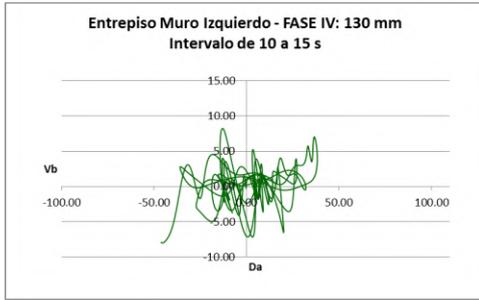
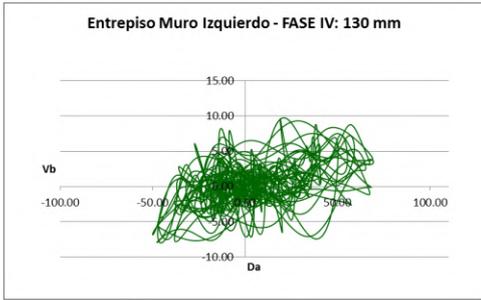












9. Referencias Bibliográficas

- Adell J. y Lauret B. (2005). *El Sistema de Albañilería Integral ALLWALL con BHH/BLOC+*. Revista Informes de la Construcción. Vol. 57 N° 495, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. España.
- Adell J. y Vega S. (2005). *La Fachada Contemporánea con Ladrillo: Cerramientos Tipo*. Revista Informes de la Construcción. Vol. 57 N° 495, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. España.
- Aguilar R., Blondet M. (2007). *Seismic Protection of Earthen Buildings*. Conferencia Internacional en Ingeniería Sísmica.
- Astroza M. (2007). *Estudio de la Zona Afectada por el Terremoto de Pisco en Agosto 15, 2007 – Misión CERESIS-UNESCO*. Universidad de Chile. Chile.
- Bariola J., Blondet M., Vargas J. (1984). *Resistencia Sísmica de la Mampostería de Adobe. Proyecto de Investigación Financiado por la agencia para el Desarrollo Internacional AID*. Lima. Perú.
- Blondet M. y Vargas J. (1978). *Investigación sobre vivienda rural. Convenio con el Ministerio de Vivienda y Construcción*. PUCP. Lima. Perú.
- Blondet M., Ginocchio J., Ottazi, G., Villa-García G., Yep J. (1989). *Ensayos de Simulación Sísmica de Viviendas de Adobe*. PUCP. Lima. Perú.
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., e Iwaki, C. (2011). *Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú*. PUCP. Lima. Perú.
- Blondet, M., Villa Garcia, G., Vargas, J., Sosa, C., y Soto, J. (2017). *Informe DGI. Desarrollo de método de diseño de refuerzo sísmico y comprobación experimental*. Lima. Perú.

- Bossio S. (2010). *Evaluación del Comportamiento Sísmico e Influencia de la Dirección del Movimiento en Módulos de Adobe Reforzado con Geomalla*. PUCP. Lima. Perú.
- Computers and Structures Inc. (2020) Technical Knowledge Base.
- Giesecke A. y Silgado E. (1981). *Terremotos en el Perú*. Ediciones Rikchay Perú. Serie Popular No. 1. Lima. Perú.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de Estructuras*. Cuarta Edición. México D.F. Editorial Pearson Educación.
- INEI (2017). *Perfil Sociodemográfico del Perú. Censo 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Lima. Perú.
- Romero J. (2019). *Análisis Sísmico Utilizando Bloques Rígidos de Modelos de Vivienda de Adobe de 2 Pisos*. PUCP. Lima. Perú.
- Shady R. (2003). *Caral-Supe: La civilización más antigua de América. Proyecto Especial Arqueológico Caral-Supe*. Instituto Nacional de Cultura. Lima. Perú.
- San Bartolomé A. (2007) *Defectos que Incidieron en el Comportamiento de las Construcciones de Albañilería en el Sismo de Pisco del 15 de agosto de 2007*. PUCP. Lima. Perú.
- Torrealva D. (2008) *Caracterización de Daños, Resparación y Reforzamiento en Construcciones de Adobe*. Departamento de Ingeniería PUCP. Lima. Perú.
- Vargas J., Bariola J. y Blondet M. (1984). *Resistencia sísmica de la mampostería de adobe*. Publicación DI-84-01. PUCP. Lima. Perú.
- Vargas J., Blondet M., Ginocchio F. y Villa García, G. (2005). *35 Años de Investigaciones en Sismo Adobe: La Tierra Armada*. Publicación PUCP. Lima. Perú.
- Zegarra L., Quiun D. y San Bartolomé A. (2001). *Comportamiento ante el terremoto del 23-06-2001 de las viviendas de adobe reforzadas en*

Moquegua, Tacna y Arica. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
Colegio de Ingenieros del Perú. Puno. Perú.

