

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**ESCUELA DE POSGRADO**



**ANÁLISIS SÍSMICO UTILIZANDO BLOQUES RÍGIDOS DE MODELOS  
DE VIVIENDA DE ADOBE DE 2 PISOS**

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

**AUTOR**

José Ignacio Romero Leceta

**ASESOR**

Jorge Marcial Blondet Saavedra

Lima, Junio de 2019



## Resumen

Las viviendas de mampostería de adobe son muy usadas alrededor del mundo por ser fáciles de construir y tener un bajo costo. En las últimas décadas los terremotos ocurridos han causado el colapso de este tipo de viviendas y la pérdida de muchas vidas. (Dowling, 2006) (USGS, 2006) (Quiun, San Bartolome, & Zegarra, 1996). A pesar de que son vulnerables frente a eventos sísmicos muchas personas utilizan este tipo de viviendas por no contar con el dinero suficiente para adquirir una vivienda de material noble. En el Perú cerca de 2 millones de viviendas están construidas con mampostería de adobe y se encuentran en una zona de alto peligro sísmico. Un terremoto ocurrido en Ica en el año 2007 de magnitud de 8 grados Richter causó el colapso de 50 mil viviendas de adobe y 45 mil quedaron dañadas. La baja calidad de los materiales, los muros delgados y la informalidad en la construcción fueron las causas más importantes en el colapso de estas viviendas (Blondet, Vargas, Tarque, & Iwaki, 2011).

Las viviendas de mampostería de adobe pueden ser reforzadas para evitar que colapsen ante un sísmico severo. Estas viviendas son económicas y fáciles de construir por tanto el refuerzo también debe ser económico y sencillo. Un tipo de reforzamiento que cumple con estas condiciones es el reforzamiento con sogas. En el año 2016 el grupo GERDIS de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) estudió el comportamiento bajo simulación sísmica de un modelo de vivienda de adobe de 1 piso reforzado con sogas. Tras realizar el ensayo se observó que no hubo colapso parcial ni total de la estructura (Blondet, y otros, 2016).

En el Perú existen también viviendas de mampostería de adobe de 2 pisos. Por esta razón en el año 2017 se realizó 4 ensayos en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP de modelos de vivienda de adobe de 2 pisos a escala reducida, 2 sin ningún tipo de refuerzo y 2 con reforzamiento con sogas. Este proyecto fue financiado por el Servicio Nacional para la Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO).

El objetivo del presente trabajo es estimar los desplazamientos y fuerzas en las sogas en modelos de vivienda de adobe de 2 pisos mediante modelos computacionales. Para validar los resultados de los modelos computacionales se comparó con las respuestas obtenidas de los ensayos de laboratorio realizados en la PUCP.

El modelo computacional se realizó en el programa SAP2000 (CSI, 2018). La estructura del modelo de vivienda de 2 pisos se idealizó como un conjunto de bloques rígidos. Se utilizaron dos configuraciones con bloques rígidos. Estas configuraciones están basadas en los patrones de agrietamiento de modelos de vivienda de adobe de 1 piso observados en ensayos de laboratorio realizados en la PUCP en años anteriores. La configuración 1 divide la estructura en 9 bloques rígidos. La configuración 2 divide la estructura en 22 bloques rígidos.

Para simular el choque entre bloques rígidos del modelo computacional se colocó elementos lineales disponibles en el programa que solo funcionan a compresión y que cuentan con una gran rigidez. Para incluir en el modelo computacional el efecto del reforzamiento con sogas se adicionó elementos que solo funcionan a tracción y se les colocó con una rigidez equivalente a la de las sogas.

El ensayo de laboratorio de simulación sísmica consistió en colocar el modelo de vivienda de 2 pisos de adobe sobre una mesa vibradora que se mueve unidireccionalmente según una señal de desplazamiento. Para el ensayo se utilizó una señal de desplazamiento que difiere en amplitud para cada fase del ensayo. Se extrajo los resultados de las fases con amplitudes máximas de 15mm y 60mm. Estas amplitudes se escogieron sabiendo que con la amplitud de 15mm se obtendría poco daño y con la amplitud de 60mm se obtendría el máximo daño.

## Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por haberme proporcionado una beca y una subvención que me permitió concentrarme totalmente en la tesis y en los cursos de la maestría sin tener que preocuparme por necesidades económicas. Se agradece a SENCICO por haber financiado los ensayos de laboratorio necesarios para la elaboración de esta tesis. Se agradece a todos los ingenieros que estuvieron siempre dispuestos a brindarme su tiempo para absolver alguna consulta como el Dr. Marcial Blondet, Dr. Nicola Tarque y todos mis compañeros de maestría. En especial agradezco a mi familia por el apoyo durante todo este tiempo de estudio.



# Tabla de contenido

Resumen .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Tabla de contenido .....	iii
Lista de figuras .....	vi
Lista de tablas .....	xi
1. Introducción.....	5
1.1. General.....	5
1.2. Justificación.....	6
1.3. Asunciones .....	7
1.4. Problema general y específico.....	7
1.5. Objetivo general y específico.....	7
1.6. Hipótesis.....	7
1.7. Esquema de la tesis.....	7
2. Comportamiento de la mampostería de adobe .....	9
2.1. Vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe .....	9
2.2. Ensayos a muros de mampostería de adobe .....	13
2.3. Ensayos de modelos de vivienda de adobe de 1 piso sin refuerzo.....	16
2.4. Ensayos de modelos de vivienda de adobe de 1 piso reforzados.....	18
2.5. Comportamiento sísmico en el Perú de viviendas de adobe reforzadas.....	20
3. Análisis numérico de modelos de vivienda de mampostería de adobe .....	23
3.1. Modelamiento computacional de la mampostería de adobe .....	23
3.1.1. Modelamiento de estructuras de mampostería.....	23
3.1.2. Acercamientos simplificados en el modelamiento computacional .....	26
3.1.3. Modelamiento computacional de muros de adobe sin refuerzo .....	28
3.1.4. Modelamiento computacional de modelos de vivienda de mampostería de adobe de 1 piso sin refuerzo.....	30
3.2. Complejidad en el modelamiento.....	33
3.2.1. Resistencia a la compresión y tracción diferentes.....	33
3.2.2. Variabilidad en los resultados de ensayos .....	34
3.2.3. Comportamiento plástico .....	34
3.2.4. Agrietamiento y formación de bloques .....	35
3.3. Estimación de los desplazamientos y fuerzas en un modelo de vivienda de mampostería de adobe de 1 piso reforzado con sogas utilizando bloques rígidos.....	35
3.3.1. Introducción al modelamiento de la mampostería de adobe reforzada con sogas utilizando bloques rígidos .....	35

3.3.2.	Modelo de vivienda conformado por 2 bloques rígidos .....	36
3.3.3.	Desplazamiento horizontal con un solo grado de libertad (GDL) .....	37
3.3.4.	Volteo de un muro rígido simplemente apoyado sostenido con sogas .....	38
3.3.5.	Comparación entre un análisis en MATLAB y SAP2000 .....	41
3.3.6.	Análisis numérico comparativo .....	44
3.4.	Conclusiones.....	48
4.	Ensayos de laboratorio de modelos de vivienda de mampostería de adobe de 2 pisos .	49
4.1.	Descripción de los ensayos de laboratorio.....	49
4.1.1.	El modelo de vivienda .....	49
4.1.2.	Ensayos y fases .....	49
4.2.	Construcción de los modelos de vivienda de adobe reforzados con sogas .....	51
4.2.1.	Dimensiones del modelo de vivienda de adobe a escala reducida.....	51
4.2.2.	Unidades de adobe.....	52
4.2.3.	Construcción del modelo de vivienda sin refuerzo .....	53
4.2.4.	Reforzamiento con sogas .....	54
4.3.	Ensayos complementarios.....	56
4.3.1.	Ensayos de compresión de prismas de adobe .....	56
4.3.2.	Ensayos de tracción de sogas .....	57
4.4.	Teoría de modelos.....	58
4.5.	Señal de comando para el prototipo.....	61
4.6.	Señal de comando para el modelo.....	61
4.7.	Puntos de medición en el ensayo.....	64
4.8.	Resultados del ensayo al modelo no reforzado .....	65
4.9.	Resultados del ensayo al modelo reforzado .....	69
4.10.	Estados de daño en los modelos de vivienda ensayados.....	75
5.	Análisis numérico y comparación con los resultados del ensayo .....	81
5.1.	Análisis lineal .....	81
5.2.	Análisis con mecanismos de falla y bloques rígidos.....	81
5.2.1.	Modelamiento .....	81
5.3.	Análisis numérico y comparación con el ensayo utilizando la configuración 1 .....	85
5.3.1.	Modelo computacional configuración 1 sin refuerzo .....	85
5.3.2.	Modelo configuración 1 con refuerzo .....	88
5.4.	Análisis numérico y comparación con el ensayo utilizando la configuración 2 .....	93
5.4.1.	Modelo configuración 2 sin refuerzo .....	93
5.4.2.	Modelo configuración 2 con refuerzo .....	96
5.5.	Comparación utilizando espectros de Fourier .....	101

5.6.	Comparación entre amplitudes máximas de las respuestas .....	102
5.6.1.	Ensayo vs configuración 1 y 2 sin refuerzo. ....	102
5.6.2.	Ensayo vs configuración 1 y 2 con refuerzo. ....	102
5.7.	Comparación de desplazamientos y fuerzas en otros puntos de medición .....	103
5.8.	Observaciones importantes .....	104
6.	Conclusiones .....	107
7.	Bibliografía .....	109



## Lista de figuras

Figura 2.1 Zonas con viviendas de adobe (en color marrón) (De Sensi, 2003) .....	9
Figura 2.2 Zonas de alto peligro sísmico (en color rojo).....	9
Figura 2.3 (a) Viviendas colapsadas en Bam, Irán, luego del terremoto del 2003. (b) Iglesia dañada severamente en Apastapeque luego del terremoto del 2001. (Dowling, 2006).....	10
Figura 2.4 (a) Casas de adobe, Lima (Andina, 2014). (b) Casa de adobe de 2 pisos, La Libertad (RPP, 2014).....	11
Figura 2.5 Colapso de una vivienda de adobe en Chimbote, Perú debido al terremoto de 1970 (Quiun, San Bartolomé, & Zegarra, 1996) .....	11
Figura 2.6 (a) Grietas verticales en la esquina del muro de fachada. (b) Grietas diagonales entre ventanas. (Zegarra, San Bartolomé, & Quiun, 2004) (Aguilar & Blondet, 2007).....	12
Figura 2.7 (a) y (b) Viviendas de mampostería de adobe en Pisco afectadas por el terremoto del 2007 (San Bartolomé & Quiun , 2007).....	12
Figura 2.8 (a) Mecanismos de falla ante cargas en el plano. (b) Mecanismos de falla ante cargas fuera del plano. (Restrepo, 2004) .....	13
Figura 2.9 (a) Muro no reforzado antes del ensayo. (b) Muro no reforzado luego del ensayo (Figueiredo, Varum, Costa, Silveira, & Oliveira, 2012) .....	14
Figura 2.10 (a) Muro reforzado. (b) Grafico fuerza vs deriva obtenido del ensayo cíclico del muro reforzado. (Figueiredo, Varum, Costa, Silveira, & Oliveira, 2012).....	14
Figura 2.11 (a) Muro sin refuerzo sometido a cargas cíclicas en su plano. (b) Esquema de reforzamiento utilizando elementos de madera. (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz , 2004)....	15
Figura 2.12 (a) Ciclo histerético del muro sin refuerzo. (b) Ciclo histerético del muro reforzado. (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz , 2004).....	15
Figura 2.13 Modelo de vivienda de adobe de 1 piso no reforzado en el instante de colapso (Quiun, San Bartolomé, & Zegarra, 1996) .....	16
Figura 2.14 (a) Modelo de adobe en un instante del ensayo de simulación sísmica. (b) Modelo de vivienda luego del ensayo. (Tarque S., 2011) .....	17
Figura 2.15 Secuencia de falla del modelo de vivienda de mampostería de adobe (Ersubasi & Korkmaz, 2010).....	17
Figura 2.16 (a) Modelo reforzado con malla de plástico (Aguilar & Blondet, 2007). (b) Modelo reforzado con caña (Tarque, Varum, Silveira, Camata, & Blondet, 2014). .....	18
Figura 2.17 (a) Reparación del módulo mediante inyección de barro. (b) Bloque de falla sostenido por sogas en el módulo de adobe dañado. (Sosa & Soto, 2014). .....	19
Figura 2.18 (a) Modelo de vivienda de adobe no reforzado luego de ser ensayado (cara oeste). (b) Modelo de vivienda de adobe no reforzado luego de ser ensayado (cara este) (Sathiparan, Mayroca , & Meguro, 2010) .....	19
Figura 2.19 Modelo de vivienda de adobe reforzado con bandas de polipropileno luego de ser ensayado. (Sathiparan, Mayroca , & Meguro, 2010).....	20
Figura 2.20 (a) Colocación de malla de alambre electro soldada en el muro. (b) Vivienda de mampostería de adobe reforzada con malla electro soldada. (Zegarra, San Bartolome, & Quiun, 2004).....	21
Figura 2.21 (a) Vivienda de mampostería de adobe de 2 pisos reforzada con malla electro soldada. (b) Interior de vivienda con una franja de tarrajeo retirada previo a la colocación de la malla electro soldada. (Zegarra, San Bartolome, & Quiun, 2004) .....	21
Figura 2.22 (a) Vivienda de adobe reforzada con malla electro soldada luego del terremoto de Tacna del 2001. (b) Vivienda de adobe luego del terremoto de Tacna del 2001. (Zegarra, San Bartolomé, & Quiun, 2004).....	22

Figura 2.23 (a) Viviendas de mampostería de adobe con refuerzo con malla electro soldada luego del terremoto de Ica 2007. (b) Viviendas de mampostería de adobe sin refuerzo colapsadas luego del terremoto de Ica del 2007. (San Bartolomé & Quiun , 2007).....	22
Figure 3.1 Vista frontal de la Iglesia colonial de San Bartolomé (Peña & Manzano, 2015) .	23
Figure 3.2 (a) esfuerzos axiales en la iglesia. (b) Deformación. (Peña & Manzano, 2015) ..	24
Figure 3.3 (a) Deformación y esfuerzos axiales debido al sismo en la dirección longitudinal. (b) Transversal. (Peña & Manzano, 2015).....	24
Figure 3.4 Modelo a escala de la Mezquita Mustafa Pasha (a) vista frontal (b) vista desde arriba (c) vista interior. (Mazzolani, 2015).....	25
Figure 3.5 (a) Modelo computacional de la mezquita (b) Comparación numérica y experimental del modelo no reforzado (c) Modelo reforzado (Mazzolani, 2015).....	26
Figure 3.6 Micro modelamiento detallado (Lourenço , 1996). .....	26
Figure 3.7 Micro modelamiento simplificado (Lourenço , 1996).....	27
Figure 3.8 Patrón de deformación de la mampostería de adobe utilizando la micro modelación simplificada. (Blondet, Camata, Spacone, Tarque, & Varum, 2010).....	27
Figure 3.9 Macro modelamiento (Lourenço , 1996). .....	27
Figure 3.10 (a) Modelo computacional de un muro de adobe. (b) Ensayo de laboratorio. (Blondet, Camata, Spacone, Tarque, & Varum, 2010).....	28
Figure 3.11 Comparación del modelo numérico del muro vs resultados experimentales ante carga monotónica para diferentes resistencias a tracción del adobe (ft) (Tarque S. , 2011)..	28
Figure 3.12 Análisis numérico vs experimentales ante una carga cíclica (Tarque S. , 2011).	29
Figure 3.13 (a) Modelo computacional del muro reforzado (b) ensayo de laboratorio (Hashemi, Bakhshi, Ghannad, Yekrangnia, & Soumi, 2015). .....	29
Figure 3.14 Detalle muro (Hashemi, Bakhshi, Ghannad, Yekrangnia, & Soumi, 2015).....	30
Figure 3.15 (a) Gráfico de histéresis del muro sin refuerzo. (b) Gráfico de histéresis del muro reforzado (Hashemi, Bakhshi, Ghannad, Yekrangnia, & Soumi, 2015).....	30
Figure 3.16 Modelo computacional (a). Ensayo de simulación sísmica (b) (Blondet, Tarque, Camata, Spacone, & Varum, 2013). .....	31
Figure 3.17 Historias de desplazamientos experimentales y numéricos medidos en diferentes puntos del modelo (Blondet, Tarque, Camata, Spacone, & Varum, 2013).....	31
Figure 3.18 (a) Modelo computacional (b) Ensayo de simulación sísmica del modelo de mampostería de adobe (b). (Illampas, Charmpis, & Ioannou, 2014). .....	32
Figure 3.19 (a) Curva fuerza vs desplazamiento del muro lateral. (b) Curva fuerza vs desplazamiento del muro posterior (Illampas, Charmpis, & Ioannou, 2014) .....	33
Figure 3.20 Variabilidad en los ensayos (Costa, Silveira, & Varum, 2012).....	34
Figure 3.21 Curva esfuerzo deformación para ensayos a compresión de carga y descarga (Charmpis, Illampas, & Ioannou, 2016). .....	34
Figure 3.22 Modelo durante un ensayo de simulación sísmica (Torrealva & Vargas, 1984).	35
Figure 3.23 Bloque de falla en un modelo de vivienda reforzado (Sosa & Soto, 2014).....	36
Figure 3.24 Esquema del análisis dinámico al bloque rígido (Sosa & Soto, 2014). .....	37
Figure 3.25 Bloque rígido unido por uno resorte y un amortiguador .....	38
Figure 3.26 Bloques rígidos separados por una grieta pequeña.....	38
Figure 3.27 (a) Muro sostenido por cuerdas sin desplazarse. (b) Desplazado. ....	39
Figure 3.28 Muro rígido simplemente apoyado (izquierda). Modelo en SAP2000 con elementos link para simular el choque y cuerdas (derecha).....	41
Figure 3.29 Comparación entre respuestas en MATLAB y SAP2000. ....	43
Figure 3.30 (a) Módulo reforzado durante el ensayo. (b) Módulo luego del ensayo.....	44
Figure 3.31 Módulo antes del ensayo con los puntos de evaluación marcados en rojo.....	44

Figure 3.32 Esquema del muro posterior desplomándose. (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	45
Figure 3.33 Modelo computacional en Working Model (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	45
Figure 3.34 Modelo computacional 1 en ABAQUS (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	46
Figure 3.35 Modelo computacional 2 en ABAQUS (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	46
Figure 3.36 Modelo computacional 1 en SAP2000 (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	47
Figure 3.37 (a) Modelo 2 sin deformar. (b) Modelo 2 deformado (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	47
Figure 4.1 Módulo de adobe de 2 pisos reforzado con sogas reducido con una escala 1:2 sin tarrajeo colocado sobre la mesa de simulación sísmica.....	49
Figure 4.2. (a) Muro anterior. (b) Muro posterior.....	51
Figure 4.3. (a) Muro longitudinal derecho. (b) Muro longitudinal izquierdo.....	51
Figure 4.4. (a) Viga collar típica de entepiso (b) Entablado del segundo piso.....	52
Figure 4.5. (a) Compactación del barro. (b) Nivelación con regla. (c) Desmoldamiento. (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	52
Figure 4.6. (a) Emplantillado sobre cimentación. (b) Primera hilada sobre base de mortero. (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	53
Figure 4.7 Detalles de emplantillado de esquina (a) tipo 1 (b) tipo 2 (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	53
Figure 4.8. Modelo de vivienda de adobe no reforzado terminado.....	53
Figure 4.9. Reforzamiento típico con sogas de muros de mampostería de adobe (a) y (b) Reforzamiento horizontal. (c) y (d) Reforzamiento vertical (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	54
Figure 4.10. Perforación de la mampostería para insertar el refuerzo con sogas (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	54
Figure 4.11. Nudo 8 antes del tensado. (b) Tensado del nudo. (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).....	55
Figure 4.12. Modelo de mampostería de adobe reforzado con sogas terminado.....	55
Figure 4.13 Ensayo de compresión en pilas a la mampostería de adobe.....	56
Figure 4.14 Grafico esfuerzo vs deformación unitaria.....	56
Figure 4.15 Ensayo de tracción a las sogas de refuerzo.....	57
Figure 4.16 Grafico esfuerzo vs deformación unitaria.....	57
Figure 4.17 Cuadro de flujo del análisis del problema. (Jha, 2004).....	58
Figure 4.18 Señal de desplazamiento en el prototipo.....	62
Figure 4.19 Señal de aceleración en el prototipo.....	62
Figure 4.20 Señal de desplazamiento en el modelo.....	63
Figure 4.21 Señal de aceleración en el modelo.....	63
Figure 4.22 (a) Vista 3D del modelo a escala. (b) Vista en planta del modelo.....	64
Figure 4.23 Vista en elevación (a) muro frontal. (b) muro posterior mostrando la ubicación de los dispositivos.....	64
Figure 4.24 Vista en elevación del muro lateral mostrando la ubicación de los dispositivos.....	65
Figure 4.25 (a) Vista del muro lateral izquierdo. (b) Muro lateral derecho.....	65
Figure 4.26 (a) Desplazamientos D8 y D9. (b) Ubicación de los dispositivos.....	66
Figure 4.27 Desplazamientos. Primer ensayo al módulo no reforzado. Fase 1. (15mm).....	67
Figure 4.28 Desplazamientos. Segundo ensayo al módulo no reforzado. Fase 1. (60mm)....	68

Figure 4.29 Modelo de 2 pisos de mampostería de adobe reforzado con sogas con tarrajeo	69
Figure 4.30 Modelo de 2 pisos reforzado con sogas sin tarrajeo. Ensayo de 60mm	69
Figure 4.31 Desplazamientos. Segundo ensayo al módulo reforzado. Fase 1 (15mm)	71
Figure 4.32 Desplazamientos. Segundo ensayo al módulo reforzado. Fase 1 (60mm)	72
Figure 4.33 Fuerzas en una soga. Segundo ensayo al módulo reforzado (15mm)	73
Figure 4.34 Fuerzas en una soga. Segundo ensayo al módulo reforzado (60mm)	74
Figure 4.35 (a) Modelo de vivienda sin refuerzo. Ensayo (15mm).(b) Acercamiento.	75
Figure 4.36 Modelo de vivienda sin refuerzo luego del ensayo con amplitud de 60mm	76
Figure 4.37 Modelo de adobe reforzado luego del ensayo con amplitud de 15mm	79
Figure 4.38 Modelo de adobe reforzado luego del ensayo con amplitud de 60mm	80
Figure 5.1 Vista del modelo computacional reforzado (izquierda) y sin refuerzo (derecha)	81
Figure 5.2 Esquema del elemento shell (CSI manual, 2016)	81
Figure 5.3 (a) Muro del modelo de vivienda (b) Muro del modelo computacional en Sap2000.	82
Figure 5.4 (a) Modelo computacional en Sap2000 con elementos link en color verde (b) Acercamiento.	83
Figure 5.5 Configuración 1 (izquierda). Configuración 2 (derecha)	83
Figure 5.6 Configuración 1 reforzada (izquierda). Configuración 2 reforzada (derecha)	84
Figure 5.7 Movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 1 sin refuerzo	85
Figure 5.8 Desplazamientos del ensayo al módulo no reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 1. Señal del ensayo con amplitud de 15mm	86
Figure 5.9 Desplazamientos del ensayo al módulo no reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2. Señal del ensayo con amplitud de 60mm	87
Figure 5.10 Movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 1 reforzada	88
Figure 5.11 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 15mm	89
Figure 5.12 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm	90
Figure 5.13 Fuerzas del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 15mm	91
Figure 5.14 Fuerzas del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm	92
Figure 5.15 Movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 2 sin refuerzo	93
Figure 5.16 Desplazamientos del ensayo al módulo no reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 3. Señal del ensayo con amplitud de 15mm	94
Figure 5.17 Desplazamientos del ensayo al módulo no reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 3. Señal del ensayo con amplitud de 60mm	95
Figure 5.18 Movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 2 reforzada	96
Figure 5.19 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 15mm	97
Figure 5.20 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm	98
Figure 5.21 Fuerzas del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 15mm	99

Figure 5.22 Fuerzas del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm. .... 100

Figure 5.23 Espectro de Fourier para las respuestas del punto de medición D9 ..... 101

Figure 5.24 Espectro de Fourier para las respuestas del punto de medición D8 ..... 101

Figure 5.25 Módulo de vivienda con los puntos de medición a evaluar marcados en rojo.. 103

Figure 5.26 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm Puntos de medición D1 y D4..... 105



## Lista de tablas

Tabla 2.1 Terremotos más fuertes ocurridos donde existe gran número de viviendas de mampostería de adobe (USGS, 2006).....	10
Tabla 3.1: Comparación de fuerzas entre los modelos y el ensayo .....	48
Tabla 3.2: Comparación de desplazamientos entre los modelos y el ensayo.....	48
Tabla 4.1: Rigidez equivalente en cada línea de sogas .....	58
Tabla 5.1: Valores de desplazamiento máximos. Amplitud 15mm .....	102
Tabla 5.2: Valores de desplazamiento máximos. Amplitud 60mm .....	102
Tabla 5.3: Valores de desplazamiento máximos. Amplitud 15mm. Reforzado.....	102
Tabla 5.4: Valores de desplazamiento máximos. Amplitud 60mm. Reforzado.....	102
Tabla 5.5: Fuerzas máximas en las sogas. Amplitud 15mm .....	103
Tabla 5.6: Fuerzas máximas en las sogas. Amplitud 60mm .....	103





Página intencionalmente dejada en blanco

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. General

El adobe es un material de construcción muy antiguo y utilizado alrededor de mundo dada su alta accesibilidad y propiedades. La palabra adobe proviene de árabe *atob* cuyo significado es “ladrillo secado al sol”. La utilización de los primeros ladrillos de arcilla se remonta a los 8000 A.C. (Houben & Guillaud, 1994). Fue utilizado en China en la construcción de murallas y viviendas en Qinghai, Tsaidam en el periodo Muomhong alrededor del 2000 A.C. Los fenicios utilizaron la construcción con mampostería de adobe en la península ibérica y el norte de África alrededor del 800 A.C. El esparcimiento del Islam expandió la construcción en adobe como forma rápida de construcción. (Jaquin, Augarde, & Gerrarde, 2008) En el siglo XVI fue utilizada ampliamente por españoles y portugueses en asentamientos en América. Un ejemplo es la ciudad de Sao Paulo, Brasil, la cual es rica en construcciones patrimoniales de este tipo. En el siglo XVIII se utilizó ampliamente en Norte América y Australia por los colonizadores Europeos. (Fernandes, 2008) Con la introducción de materiales más resistentes y nuevas técnicas de construcción la utilización de la mampostería de adobe ha ido decayendo. Pese a su menor utilización se estima que cerca del 30% de la población mundial continua habitando casas de adobe (Houben & Guillaud, 1994).

Las viviendas de adobe son predominantemente utilizadas en zonas rurales con habitantes de bajos recursos. Muchas construcciones ancestrales de adobe perduran hasta ahora y cuentan con un alto grado de valor histórico y cultural como por ejemplo la gran muralla china, el templo de Ramses en Egipto o la pirámide del sol en Teotihuacán México. Muchas de las construcciones de adobe se encuentran construidas en zonas cuyo peligro sísmico no debería ser despreciado. (Figueiredo, Varum, Costa, Silveira, & Oliveira, 2012)

Las viviendas de mampostería de adobe son estudiadas por ingenieros civiles y arquitectos para mejorar la seguridad y calidad de vida de las personas que las habitan. Los ingenieros civiles buscan comúnmente que las viviendas sean resistentes a eventos sísmicos mientras que los arquitectos buscan solucionar problemas como higiene, comodidad, sostenibilidad, protección ante el medio ambiente, entre otras.

La mampostería de adobe es vulnerable ante los terremotos por su naturaleza frágil y por la construcción informal. Existen muchas viviendas construidas en zonas con alto peligro sísmico. Pese a no ser un material idóneo para construir viviendas en estos lugares esta práctica se sigue realizando por personas de bajos recursos por no tener otra alternativa. Terremotos alrededor del mundo han originado el derrumbamiento de estas viviendas causando pérdidas de vidas sustanciales (Blondet, y otros, 2016).

Para poder comprender el comportamiento sísmico de las viviendas de mampostería de adobe se han realizado ensayos de laboratorio de muros y de modelos de vivienda. Estos ensayos (Blondet, y otros, 2011; Quiun, y otros, 1996; Illampas, Charmpis, & Ioannou, 2014; Sathiparan, Mayroca, & Meguro, 2010; Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2004; Torrealva & Vargas, 1984) entre otros, muestran que es necesario incorporarle a la mampostería de adobe algún tipo de reforzamiento. Ensayos a muros y modelos de vivienda de mampostería de adobe como los realizados por (Aguilar & Blondet, 2007; Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017; Sosa & Soto, 2014; Zegarra, San Bartolomé, & Quiun, 2004; Figueiredo, y otros, 2012; Ersubasi & Korkmaz, 2010) muestran que la incorporación de un reforzamiento a la mampostería de adobe mejora notablemente la resistencia, ductilidad, y evita el colapso.

Para contribuir al estudio del comportamiento dinámico de estructuras de mampostería de adobe se realizan modelos computacionales que intentan capturar el comportamiento de la estructura. El objetivo de estos modelos computacionales es el de poder predecir los daños que se originaran en la estructura y poder diseñar el refuerzo que debe tener para evitar el colapso sin tener que recurrir a ensayos de laboratorio. Estos modelos computacionales deben ser validados mediante ensayos. Una vez validados pueden utilizarse en otras estructuras.

Existe cierta dificultad en la modelación computacional de la mampostería de adobe debido a que es un material no lineal, frágil, plástico, de resistencia no constante y el cual se agrieta y forma bloques los cuales interactúan entre si y cambian la dinámica del problema. (Charmpis, Illampas, & Ioannou, 2016; Costa, Silveira, & Varum, 2012; Arroyo, Catalan, & Sanchez, 2013; Sosa & Soto, 2014). Sin embargo algunas calibraciones realizadas a los modelos o métodos de análisis simplificados han logrado brindar buenos resultados como (Tarque, Camata, Varum, Spacone & Blondet, 2014 a; Tarque, Camata, Spacone, Varum & Blondet, 2014 b; Blondet, y otros, 2017; Hashemi, Bakhshi, Ghannad, Yekrangnia, & Soumi, 2015; Illampas, y otros, 2014) entre otros.

## **1.2. Justificación**

En el Perú se ha observado que muchas viviendas de adobe tradicionales han colapsado parcial o totalmente durante los terremotos ocurridos causando pérdidas de vidas y de propiedad (Blondet, y otros, 2016). Las viviendas de adobe son vulnerables a los terremotos debido a la inadecuada construcción de las paredes y el techo, materiales de baja calidad, falta de reforzamiento, y la falta de supervisión y mantenimiento (Zegarra, y otros, 2004)

En los últimos 35 años se han realizado ensayos de simulación sísmica de modelos de vivienda de mampostería de adobe sin refuerzo y reforzados utilizando diferentes propuestas en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Un modelo de vivienda es una estructura construida solo con los componentes esenciales para poder estudiar el problema. La información obtenida de los ensayos de laboratorio ha hecho posible la implementación del código de construcción en adobe para poder tener viviendas más seguras ante eventos sísmicos. Muchas viviendas de adobe que se encuentran en riesgo necesitan de un sistema de reforzamiento económico y fácil de implementar (Quiun, y otros, 1996). El reforzamiento con sogas cumple con estas cualidades. Se han realizado ensayos de simulación sísmica a modelos de vivienda de adobe de 1 piso a escala real reforzados con sogas en el laboratorio de la PUCP en los cuales no se obtuvo colapso parcial o total de la estructura.

En el Perú existen viviendas de mampostería de adobe de 2 pisos. Estas viviendas no tienen reforzamiento y se encuentran en zonas de alto peligro sísmico por lo que podrían colapsar ante un terremoto. Para las viviendas de 2 pisos no se cuenta con resultados de ensayos de laboratorio y no se sabe cómo reforzarlas. Un primer paso para mejorar la seguridad sísmica de este tipo de viviendas es la realización de ensayos de laboratorio de modelos de vivienda de 2 pisos. El laboratorio de estructuras de la PUCP tiene un límite en cuanto al peso máximo de los modelos de vivienda. Por esta razón se realizan ensayos de modelos de vivienda de 2 pisos a escala reducida. Luego de realizar los ensayos se podrá estimar el comportamiento sísmico de estas viviendas y se sabrá como reforzarlas. De esta manera se podrá contribuir a la seguridad de los habitantes de estas estructuras.

A través de un análisis computacional validado mediante ensayos de laboratorio se contribuirá al estudio del comportamiento dinámico de los modelos de vivienda de 2 pisos y la obtención de las fuerzas y desplazamientos en la estructura.

### **1.3. Asunciones**

Se asume que la mampostería de adobe una vez agrietada se comporta como un conjunto de bloques rígidos y que es posible representar el comportamiento dinámico de un modelo de vivienda de mampostería de adobe mediante la modelación computacional de la estructura con bloques. Se asume también que en el modelo computacional la interacción dinámica entre bloques de mampostería de adobe se parece a lo observado en el laboratorio.

### **1.4. Problema general y específico**

El problema general de la presente tesis es que en el Perú existen personas en peligro por habitar viviendas de adobe de 2 pisos que no son antisísmicas y que están construidas en zonas de alta sismicidad.

El problema específico es que se desconoce cómo obtener los desplazamientos y las fuerzas en las sogas de modelos de adobe de 2 pisos sometidos una historia de desplazamiento en la base mediante un análisis numérico utilizando un programa de análisis estructural comercial.

### **1.5. Objetivo general y específico**

El objetivo general es contribuir a la seguridad de las viviendas de adobe de 2 pisos frente a eventos sísmicos mediante el estudio del comportamiento de modelos de vivienda a escala reducida sometidos a ensayos de excitación sísmica simulada.

El objetivo específico del presente trabajo es estimar los desplazamientos y fuerzas en las sogas de modelos de adobe de 2 pisos sometidos a una historia de desplazamiento en la base mediante un análisis numérico y validar los resultados con ensayos de laboratorio.

### **1.6. Hipótesis**

El modelo computacional construido con bloques rígidos puede estimar los desplazamientos y las fuerzas en el reforzamiento con sogas de los modelos de vivienda de mampostería de adobe ensayados en el laboratorio.

### **1.7. Esquema de la tesis**

En el capítulo 2 se muestra la vulnerabilidad de las viviendas de adobe frente a eventos sísmicos y la importancia del reforzamiento. Se muestra el comportamiento que tuvieron estas viviendas durante algunos terremotos ocurridos alrededor del mundo y en el Perú. Se muestra el comportamiento de la mampostería de adobe bajo fuerzas laterales cíclicas en muros y bajo movimientos en la base a modelos de vivienda, y el aumento de la resistencia y ductilidad obtenida tras reforzar la mampostería. Se muestra el comportamiento sísmico de viviendas de adobe utilizando un sistema de reforzamiento frente a un terremoto real ocurrido al sur del Perú.

En el capítulo 3 se muestra el estado del arte del modelamiento computacional de estructuras de adobe. Se muestra el modelamiento de muros y modelos de vivienda de adobe de 1 piso. Se describe la complejidad en el modelamiento computacional de la mampostería de adobe y porque el acercamiento mediante bloques rígidos es una solución adecuada para hallar las fuerzas en el reforzamiento con sogas. Se muestra un acercamiento para estimar las fuerzas en el reforzamiento con sogas de una estructura que contiene 1 bloque rígido que se desprende de la misma. Por último se describe el trabajo realizado por el grupo GERDIS que consistió en la realización de modelos computacionales en diferentes programas y con diferentes idealizaciones del problema con el fin de poder estimar las fuerzas en el reforzamiento. Los modelos se validaron comparando los resultados con un ensayo de laboratorio. Se muestra que

el modelamiento computacional mediante bloques realizado en el programa SAP2000 (CSI, 2018) obtuvo buenos resultados.

En el capítulo 4 se describen los ensayos de laboratorio de los modelos de vivienda de adobe de 2 pisos y el proceso constructivo. Utilizando la teoría de modelos se determinó la amplitud de la señal de comando que se utilizó en la mesa vibradora del ensayo de simulación sísmica del modelo de vivienda a escala 1:2. Se muestran los puntos de medición para la comparación de los resultados entre el modelo computacional y el ensayo. Se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados a los modelos de vivienda de adobe de 2 pisos a escala reducida en cuanto a desplazamientos y fuerzas en el refuerzo.

En el capítulo 5 se muestra la construcción del modelo computacional mediante bloques rígidos. Se muestra la comparación entre los resultados del análisis computacional con los resultados del análisis experimental tanto en desplazamientos como en fuerzas en las sogas.



## 2. COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA DE ADOBE

### 2.1. Vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe

Los terremotos ocurridos alrededor del mundo han traído consecuencias catastróficas para los habitantes de viviendas de mampostería de adobe. La mampostería de adobe es vulnerable a los terremotos por su naturaleza frágil y la construcción informal. Las pérdidas de vidas se dan entre las personas más pobres. Pese a la inseguridad de estas viviendas las personas siguen utilizando esta alternativa por no poder acceder a una mejor opción (Dowling, 2006).

La construcción en mampostería de adobe esta esparcida alrededor del mundo. En la figura 2.1 se muestra los lugares donde existen viviendas de mampostería de adobe. En la figura 2.2 se muestra las zonas donde existe un alto peligro sísmico. Se puede observar de ambas figuras que existen muchas viviendas de adobe construidas en zonas de alto peligro sísmico.



Figura 2.1 Zonas con viviendas de adobe (en color marrón) (De Sensi, 2003)

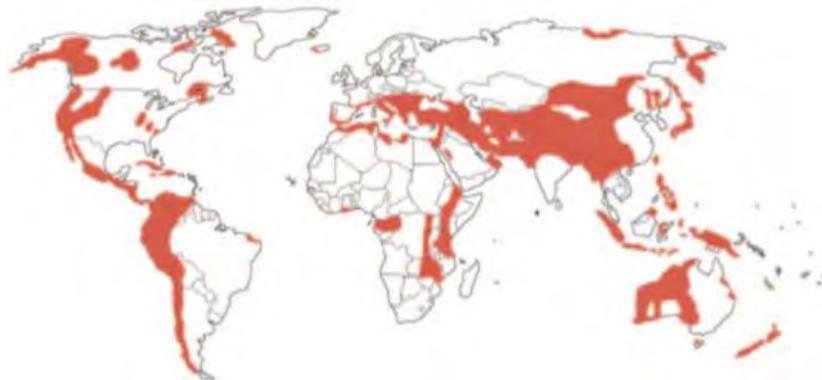


Figura 2.2 Zonas de alto peligro sísmico (en color rojo) (De Sensi, 2003)

En las últimas décadas ha habido cientos de vidas perdidas junto con la pérdida de patrimonio histórico debido a la vulnerabilidad sísmica de estas viviendas. En la figura 2.3 (a) se observa un conjunto de viviendas de adobe derrumbadas luego del terremoto ocurrido en Bam, Irán en el 2003. En la figura 2.3 (b) se observa el daño en una iglesia en Apastapeque, El Salvador luego del terremoto ocurrido en el 2001 que causó la pérdida de 900 vidas.



Figura 2.3 (a) Viviendas colapsadas en Bam, Irán, luego del terremoto del 2003. (b) Iglesia dañada severamente en Apastapeque luego del terremoto del 2001. (Dowling, 2006)

Los terremotos han causado la pérdida de innumerables vidas alrededor del mundo. En la tabla 2.1 se muestra el número de muertes durante los terremotos más significativos ocurridos en los lugares donde existe una gran cantidad de viviendas de mampostería de adobe y la magnitud de los mismos.

Tabla 2.1 Terremotos más fuertes ocurridos donde existe gran número de viviendas de mampostería de adobe (USGS, 2006)

Año	Lugar	Muertes	Magnitud (Richter)
2005	Pakistán (Kashmir)	80361	7.6
2003	Irán (Bam)	31000	6.6
2001	India (Gujarat)	20023	7.7
1999	Turquía	17118	7.6
1990	Irán occidental	45000	7.7
1976	Guatemala	23000	7.5
1976	China (Tangshan)	400000	7.5
1970	Perú	66000	7.9
1948	Turkmenistán (Ashgabat)	110000	7.3
1935	Pakistán (Quetta)	45000	7.5
1932	China (Gansu)	70000	7.6

De la tabla 2.1 podemos apreciar que las viviendas de adobe construidas en zonas de alto peligro sísmico ponen en peligro a sus ocupantes.

En el Perú, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), el 27.9% de las viviendas son de adobe o tapial, 9.5% son de madera, 3.1% de triplay calamina o esteras, 2.1% de quincha, 1% de piedra con barro y 0.6% piedra con cemento (INEI, 2017). Muchas de estas viviendas vulnerables se encuentran en una zona de alta actividad sísmica.

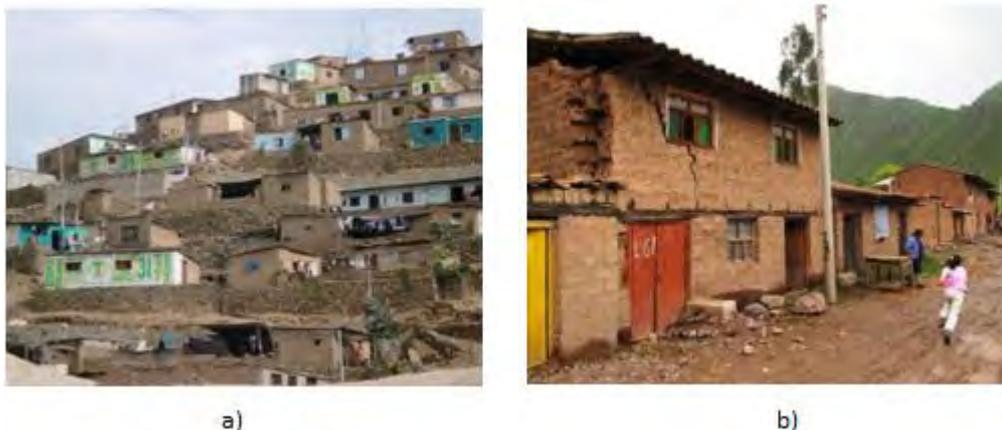


Figura 2.4 (a) Casas de adobe, Lima (Andina, 2014). (b) Casa de adobe de 2 pisos, La Libertad (RPP, 2014)

En la figura 2.4 (a) se muestra un conjunto de casas de adobe en las afueras de la ciudad de Lima, Perú. En la figura 2.4 (b) se muestra una vivienda de adobe de 2 pisos en la sierra liberteña. Ambas viviendas se encuentran en peligro debido a su cercanía a la falla de subducción de la costa peruana.

Debido a la pobreza que existe en el Perú muchas de las construcciones de adobe se realizan de manera informal y sin supervisión. Estas viviendas de adobe cumplen una función básica que consiste en proveer un techo donde vivir a personas de bajos recursos sin embargo no son antisísmicas. Estas estructuras podrían colapsar si ocurriese un terremoto severo. Una gran cantidad de viviendas de mampostería de adobe han colapsado en terremotos pasados. En la figura 2.5 se puede observar una vivienda de adobe luego del terremoto de Chimbote en 1970. Parte del muro colapsó fuera de su plano debido a la inhabilidad del material de soportar la flexión (Quiun, y otros, 1996).



Figura 2.5 Colapso de una vivienda de adobe en Chimbote, Perú debido al terremoto de 1970 (Quiun, San Bartolomé, & Zegarra, 1996).

Durante un terremoto se generan fuerzas de inercia que la mampostería debería soportar. Debido a la baja resistencia a la tracción del adobe las grietas aparecen en las zonas donde comúnmente el muro estará sometido a tracción (Zegarra, y otros, 2004). En la figura 2.6 (a) se muestra una grieta vertical en la esquina de una vivienda que puede iniciar el colapso del muro fuera de su plano ocurrido durante el terremoto de Nazca de 1996. La figura 2.6 (b) muestra las grietas originadas debido al corte diagonal típicamente formadas cuando se utilizan ventanas.



Figura 2.6 (a) Grietas verticales en la esquina del muro de fachada. (b) Grietas diagonales entre ventanas. (Zegarra, San Bartolomé, & Quiun, 2004) (Aguilar & Blondet, 2007)

Las fuerzas sísmicas perpendiculares a un muro producirán fuerzas de flexión. Los muros de fachada de las casas de adobe comúnmente colapsan y en ocasiones lo hacen hacia la calle exponiendo la vida de los transeúntes (Aguilar & Blondet, 2007).

El 15 de agosto del 2007 se produjo un terremoto de magnitud 7.9 en la escala de Richter en la ciudad de Ica, Perú. El terremoto produjo enormes daños a la infraestructura y el colapso de muchas viviendas especialmente las de mampostería de adobe. Se presume que muchos de los daños fueron por la mala calidad de los materiales y la auto-construcción. Muchas de las viviendas desplomadas no cumplieron con las normas de diseño y construcción en adobe elaboradas por SENCICO. El terremoto causo la pérdida de 519 vidas, 90 mil viviendas destruidas y 44 mil afectadas (San Bartolomé & Quiun, 2010).



Figura 2.7 (a) y (b) Viviendas de mampostería de adobe en Pisco afectadas por el terremoto del 2007 (San Bartolomé & Quiun, 2010).

En la figura 2.7 (a) y (b) podemos observar porciones de viviendas de adobe totalmente colapsadas junto a otras viviendas que no han colapsado pero han sufrido grandes daños.

Debido a la falta de supervisión en la construcción de viviendas de adobe algunas personas no calificadas intentan imitar arquitecturas más irregulares y esbeltas hechas comúnmente con materiales nobles. Las viviendas informales de 2 pisos de mampostería de adobe son un claro ejemplo. Estas viviendas ponen en peligro la vida de sus ocupantes si se construyen en zonas de alta actividad sísmica.

La mampostería de adobe solo es capaz de resistir esfuerzos pequeños de tracción o corte y además es muy frágil. Esta característica hace a la mampostería de adobe inapropiada para la

construcción de estructuras en zonas sísmicas donde se requiere la utilización de materiales dúctiles. Durante un sismo moderado es probable que las viviendas de adobe de 2 pisos que no cuenten con algún tipo de reforzamiento colapsen. Existe una necesidad de estudiar el comportamiento de las viviendas de adobe bajo movimientos sísmicos y proponer un método de reforzamiento económico como las propuestas realizadas por (Zegarra, y otros, 2004). Para poder estudiar el comportamiento sísmico se realizan ensayos de laboratorio.

## 2.2. Ensayos a muros de mampostería de adobe

La mampostería soporta las cargas laterales provenientes del movimiento sísmico. Estas cargas sísmicas actúan en diferentes direcciones. Para estudiar el comportamiento sísmico de un muro es ampliamente aceptado simplificar las fuerzas sísmicas actuantes en 2 tipos. La primera es cuando la carga lateral se encuentra en el plano del muro y la segunda cuando la carga lateral actúa de manera perpendicular al muro. Los muros sometidos a cargas laterales en su plano experimentan deformaciones combinadas de flexión y corte dependiendo de la geometría del muro. Los muros sometidos a cargas fuera de su plano presentan mecanismos de colapso que dependen de las condiciones de borde del muro y la geometría. Las fallas fuera del plano se caracterizan por tener desplazamientos grandes que involucra no linealidad del material y geométrica. La fuerza restitutiva del material se desprecia en zonas de rotura. El colapso en realidad se da cuando el muro se transforma en un mecanismo por lo que el movimiento es similar al de un conjunto de bloques rígidos (Restrepo, 2004).

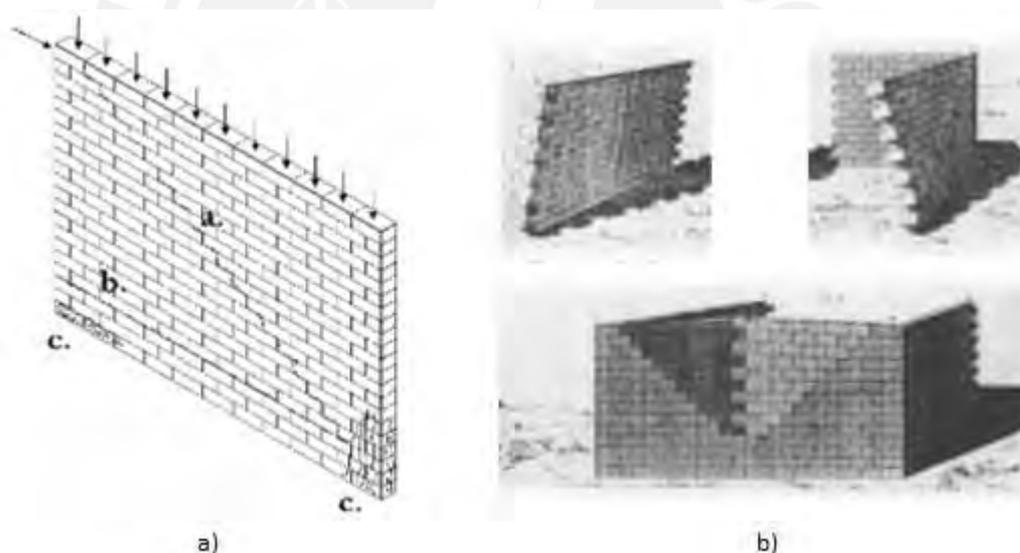


Figura 2.8 (a) Mecanismos de falla ante cargas en el plano. (b) Mecanismos de falla ante cargas fuera del plano (Restrepo, 2004).

En la figura 2.8 (a) se puede observar las fallas principales generadas ante un carga lateral actuando en el plano del muro. La línea “a” corresponde al tipo de falla por corte, la línea “b” al tipo de falla por deslizamiento y los puntos “c” corresponden a las fallas de tracción y compresión por flexión. En la figura 2.8 (b) se puede observar los tres tipos de fallas principales en muros ante cargas laterales actuando perpendicularmente al plano del muro propuestas por primera vez por Rondelet en 1802.

Se han realizado alrededor del mundo un gran número de ensayos para estudiar el comportamiento ante una carga lateral de la mampostería de adobe con y sin reforzamiento. En el 2012 se realizaron ensayos de laboratorio a muros de mampostería de adobe en la universidad de Aveiro en Portugal. Los muros ensayados fueron construidos a escala natural, uno sin

refuerzo y otro con reforzamiento con geomalla. Para tomar en cuenta el efecto de los muros perpendiculares al muro analizado se elaboraron muros en forma de doble T. Se sometieron los muros a cargas laterales cíclicas en su plano. Luego de los ensayos los muros fueron reparados con inyección de mortero y reforzados con una geomalla. Para validar la efectividad del reforzamiento los muros fueron sometidos nuevamente a ensayos de cargas laterales cíclicas. Los bloques de adobe utilizados tuvieron una resistencia a la compresión de 0.46 MPa y a la tracción de 0.15 MPa. (Figueiredo, y otros, 2012)



Figura 2.9 (a) Muro no reforzado antes del ensayo. (b) Muro no reforzado luego del ensayo (Figueiredo, Varum, Costa, Silveira, & Oliveira, 2012)

En la figura 2.9 (a) se observa el muro sin reforzamiento. En la figura 2.9 (b) se observa el estado de daño en el muro luego del ensayo cíclico. La fuerza vertical utilizada fue de 20KN que representa el peso que ejercería la vivienda sobre el muro. La fuerza lateral máxima obtenida fue de 58.2 KN con una deriva de 0.61% El esfuerzo de corte máximo obtenido fue de 57.3 KPa.

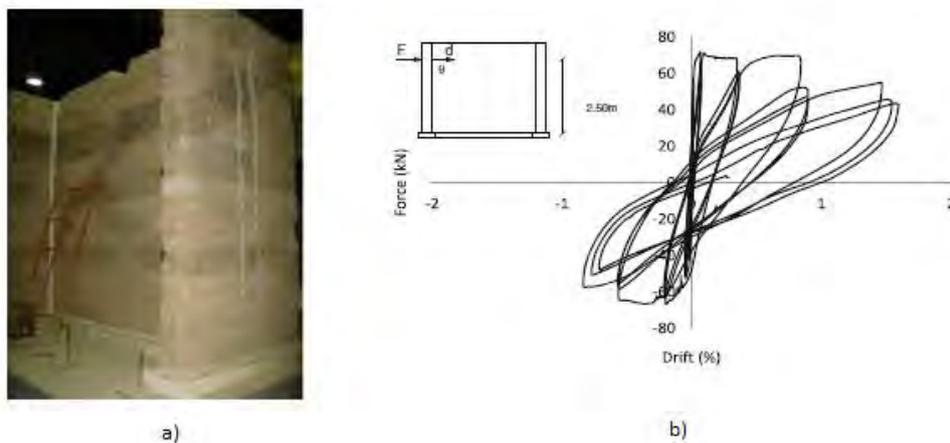


Figura 2.10 (a) Muro reforzado. (b) Grafico fuerza vs deriva obtenido del ensayo cíclico del muro reforzado. (Figueiredo, Varum, Costa, Silveira, & Oliveira, 2012)

En la figura 2.10 (a) se muestra el muro de adobe reforzado. Para el ensayo cíclico se añadió una carga vertical de 20 KN de la misma manera que en el ensayo no reforzado. En la figura 2.10 (b) se observa el grafico de histéresis del muro ensayado. La fuerza cortante máxima fue de 71.75 KN. El esfuerzo cortante máximo fue de 70.6 KPa. La deriva máxima fue de 1.6% con una fuerza cortante de 45KN.

En el 2004 se realizaron ensayos a muros de mampostería de adobe en la universidad Javeriana de Bogotá sometidos a cargas cíclicas laterales actuando en el plano del muro realizados por (Yamin, y otros, 2004). Se realizaron ensayos a muros sin reforzamiento, y con reforzamiento con malla de alambre y confinados con elementos de madera. El reforzamiento fue escogido teniendo en cuenta que sea económico y fácil de implementar. La utilización del reforzamiento con malla de alambre se basó en las investigaciones realizadas en Perú (Zegarra, San Bartolomé & Quiun 2001). El reforzamiento utilizando elementos de madera se basó en las investigaciones llevadas a cabo por el centro de investigación y desarrollo tecnológico (CITEC) (Rodríguez, Fonseca, Yamin, Phillips, & Reyes, 2003).

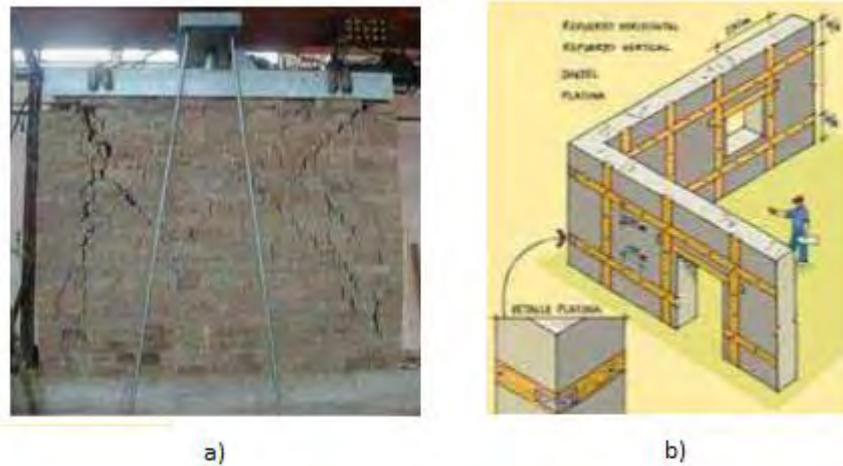


Figura 2.11 (a) Muro sin refuerzo sometido a cargas cíclicas en su plano. (b) Esquema de reforzamiento utilizando elementos de madera. (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2004)

En la figura 2.11 (a) se muestra el muro a escala natural dañado luego de ser sometido a cargas laterales cíclicas. Además el muro estuvo sometido a una carga vertical correspondiente a la carga vertical típica que tendría el muro en una vivienda. En la figura 2.11 (b) se muestra el esquema del reforzamiento con elementos de madera.

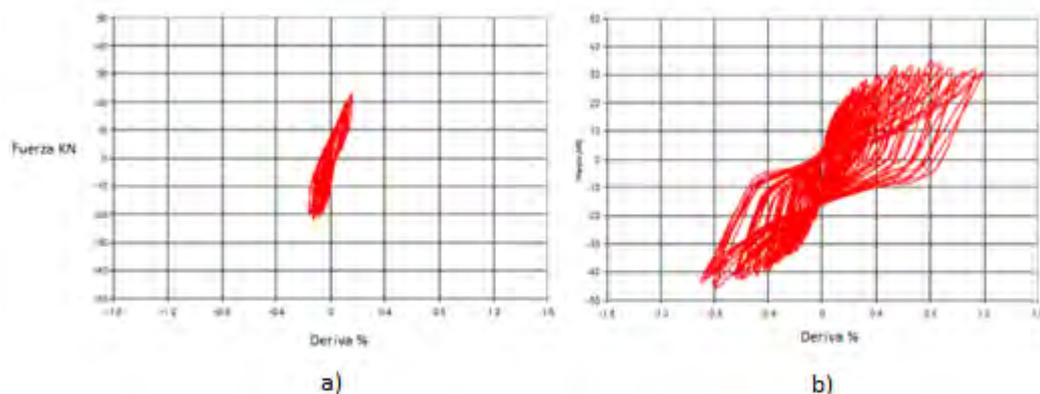


Figura 2.12 (a) Ciclo histerético del muro sin refuerzo. (b) Ciclo histerético del muro reforzado. (Yamin, Phillips, Reyes, & Ruiz, 2004)

Los ensayos de muros ante cargas laterales cíclicas en el plano del muro permitieron estimar algunas propiedades del muro como la rigidez inicial, degradación de la rigidez con la deformación horizontal, ductilidad, resistencia la corte, estimación de la energía disipada y el amortiguamiento. En la figura 2.12 (a) se muestra el comportamiento histerético del muro sin refuerzo ante una carga cíclica actuando en el plano del muro. En la figura 2.12 (b) se muestra el comportamiento histerético del muro reforzado ante una carga cíclica actuando en el plano

del muro el cual muestra un aumento significativo de la resistencia, la capacidad de deformación y la cantidad de energía disipada respecto al muro no reforzado (Yamin, y otros, 2004).

De los ensayos realizados a muros de mampostería de adobe sin refuerzo y reforzados con malla se puede observar que los muros de mampostería de adobe con reforzamiento adquieren un incremento notorio de la fuerza lateral resistente máxima, la ductilidad y su capacidad de disipar energía. Este patrón se observa en todos los ensayos realizados por diferentes investigadores. Además de realizar ensayos de muros de mampostería de adobe es necesario también realizar ensayos de modelos de vivienda.

### 2.3. Ensayos de modelos de vivienda de adobe de 1 piso sin refuerzo

Para contribuir a la comprensión del comportamiento sísmico de viviendas de adobe se realizaron ensayos de modelos de vivienda de adobe en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP) en los últimos 35 años.

El laboratorio de la PUCP cuenta con una mesa de desplazamiento unidireccional para realizar ensayos de simulación sísmica. La mesa es de 4400mm por 4400mm. Tiene una capacidad máxima de desplazamiento de 140mm y puede trabajar con estructuras que no pesen más de 16 toneladas.

En las figuras 2.13 y 2.14 se muestran algunos ensayos realizados a modelos de vivienda de adobe de 1 piso. En los ensayos se observa el agrietamiento y desplome parcial o total de los modelos de vivienda de adobe sin refuerzo.

En la figura 2.13 se puede apreciar que parte del muro perpendicular a la dirección del movimiento de simulación sísmica colapsa junto con parte del muro adyacente. También se pueden apreciar las grietas diagonales que se inician en las esquinas de la ventana hacia los extremos del módulo.



Figura 2.13 Modelo de vivienda de adobe de 1 piso no reforzado en el instante de colapso (Quiun, San Bartolomé, & Zegarra, 1996)

En la figura 2.14 (a) se puede apreciar el colapso total del dintel de la ventana. En la figura 2.14 (b) se puede apreciar el colapso total del muro perpendicular a la dirección del movimiento de simulación sísmica.



Figura 2.14 (a) Modelo de adobe en un instante del ensayo de simulación sísmica. (b) Modelo de vivienda luego del ensayo. (Tarque S., 2011)

Se observa que los módulos ensayados pueden fallar de distintas maneras. El comportamiento dinámico del adobe es complejo y junto con la variabilidad en los procesos constructivos la predicción del comportamiento del módulo puede ser estimada pero difícilmente predicha a la perfección.

La mampostería de adobe se agrieta casi inmediatamente durante un terremoto. Las grietas se expanden y forman líneas de falla. La combinación de estas líneas forma bloques o mecanismos de falla. Estos bloques comúnmente se desprenden de la estructura causando un colapso parcial o total de la misma.

Turquía es otro país entre muchos que cuenta con un gran número de viviendas de mampostería de adobe y que se encuentra en una zona de alta sismicidad. La universidad de Konya en Turquía realizó en el año 2010 ensayos de simulación sísmica de modelos de vivienda de mampostería de adobe. La investigación fue conducida por Ersubasi y Korkmaz.



Figura 2.15 Secuencia de falla del modelo de vivienda de mampostería de adobe (Ersubasi & Korkmaz, 2010)

El ensayo consistió en el análisis dinámico de un modelo de vivienda de mampostería de adobe en escala 1/10 colocado sobre una mesa vibradora que genera un movimiento sinusoidal unidireccional. En la figura 2.15 se puede observar la secuencia de falla del modelo de

mampostería de adobe frente al movimiento de simulación sísmica. El movimiento fue aplicado en las direcciones Este y Oeste. El primer agrietamiento se produjo en la cara norte del espécimen en forma diagonal empezando en las esquinas de la ventana y continuando hacia el exterior del muro. Conforme se aumentó la intensidad del movimiento de simulación sísmica aumentaron las grietas en la cara norte y se formaron grietas en la cara sur. Tras aumentar la intensidad del movimiento se separó el techo de los muros y se formaron bloques de falla. El modelo de vivienda se desplomó por el volteo de uno de los bloques. (Ersubasi & Korkmaz, 2010)

La intención de los ensayos de modelos de vivienda de adobe de 1 piso es la de poder observar el comportamiento sísmico que tendrán con el fin de identificar los puntos débiles, patrones de agrietamiento y mecanismos de colapso para luego poder proponer alguna mejora en el diseño o algún tipo de reforzamiento. Para validar las mejoras en cuanto al reforzamiento se realizan ensayos de modelos de vivienda de mampostería de adobe reforzados.

#### 2.4. Ensayos de modelos de vivienda de adobe de 1 piso reforzados

Se han ensayado en las últimas décadas en el laboratorio de la PUCP modelos de adobe de 1 piso con diferentes tipos de reforzamiento muchos de los cuales han probado tener buen desempeño evitando un colapso parcial o total de la estructura. En la figura 2.16 (a) se muestra un reforzamiento mediante malla plástica de un modelo de vivienda de adobe. El comportamiento bajo simulación sísmica de este reforzamiento fue estudiado por Blondet y Aguilar en el 2006. En la figura 2.16 (b) se muestra un reforzamiento utilizando caña estudiado por Varum, y otros en el 2014. Se puede apreciar que luego de los ensayos ambos modelos presentan un gran daño sin embargo el reforzamiento mantiene la estructura unida y no hay colapso.



Figura 2.16 (a) Modelo reforzado con malla de plástico (Aguilar & Blondet, 2007). (b) Modelo reforzado con caña (Varum, y otros, 2014).

En el 2014 Sosa y Soto estudiaron el comportamiento bajo simulación sísmica de un modelo de 1 piso reforzados con sogas. En este caso primero se evaluó el comportamiento del modelo sin reforzamiento y luego se efectuó un método de reparación y se incorporó el reforzamiento con sogas para luego volver a ensayar el modelo. En la figura 2.17 (a) se muestra la reparación mediante inyección de barro. En la figura 2.17 (b) se muestra el estado final del modelo reforzado luego de efectuar el ensayo de simulación sísmica. Se pudo observar el comportamiento del reforzamiento con sogas como sistema de reparación. (Sosa & Soto, 2014)



Figura 2.17 (a) Reparación del módulo mediante inyección de barro. (b) Bloque de falla sostenido por sogas en el módulo de adobe dañado. (Sosa & Soto, 2014).

La universidad de Tokio realizó en el año 2010 ensayos de simulación sísmica de modelos de mampostería de adobe en escala 1/4 sin reforzamiento y reforzados con bandas de polipropileno desarrollados por (Sathiparan, y otros, 2010). En los ensayos se sometió a ambos modelos a un movimiento del suelo sinusoidal de alta intensidad para representar un terremoto severo.

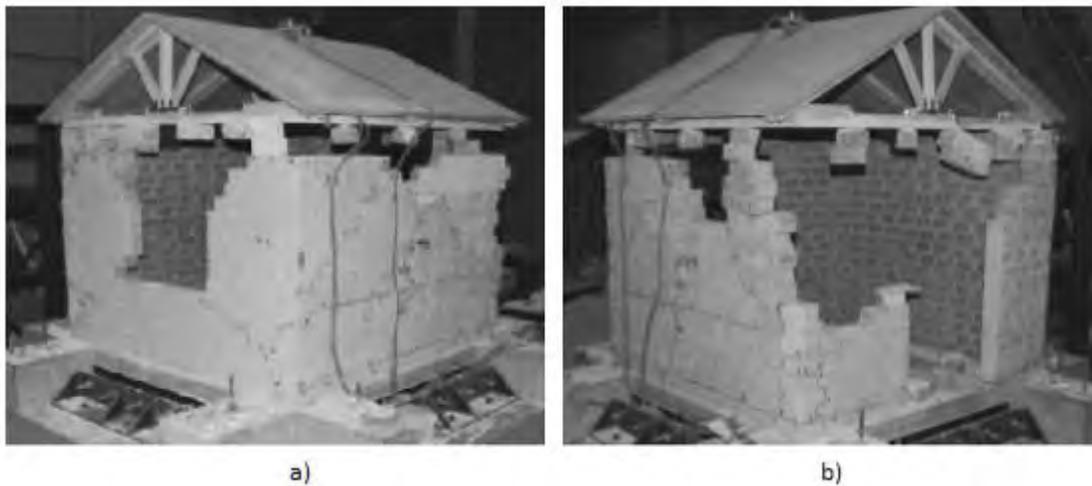


Figura 2.18 (a) Modelo de vivienda de adobe no reforzado luego de ser ensayado (cara oeste). (b) Modelo de vivienda de adobe no reforzado luego de ser ensayado (cara este) (Sathiparan, Mayroca , & Meguro, 2010)

En la figura 2.18 (a) se observa la cara oeste del modelo de vivienda luego del movimiento de simulación sísmica donde se formaron las primeras grietas situadas en las esquinas de la ventana y se propagaron hacia el techo y el piso de forma diagonal. En la figura 2.18 (b) se observa la cara este del modelo de vivienda donde se formaron las segundas grietas situadas en las esquinas superiores de la puerta y se propagaron hacia el techo. Conforme aumento la amplitud del movimiento del suelo las grietas se propagaron y aumentaron su grosor hasta lograr que el techo se separe de las paredes del modelo. El techo termino siendo soportado solo por 2 de los muros que se encontraban en la dirección del movimiento del suelo por lo que los otros dos muros quedaron sin ningún apoyo e iniciarían el desplome fuera de su plano de continuarse el ensayo (Sathiparan, y otros, 2010).



*Figura 2.19 Modelo de vivienda de adobe reforzado con bandas de polipropileno luego de ser ensayado. (Sathiparan, Mayroca , & Meguro, 2010)*

En la figura 2.19 se observa el modelo reforzado con bandas de polipropileno luego del movimiento de simulación sísmica. Las primeras grietas ocurrieron en las esquinas de la puerta y se propagaron hacia el techo. Las segundas grietas ocurrieron en las esquinas de la ventana y se propagaron de forma diagonal hasta los extremos del muro. Utilizando una intensidad del ensayo igual a la utilizada en el modelo no reforzado se observó agrietamiento y trituración pero no hubo desprendimiento de ninguna porción del muro. Al aumentar la intensidad por sobre la utilizada en el modelo no reforzado se observó una pequeña falla local en la parte baja de muro alado de la puerta. No hubo colapso parcial ni total en el modelo de mampostería reforzado con bandas de polipropileno. (Sathiparan, Mayroca , & Meguro, 2010)

Alrededor del mundo se han investigado muchas propuestas de reforzamiento de modelos de vivienda de mampostería de adobe y se los ha sometido a ensayos de simulación sísmica. Otros sistemas han sido implementados en el sitio de la construcción para poder observar el comportamiento sísmico de viviendas de mampostería de adobe reforzadas ante un terremoto real.

## **2.5. Comportamiento sísmico en el Perú de viviendas de adobe reforzadas**

A comienzos de 1994 se empezó en Perú un proyecto de reforzamiento de viviendas de mampostería de adobe utilizando malla de alambre electro soldado colocado como franjas verticales y horizontales simulando vigas y columnas a ambos lados del muro coordinada por la PUCP. El concepto de reforzar el muro como franjas imitando vigas y columnas nació de la observación de los puntos débiles en los ensayos de laboratorio de modelos de vivienda de adobe de 1 piso (Zegarra, y otros, 2004).

En la figura 2.20 (a) se observa la colocación de la malla electro soldada en el muro. Esta malla es conectada por medio de alambres cada 0.5m a través de agujeros hechos en el muro. La malla es tarrajada por mortero con una relación de cemento y arena de 1:4. En la figura 2.20 (b) se observa la vivienda de mampostería de adobe con el reforzamiento con malla electro soldada terminado.



Figura 2.20 (a) Colocación de malla de alambre electro soldada en el muro. (b) Vivienda de mampostería de adobe reforzada con malla electro soldada. (Zegarra, San Bartolome, & Quiun, 2004)

Para el caso de viviendas de mampostería de adobe de 2 pisos se consideró necesario la colocación del refuerzo en todos los muros del primer piso y en el segundo piso usar las franjas de reforzamiento imitando columnas y vigas. En la figura 2.21 (a) se muestra una vivienda de mampostería de adobe de 2 pisos reforzada con malla electro soldada. En la figura 2.21 (b) se muestra una franja de retiro de tarrajeo previo a la colocación de una porción de la malla electro soldada en el segundo piso.

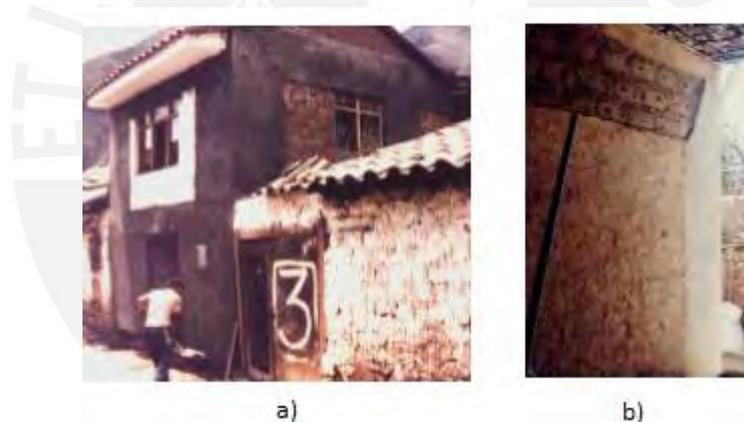


Figura 2.21 (a) Vivienda de mampostería de adobe de 2 pisos reforzada con malla electro soldada. (b) Interior de vivienda con una franja de tarrajeo retirada previo a la colocación de la malla electro soldada. (Zegarra, San Bartolome, & Quiun, 2004)

En el año 1998 se colocó reforzamiento con malla electro soldada a diversas viviendas en Tacna, Guadalupe, Pachacutec, entre otros pueblos del sur del Perú (Zegarra, y otros, 2004). En el año 2001 ocurrió un terremoto de magnitud 8.4 en la escala de Richter que afectó severamente la ciudad de Tacna. En la figura 2.22 (a) se observa una vivienda reforzada con malla electro soldada luego del terremoto. En la Figura 2.22 (b) se observa una vivienda sin reforzamiento luego del terremoto del 2001. Se puede observar que la vivienda con reforzamiento no sufrió daño mientras que la vivienda sin reforzamiento sufrió grandes daños.



Figura 2.22 (a) Vivienda de adobe reforzada con malla electro soldada luego del terremoto de Tacna del 2001. (b) Vivienda de adobe luego del terremoto de Tacna del 2001. (Zegarra, San Bartolomé, & Quiun, 2004)

En el año 2007 ocurrió un terremoto de magnitud 7.9 en la escala de Richter en Ica. El terremoto produjo muchos daños en construcciones tradicionales de adobe. En la figura 2.23 (a) se puede observar una vivienda de mampostería de adobe reforzada con malla electro soldada luego del terremoto de Ica 2007. Se puede observar que las viviendas reforzadas no tuvieron colapso parcial o total de la estructura. En la figura 2.23 (b) se observa un grupo de viviendas de adobe colapsadas luego del terremoto de Ica del 2007.



Figura 2.23 (a) Viviendas de mampostería de adobe con refuerzo con malla electro soldada luego del terremoto de Ica 2007. (b) Viviendas de mampostería de adobe sin refuerzo colapsadas luego del terremoto de Ica del 2007. (San Bartolomé & Quiun, 2010)

Se puede observar que muchas de las viviendas de mampostería de adobe construidas en el Perú son vulnerables a los movimientos sísmicos del suelo y necesitan de algún tipo de reforzamiento. Las viviendas reforzadas con malla electro soldada tuvieron un comportamiento sísmico idóneo ante los terremotos ocurridos (San Bartolomé & Quiun, 2010).

El estudio del comportamiento sísmico de las viviendas de mampostería de adobe con o sin refuerzo no solo se limita a los ensayos empíricos o a los resultados observados en campo sino también se puede estudiar de manera numérica a través de modelos matemáticos que logren capturar el comportamiento dinámico de la estructura y nos permitan estimar los desplazamientos y fuerzas en el refuerzo.

### 3. ANÁLISIS NUMÉRICO DE MODELOS DE VIVIENDA DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE

#### 3.1. Modelamiento computacional de la mampostería de adobe

##### 3.1.1. Modelamiento de estructuras de mampostería

Las estructuras de mampostería más vulnerables ante un sismo comúnmente son las que tienen una cierta antigüedad. Estas estructuras tienen un valor histórico por lo cual se tiene un límite en cuanto a las técnicas de reforzamiento comúnmente usadas en otro tipo de estructuras porque podrían dañar su valor cultural. Para contribuir al estudio de la protección de estas estructuras se realizan modelos computacionales y se valida el modelo mediante ensayos de laboratorio. El objetivo de realizar modelos y ensayos es el de estimar el daño en la estructura, mecanismos de falla y proponer un sistema de reforzamiento.

Antes de realizar una intervención de reforzamiento en estructuras históricas se debe comprender bien el comportamiento sísmico de la estructura con el fin de alterarla lo menos posible. En el 2015 se realizó un modelamiento numérico de iglesias mexicanas pertenecientes a la época colonial efectuadas por Peña y Manzano (2015). Las iglesias coloniales mexicanas son estructuras grandes con geometrías complejas construidas con un material altamente no lineal por lo que la modelación no es sencilla. En la figura 3.1 se muestra la iglesia de San Bartolomé ubicada al norte de la ciudad de México la cual fue evaluada. Las propiedades de la mampostería se obtuvieron utilizando información histórica y ensayos no destructivos.



Figure 3.1 Vista frontal de la Iglesia colonial de San Bartolomé (Peña & Manzano, 2015)

El modelo numérico de la iglesia se construyó utilizando elementos sólidos rectangulares. Se utilizó 25500 elementos y el modelo contó con 96000 grados de libertad. No se consideró al techo como un diafragma rígido. Se realizaron estudios de vibración ambiental para calibrar las propiedades dinámicas del modelo numérico. Se colocaron acelerómetros tanto en muros como en la cúpula de la iglesia para obtener la respuesta ambiental. Con las propiedades dinámicas definidas se construyó el modelo numérico. En la figura 3.2 se muestra (a) los esfuerzos axiales en el modelo numérico de la iglesia debido a la carga vertical (b) la deformación.

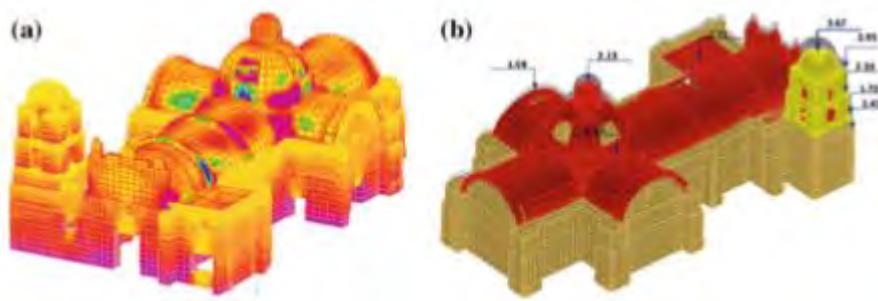


Figure 3.2 (a) esfuerzos axiales en la iglesia. (b) Deformación. (Peña & Manzano, 2015)

Se realizó un análisis modal espectral utilizando el espectro del código mexicano. La figura 3.3 muestra las deformaciones y esfuerzos axiales en el modelo resultado del análisis sísmico (a) sismo en la dirección longitudinal (b) transversal. Se observó una concentración de esfuerzos en la base de la torre y el domo. Los resultados del análisis sísmico del modelo numérico son consistentes con los registros históricos de los daños comúnmente observados en iglesias coloniales luego de un terremoto (Peña & Manzano, 2015).

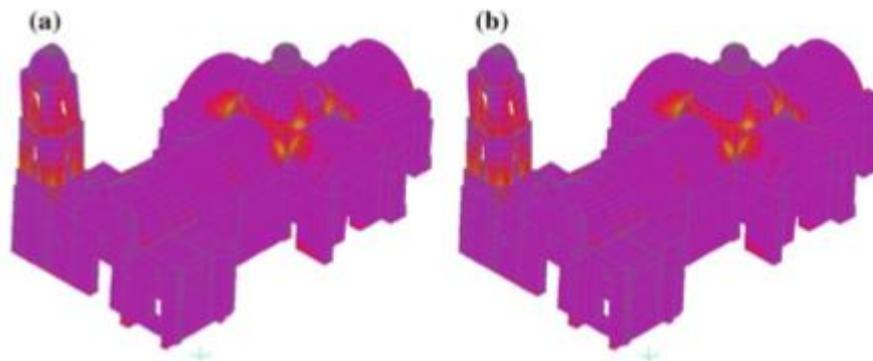


Figure 3.3 (a) Deformación y esfuerzos axiales debido al sismo en la dirección longitudinal. (b) Transversal. (Peña & Manzano, 2015)

En el año 2015 se realizó un proyecto de modelamiento computacional y ensayo de laboratorio de la Mezquita Mustafa Pasha ubicada en Skopje, Macedonia, elaborado por Mazzolani (2015). El proyecto consistió en realizar ensayos de simulación sísmica biaxial de modelos a escala reducida de la mezquita con y sin la incorporación de un sistema de reforzamiento. Ambos ensayos se comparan con modelos computacionales con el fin de predecir e interpretar los resultados.

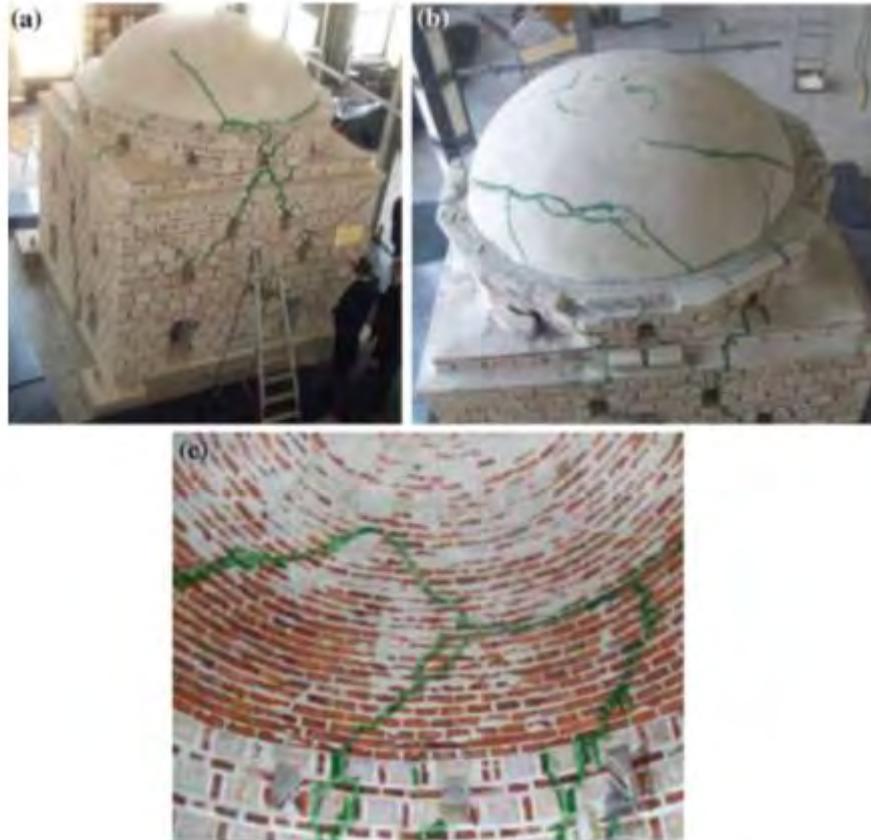


Figure 3.4 Modelo a escala de la Mezquita Mustafa Pasha (a) vista frontal (b) vista desde arriba (c) vista interior. (Mazzolani, 2015)

En la figura 3.4 se muestra el modelo a escala de la mezquita luego del ensayo de simulación sísmica. Se puede observar las grietas formadas y los posibles mecanismos de falla. Se utilizó el acelerograma del sismo de Montenegro-Petrovac. Los agrietamientos iniciales aparecieron con una aceleración máxima de 0.42g y la parte superior del minarete de la mezquita colapso. Luego del ensayo se incorporó un sistema de reforzamiento con bandas de fibra de carbono y se aplicó un sistema de reparación con inyección de mortero. Se ensayó el modelo reforzado y se observó un agrietamiento bajo una aceleración máxima de 1.2g. Se observaron grietas adicionales pero no hubo colapso de la estructura. El domo de la mezquita experimentó un desplazamiento relativo de 8cm.

El modelo computacional fue elaborado en el programa ABAQUS. En la figura 3.5 se muestra (a) el modelo computacional elaborado de la mezquita, (b) comparación numérica y experimental del modelo no reforzado respecto a la aceleración del suelo vs desplazamiento relativo del domo (c) y del modelo reforzado. Se observa que la distribución de la primera deformación plástica predicha por el modelo numérico tiene un gran parecido al patrón de agrietamiento observado en el ensayo de laboratorio. La respuesta experimental resultó mayor debido a la carga cíclica. Los resultados numéricos y experimentales mostraron una buena correlación (Mazzolani, 2015).

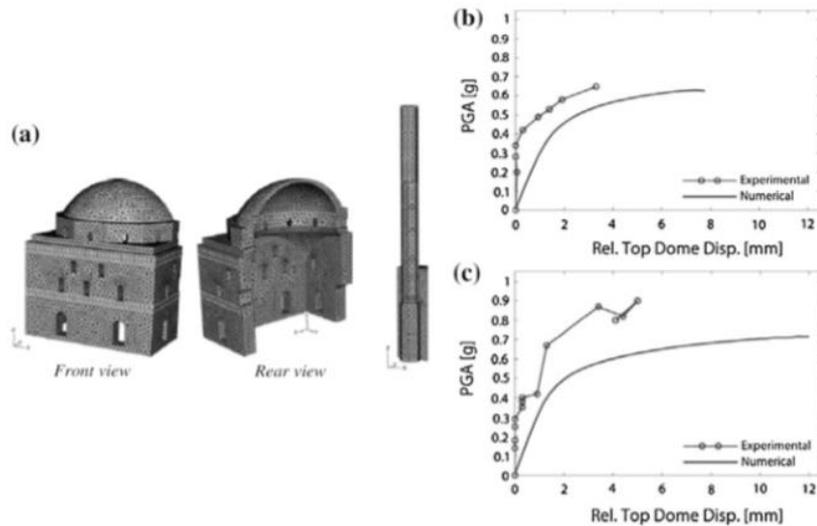


Figure 3.5 (a) Modelo computacional de la mezquita (b) Comparación numérica y experimental del modelo no reforzado (c) Modelo reforzado (Mazzolani, 2015)

### 3.1.2. Acercamientos simplificados en el modelamiento computacional

Es difícil realizar un análisis sísmico a estructuras de mampostería de adobe debido a que utiliza dos elementos que son el ladrillo de adobe y el mortero. Estos elementos aunque están hechos de adobe no garantizan un comportamiento monolítico en la mampostería. Otro componente que añade dificultad al análisis es que el adobe tiene una alta resistencia a la compresión pero una baja resistencia a la tracción. Debido a estos factores el método de análisis más apropiado es un análisis no lineal pero requiere de un alto costo en cuanto a la determinación de las propiedades del material, y el tiempo de elaboración y análisis del modelo. (Onder, 2006).

Los modelos computacionales muy complejos podrían hacer que el proceso de análisis tarde demasiado. Siempre es conveniente trabajar con modelos simples y razonables que logren capturar el comportamiento dinámico. Para lidiar con la complejidad de modelar la mampostería el Dr. Paulo Lourenço de la Universidad de Porto, Portugal, propuso en 1996 tres acercamientos basados en la escala y el detalle requerido en el análisis. Estos acercamientos son “micro modelamiento detallado”, “micro modelamiento simplificado” y “macro modelamiento”.

En el micro modelamiento detallado las unidades de mampostería y el mortero se modelan como elementos continuos. La interface entre el mortero y la unidad de ladrillo se representa como elementos discontinuos de manera que la interface también pueda ser estudiada. En la figura 3.6 se muestra la unidad, mortero e interface.

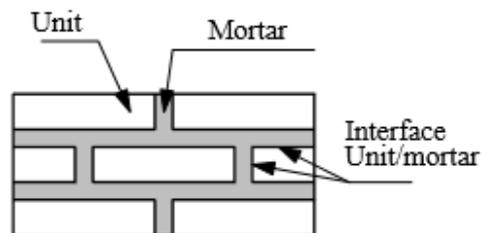


Figure 3.6 Micro modelamiento detallado (Lourenço, 1996).

En el micro modelamiento simplificado se modela la unidad de mampostería y la interface. La mampostería se modela más grande de lo que realmente es y el mortero no se modela. La interface se modifica de manera que el comportamiento sea similar al micro modelamiento detallado. Este modelamiento resulta más sencillo de analizar para la computadora. Alguna precisión se pierde debido a que no se utiliza el efecto de poisson del mortero. En la figura 3.7 se muestra una imagen de la representación de la micro modelación simplificada.

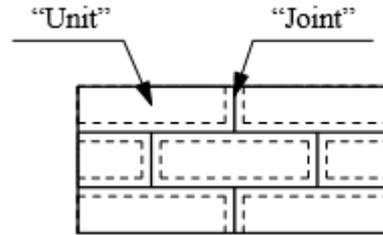


Figure 3.7 Micro modelamiento simplificado (Lourenço , 1996).

En la figura 3.8 se muestra un muro modelado utilizando el micro modelamiento simplificado. Se puede observar que al aplicar fuerzas laterales grandes las unidades de mampostería se separan.

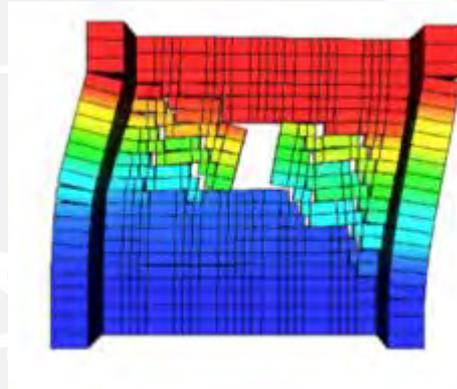


Figure 3.8 Patrón de deformación de la mampostería de adobe utilizando la micro modelación simplificada. (Tarque, Camata, Varum, Spacone, & Blondet, 2014)

En el macro modelamiento no se distingue entre las unidades de mampostería y el mortero. La mampostería se modela como una unidad entera continua. El macro modelamiento se utiliza preferiblemente cuando la mampostería es lo suficientemente grande de manera que los esfuerzos sean uniformes. Este tipo de modelamiento reduce el tiempo de cálculo enormemente comparado con los anteriores modelos. En la figura 3.9 se muestra un esquema de este modelamiento.

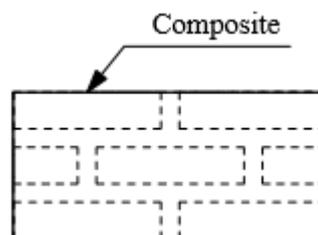


Figure 3.9 Macro modelamiento (Lourenço , 1996).

Aunque la información experimental para la elaboración de modelos numéricos es escasa es posible caracterizar el comportamiento del material lo suficientemente bien para elaborar un

análisis numérico no lineal. Para esto es necesaria la colaboración entre las comunidades de científicos numéricos y experimentales (Lourenço , 1996).

### 3.1.3. Modelamiento computacional de muros de adobe sin refuerzo

En el año 2010 se elaboraron modelos computacionales no lineales de muros de adobe sometidos a fuerzas monotónicas y cíclicas. En estos modelos se consideró las técnicas de macro y micro modelamiento explicadas anteriormente. Los muros fueron ensayados en el laboratorio de la PUCP por (Tarque, y otros, 2014 a) para luego ser comparados con los modelos computacionales. El proceso de calibración fue necesario debido a que no se contó con información respecto a todas las propiedades mecánicas del adobe. En la figura 3.10 (a) se puede observar el modelo computacional del muro bajo la acción de una fuerza lateral y en la figura 3.10 (b) el ensayo de laboratorio.

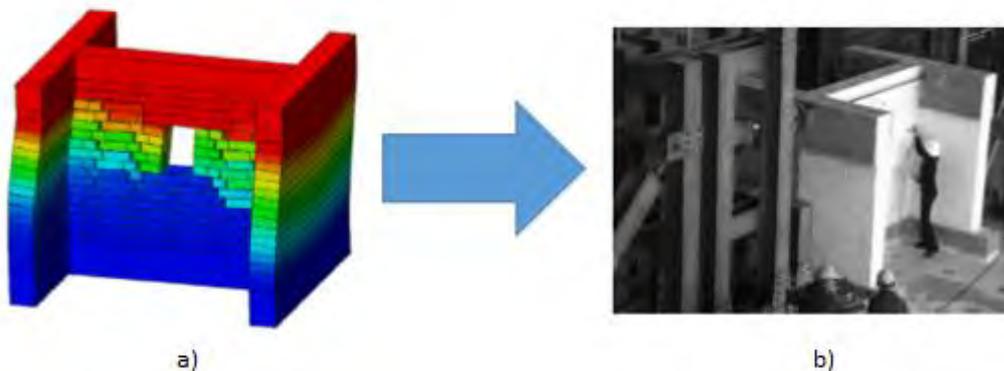


Figure 3.10 (a) Modelo computacional de un muro de adobe. (b) Ensayo de laboratorio. (Tarque, Camata, Varum, Spacone & Blondet, 2014 a)

En la figura 3.11 se puede observar los resultados del modelo computacional del muro para diferentes resistencias al esfuerzo máximo a tracción comparados con los resultados del ensayo de laboratorio para una carga monotónica. En la figura 3.12 se observan los gráficos de histéresis obtenidos del modelo computacional y el ensayo de laboratorio para una carga cíclica. En ambas figuras se puede observar una alta correlación entre el modelo computacional y el ensayo (Tarque, y otros, 2014 a).

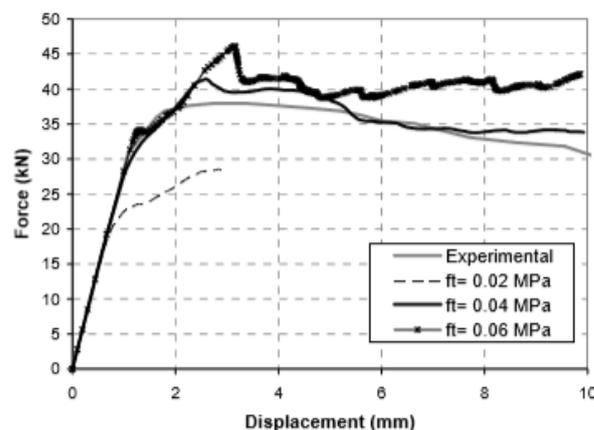


Figure 3.11 Comparación del modelo numérico del muro vs resultados experimentales ante carga monotónica para diferentes resistencias a tracción del adobe ( $f_t$ ) (Tarque S. , 2011).

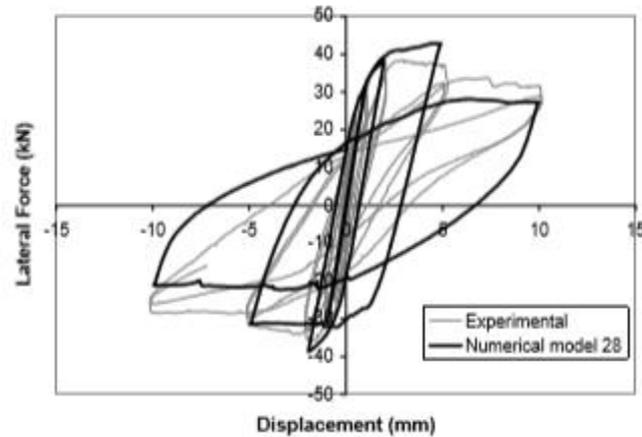


Figure 3.12 Análisis numérico vs experimentales ante una carga cíclica (Tarque S. , 2011).

En el 2015 se condujeron estudios de modelación numérica y validación mediante ensayos de laboratorio de muros de mampostería de adobe con y sin reforzamiento llevados a cabo por (Hashemi, y otros, 2015) en la universidad tecnológica de Teherán, Irán. Los muros se sometieron a una carga pseudo-estática cíclica en su plano y una carga vertical que simula el peso que tendría el muro en una vivienda.

Se construyó un muro en forma de “I” para capturar la influencia de los muros perpendiculares al muro de análisis. El modelamiento fue realizado en el programa ABAQUS. Se utilizó un micro modelamiento simplificado para la modelación del muro. En la figura 3.13 (a) se observa el modelo computacional en ABAQUS del muro reforzado (b) ensayo de laboratorio del muro reforzado.

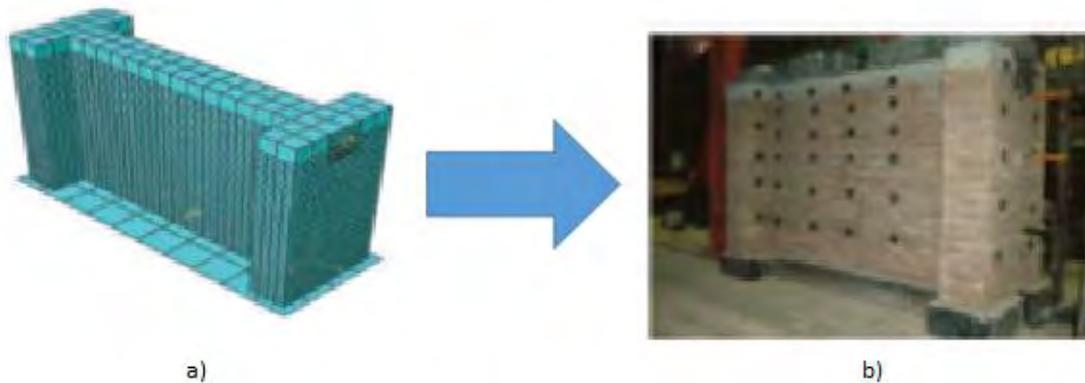


Figure 3.13 (a) Modelo computacional del muro reforzado (b) ensayo de laboratorio (Hashemi, Bakhshi, Ghannad, Yekrangnia, & Soumi, 2015).

En la modelación computacional por el acercamiento de micro modelamiento simplificado se modela un bloque de albañilería y la interface. Los bloques se modelaron como elementos elásticos continuos. La interface se modelo como “nodo de espesor promedio cero” utilizando la librería del programa. En el modelo computacional los cimientos del muro se asumen como un cuerpo totalmente rígido el cual está perfectamente adherido al muro.

En la figura 3.14 se observa un esquema del ensayo al muro. Para poder aplicar la fuerza lateral y vertical fue necesaria la colocación de una viga en la parte superior del muro. Debido a que no fue observado ningún daño en la viga ni en la unión viga-muro durante el ensayo se asume un comportamiento elástico y una perfecta adherencia entre la viga y los bloques de adobe



En la figura 3.16 (a) se puede observar el modelo computacional del módulo de adobe y en la figura 3.16 (b) el modelo de vivienda de adobe durante el ensayo.



Figure 3.16 Modelo computacional (a). Ensayo de simulación sísmica (b) (Tarque, Camata, Spacone, Varum & Blondet, 2014 b).

En el modelo computacional se puede observar el patrón de agrietamiento. Las primeras grietas aparecen en las esquinas de las ventanas y se expanden de manera diagonal hacia el exterior. En múltiples ensayos se apreció esta característica mas no aparece con claridad en el ensayo realizado.

También se pudo observar una grieta vertical en la intersección del muro con ventana y el muro perpendicular a la dirección del movimiento de la base tanto en el modelo computacional como en el ensayo. Estos patrones de agrietamiento en el modelo computacional pueden servir para predecir los mecanismos de colapso y ser usados en reforzamiento.

En la figura 3.17 se presentan la comparación de los resultados entre el análisis computacional y el ensayo de laboratorio.

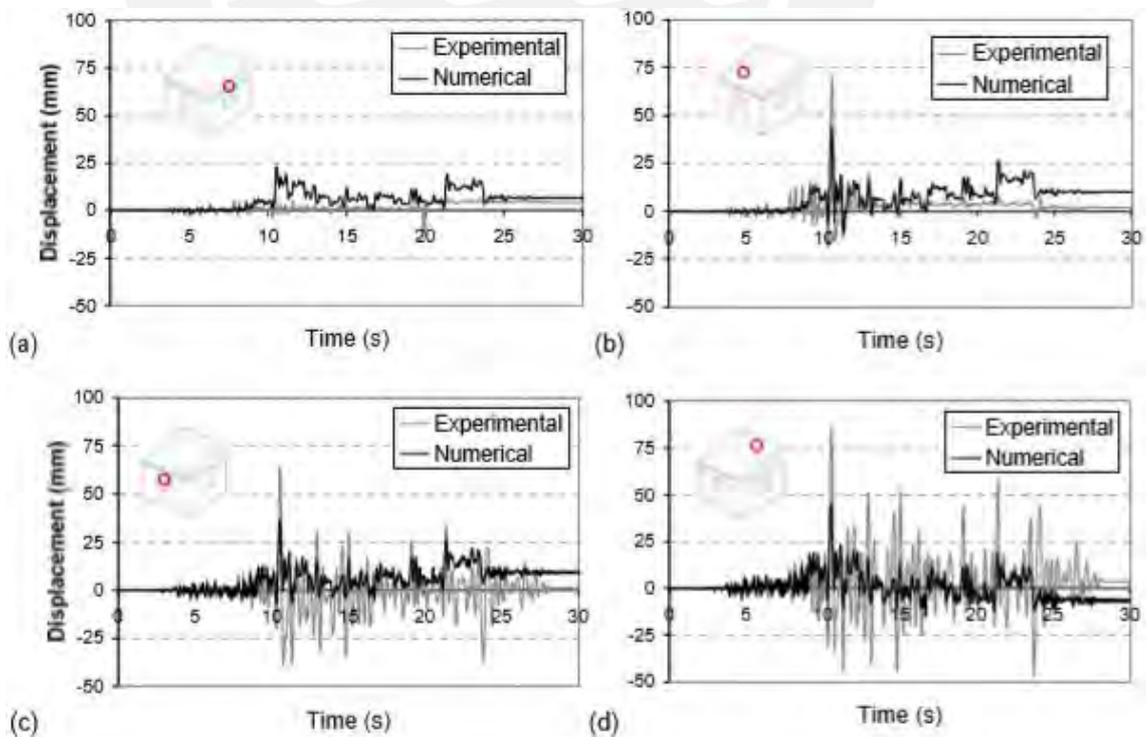


Figure 3.17 Historias de desplazamientos experimentales y numéricos medidos en diferentes puntos del modelo (Tarque, Camata, Spacone, Varum & Blondet, 2014 b).

En la figura 3.17 (a) y (b) se muestran las lecturas del desplazamiento relativo de los muros paralelos a la dirección del movimiento sísmico. Por simetría estas dos figuras deberían tener resultados del ensayo similares pero no los tienen posiblemente debido a que cedió el medidor de desplazamiento. Para todos los casos se observa que el desplazamiento máximo relativo se produjo a los 10 segundos.

En la figura 3.17 (c) y (d) se muestra el desplazamiento del muro frontal y posterior los cuales luego del desplazamiento máximo oscilan respecto a una nueva posición de equilibrio lo que indica que hay un desplazamiento inelástico residual. El efecto de balanceo (separación y rotación) de los bloques de mampostería formados por el agrietamiento no se incluyó en el modelo computacional debido a la imposibilidad de eliminar los elementos finitos ubicados en la posición donde se forman las grietas. No fue posible lograr una interacción independiente entre los bloques formados. Sin embargo el modelo logro capturar el comportamiento sísmico y mecanismos de falla (Tarque, y otros, 2014 b).

En el año 2014 se condujo un ensayo de simulación sísmica a un modelo de vivienda de mampostería de adobe de 1 piso a escala reducida 1:2 en la universidad de Cyprus realizada por (Illampas, y otros, 2014). Se realizó también un análisis dinámico no lineal de un modelo computacional del modelo de vivienda de adobe. Se comparó los resultados del análisis computacional y experimental. La validación del modelo computacional fue verificada cuantitativa y cualitativamente a través de los patrones de daño en la mampostería de adobe y las curvas fuerza vs desplazamiento.

El modelo computacional se construyó mediante elementos finitos en el programa ABAQUS y se utilizó un acercamiento mediante macro modelación que consiste en una mampostería continua con un modelo del material de daño y plasticidad. En la figura 3.18 (a) se observa el modelo computacional. En la figura 3.18 (b) se observa el ensayo del modelo de vivienda de mampostería de adobe a escala reducida 1:2. Para propósitos de la calibración del modelo computacional se realizó previamente un ensayo a un modelos de vivienda de mampostería de adobe a escala reducida 1:2 ante una carga laterales estática.

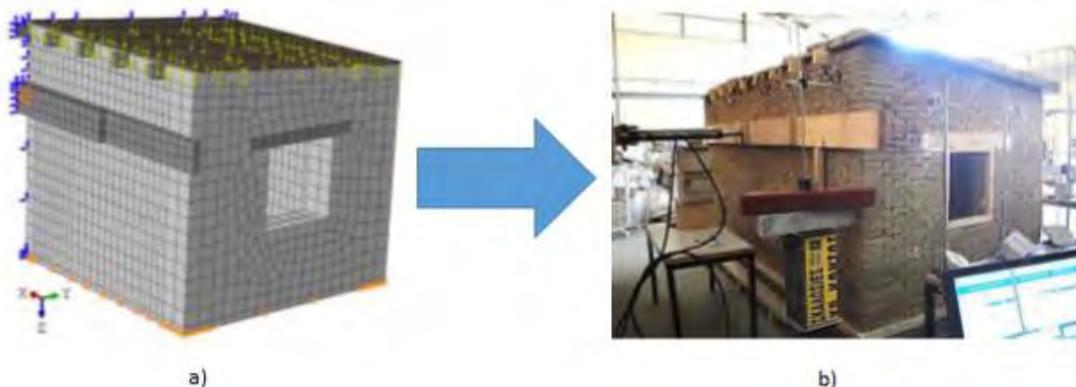


Figure 3.18 (a) Modelo computacional (b) Ensayo de simulación sísmica del modelo de mampostería de adobe (b). (Illampas, Charmpis, & Ioannou, 2014).

El modelo de daño y plasticidad utilizado para el material se encontró adecuado ya que logra capturar macroscópicamente el comportamiento de la mampostería y las zonas de falla. Los resultados del análisis indican una alta similitud entre el análisis experimental y computacional. En la figura 3.19 se muestra las curvas fuerza vs desplazamiento tanto del análisis numérico y experimental (a) del muro lateral y (b) el muro posterior.

Existe una gran similitud entre los resultados hasta antes de que exista un gran agrietamiento en el muro. La caída en la resistencia final del muro no fue posible de capturar en el modelo

computacional como se observa en ambas imágenes de la figura 3.19. Esto se debió a que la separación física de las grietas generadas en la mampostería no fue posible de simular mediante un modelo computacional homogéneo continuo bajo el acercamiento de macro modelación. La respuesta estructural homogénea se pierde tan pronto comienza la caída en la resistencia final y se dan los diferentes movimientos en el muro debido a la formación de bloques de colapso (Illampas, y otros, 2014).

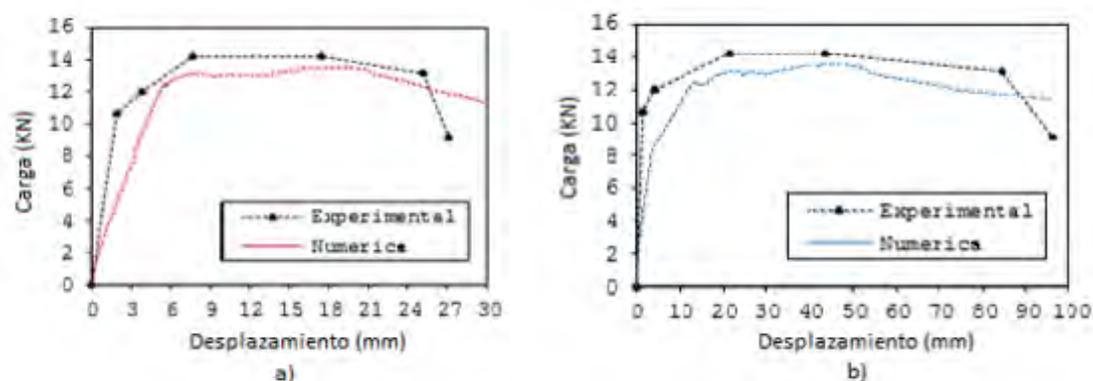


Figure 3.19 (a) Curva fuerza vs desplazamiento del muro lateral. (b) Curva fuerza vs desplazamiento del muro posterior (Illampas, Charnpis, & Ioannou, 2014)

## 3.2. Complejidad en el modelamiento

El problema en el modelamiento de la mampostería de adobe es que es un material complejo principalmente por las siguientes razones:

### 3.2.1. Resistencia a la compresión y tracción diferentes

Primero está el hecho de que el adobe resiste la compresión mucho mejor que la tracción. Además, el módulo de elasticidad a compresión es diferente que el módulo de elasticidad a tracción. Desde este punto el problema se transforma en un análisis no lineal. En la tabla 3.1 se muestra los resultados de ensayos de compresión y tensión por flexión para varias muestras. Se encontró una resistencia a compresión entre 0.59 y 1.46 MPa y una resistencia a la tracción entre 0.13 y 0.41 MPa. Se observó que existe una variabilidad máxima de hasta el 100% en estos resultados. Además, el contenido de humedad en el adobe, como material, puede afectar la resistencia hasta un 50% (Arroyo, y otros, 2013).

Tabla 3.1 Resistencias promedio a la compresión y tracción (Arroyo, Catalan, & Sanchez, 2013)

Región	Resistencia promedio a la compresión, $f_c$ (MPa)	C.V.	Resistencia promedio a la tensión por flexión, $f_b$ (MPa)	C.V.
Norte	0.79	0.28	0.2	0.24
Tierra	1.46	0.22	0.41	0.25
Montaña	1.19	0.25	0.33	0.21
Centro	1.29	0.27	0.32	0.2
Acapulco	1.16	0.24	0.23	0.21
Costa	0.59	0.21	0.13	0.26
Costa	1.27	0.26	0.29	0.23

### 3.2.2. Variabilidad en los resultados de ensayos

Una segunda razón de complejidad es la alta variabilidad en los resultados de laboratorio. Varum y Silveira estudiaron en 2012 la influencia de los tipos de ensayos en la resistencia a la compresión de especímenes de adobe. En la figura 3.20 se observa los ensayos realizados para diferentes muestras obtenidas de 3 viviendas con nombre H12, H13 y H20. Para cada vivienda se realizaron 8 ensayos a compresión, 4 con especímenes cúbicos y 4 con forma cilíndrica. Se puede observar que la forma del espécimen (cubo o cilíndrico) puede originar una variación hasta del 100% en los resultados. La variación entre ensayos de especímenes con la misma forma puede ser de hasta el 50%. La variación de la resistencia a la compresión para muestras de diferentes viviendas puede llegar al 200%.

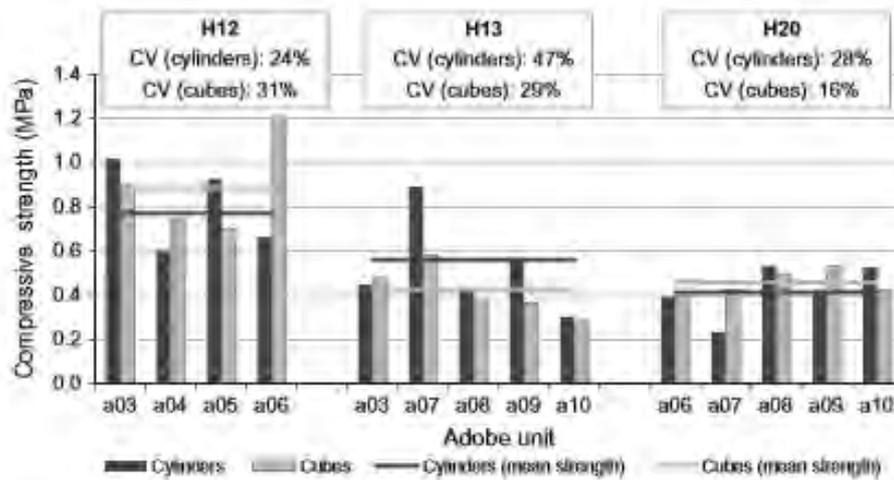


Figure 3.20 Variabilidad en los ensayos (Costa, Silveira, & Varum, 2012).

### 3.2.3. Comportamiento plástico

Una tercera razón está en que la mampostería de adobe es muy poco elástica a compresión comparada con otros materiales. Algunos ensayos monotónicos de carga y descarga fueron realizados a la mampostería de adobe por Illampas, Ioannou y Charmpis en 2016. Según estos ensayos el comportamiento a compresión de la mampostería de adobe es altamente no lineal y se caracteriza por una intensa plasticidad y deformación. En la figura 3.21 se puede apreciar la curva esfuerzo deformación de un ensayo de carga y descarga. Se observa que al retirarse la carga el material apenas regresa a su posición de deformación inicial.

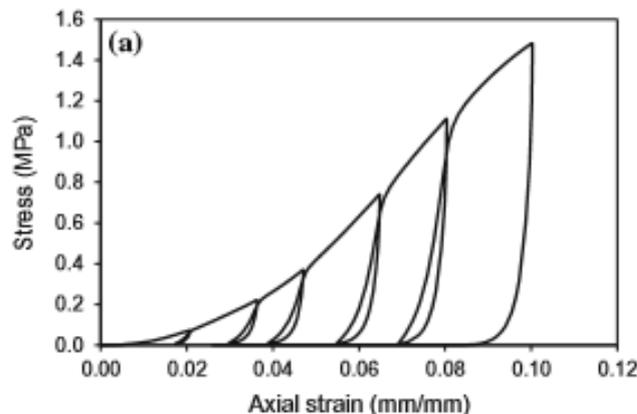


Figure 3.21 Curva esfuerzo deformación para ensayos a compresión de carga y descarga (Charmpis, Illampas, & Ioannou, 2016).

Incluso con esfuerzos bajos de compresión (0.1 MPa) la deformación plástica se desarrolla. Este es un comportamiento típico de un suelo cohesivo y granular friccional. De hecho el deslizamiento y desplazamiento toma lugar entre las partículas granulares debido a la presión y no son reversibles (Charpis, y otros, 2016).

#### 3.2.4. Agrietamiento y formación de bloques

La última complejidad destacada se encuentra en que el modelo computacional está orientado a proponer un reforzamiento para las viviendas de adobe. El modelo computacional debe poder estimar las fuerzas en dicho reforzamiento. En la figura 3.22 se muestra la captura en un instante de tiempo de un modelo de vivienda de adobe de 1 piso sometido a un ensayo de simulación sísmica.

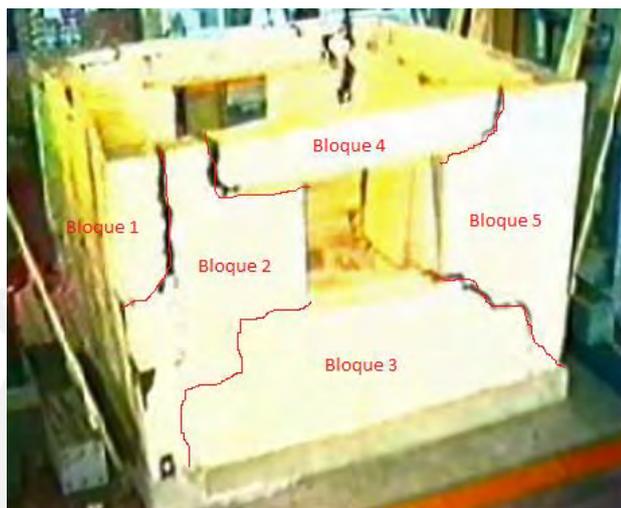


Figure 3.22 Modelo durante un ensayo de simulación sísmica (Torrealva & Vargas, 1984).

En la figura 3.22 se puede apreciar que durante el movimiento la mampostería de adobe se agrieta y forman bloques de colapso. En este instante el modelo de vivienda de adobe se ha transformado en un conjunto de bloques apoyados entre sí donde la gravedad actúa como fuerza restitutiva de cada bloque en lugar de los esfuerzos de tracción en el material.

Para poder estimar las fuerzas en el reforzamiento el modelo computacional debe tener como prioridad capturar el movimiento de los bloques. Esto significa que los efectos de balanceo, choque, desprendimiento y desplazamiento relativo entre bloques deben considerarse.

### 3.3. Estimación de los desplazamientos y fuerzas en un modelo de vivienda de mampostería de adobe de 1 piso reforzado con sogas utilizando bloques rígidos

#### 3.3.1. Introducción al modelamiento de la mampostería de adobe reforzada con sogas utilizando bloques rígidos

El comportamiento observado en los diferentes ensayos de simulación sísmica de modelos de vivienda de mampostería de adobe sugiere que la mampostería se agrieta y se forman bloques. Estos bloques forman un mecanismo de colapso. La función del refuerzo es la de mantener los bloques unidos y evitar el colapso. El objetivo del modelo computacional es el de obtener los desplazamientos y fuerzas en el refuerzo.

Cuando se utiliza un sistema de reforzamiento no adherido como el reforzamiento con sogas la obtención del desplazamiento relativo en las diferentes zonas de la mampostería es

necesaria para obtener las fuerzas generadas en el refuerzo. La utilización de un modelo computacional de una vivienda de adobe que consista en una mampostería formada por bloques surge de la dificultad de muchos modelos computacionales con mamposterías elaboradas de manera monolítica de capturar el desplazamiento relativo entre las diferentes zonas en la mampostería.

El hecho de que los bloques sean totalmente rígidos es una simplificación para lograr que el cálculo de los resultados en el modelo computacional sea mucho más rápido.

### 3.3.2. Modelo de vivienda conformado por 2 bloques rígidos

La forma más simple de realizar un análisis numérico de un modelo de vivienda de mampostería de adobe reforzado con sogas es idealizando a la estructura como 2 bloques rígidos. El primer bloque será el que se desprende de la estructura y el segundo bloque será el resto de la estructura. La figura 3.23 muestra ambos bloques. Se asume que el bloque que se desprende de la estructura pivotea respecto a un punto en su base y que la pérdida de energía debido al choque es nula (Sosa & Soto, 2014).

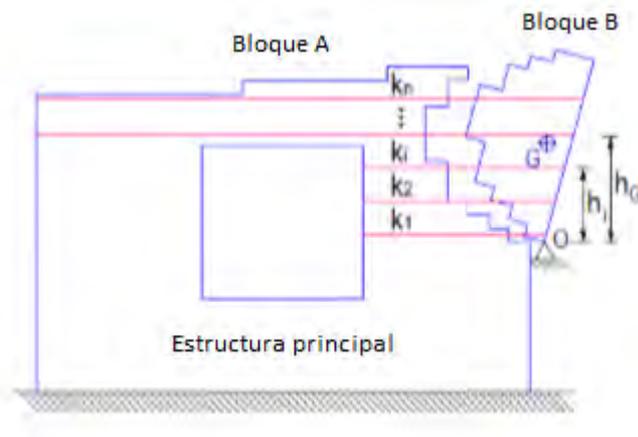


Figure 3.23 Bloque de falla en un modelo de vivienda reforzada (Sosa & Soto, 2014).

La cantidad de reforzamiento mediante sogas para el modelo de vivienda de adobe de 1 piso se estima utilizando las teorías de la dinámica estructural. En la investigación de (Sosa & Soto, 2014) se planteó la ecuación diferencial que describe el movimiento dinámico de un bloque rígido que se desprende de la estructura. La masa será la masa del bloque. La rigidez será la de las sogas. La fuerza externa actúa en el centro de gravedad del bloque. El grado de libertad de desplazamiento se coloca en el centro de gravedad con dirección horizontal. En la figura 3.24 se muestra un esquema del análisis realizado al bloque rígido.

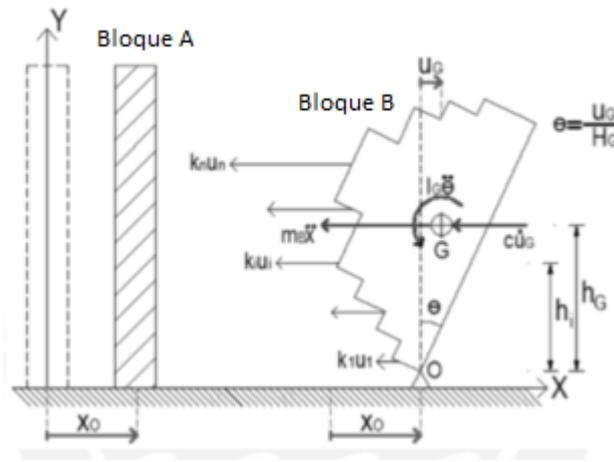


Figure 3.24 Esquema del análisis dinámico al bloque rígido (Sosa & Soto, 2014).

La ecuación diferencial que describe el movimiento del bloque rígido bajo la acción de la fuerza sísmica es:

$$M_e \ddot{u}_G + C_e \dot{u}_G + K_e u_G = -m_B \ddot{x}_o \quad (1)$$

Donde:

$u_G$ =Movimiento del grado de libertad de desplazamiento horizontal ubicado en el centroide del bloque. Indica el desplazamiento relativo a la base.

$x_o$ = Desplazamiento horizontal de la base obtenido a partir de la señal de la mesa de simulación sísmica.

Los coeficientes equivalentes para la masa del bloque ( $M_e$ ), la rigidez ( $K_e$ ) y el amortiguamiento ( $C_e$ ) se hallan mediante las ecuaciones (2), (3) y (4).

$$M_e = \frac{1}{h_G^2} (I_G + m_B h_G^2) \quad (2)$$

$$K_e = \frac{\sum k_i h_i}{h_G^2} \quad (3)$$

$$C_e = 2\xi_B \sqrt{K_e M_e} \quad (4)$$

Donde:

$k_i$ =rigidez de la soga "i",  $h_i$ = altura de la soga "i",  $h_G$ =altura al centroide,  $\xi_B$ =factor de amortiguamiento,  $m_B$ =masa del bloque,  $I_G$ =Momento de inercia de masa respecto al giro del bloque alrededor de su centroide. Este es un método simplificado para estimar el refuerzo con sogas de un módulo de adobe. El método todavía está siendo calibrado y refinado (Sosa & Soto, 2014).

### 3.3.3. Desplazamiento horizontal con un solo grado de libertad (GDL)

En la figura 3.25 se muestra un bloque rígido que se mueve con solo 1 grado de libertad. El bloque está unido a un empotramiento mediante un resorte con rigidez "K" y un amortiguador con coeficiente de amortiguamiento "C".

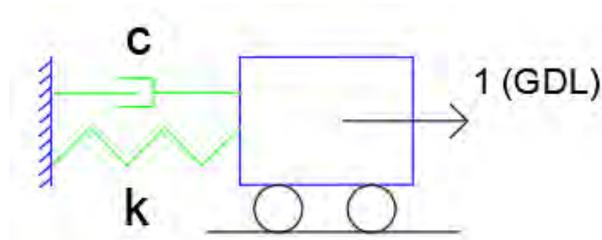


Figure 3.25 Bloque rígido unido por un resorte y un amortiguador

La ecuación diferencial que describe el movimiento es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t)$$

Donde “ $u$ ” representa el desplazamiento en el tiempo y  $p(t)$  es la fuerza en el tiempo.

Si  $p(t)$  es una función arbitraria es conveniente realizar una evaluación numérica de la respuesta. Para este caso se utiliza el método de la interpolación lineal. En la figura 3.26 se tiene el mismo problema pero con dos bloques rígidos. Este problema idealiza una falla en la mampostería de adobe que origina dos bloques. Se asume que solo uno de los bloques oscila debido a la fuerza externa y el otro está empotrado.

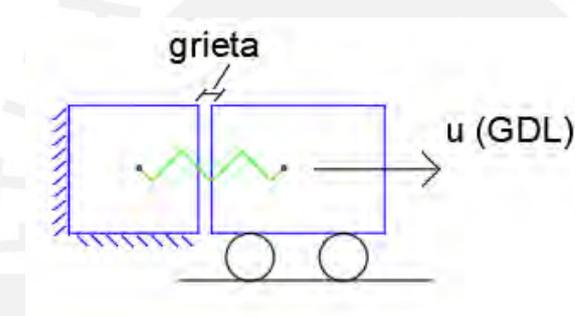


Figure 3.26 Bloques rígidos separados por una grieta pequeña

Debido a que la grieta es pequeña comparada con el movimiento oscilatorio los bloques chocarán. Para poder simular el choque entre los bloques se tendrá que realizar modificaciones al proceso de análisis por interpolación lineal. Se puede obtener la respuesta en el tiempo para una condición en la que el desplazamiento del bloque no puede tener un valor negativo por lo que se coloca un valor absoluto a la solución a la ecuación diferencial.

Debido a que el desplazamiento solo puede ser positivo el resorte sólo trabajará a tracción lo que concuerda con la naturaleza del refuerzo con sogas por lo que no se necesita modificar la rigidez. El intervalo del análisis por interpolación lineal debe ser lo suficientemente pequeño para que los resultados de la respuesta con la modificación por choque sean consistentes.

### 3.3.4. Volteo de un muro rígido simplemente apoyado sostenido con sogas

En la figura 3.27 se tiene un bloque rígido conectado a un empotramiento mediante resortes. El bloque está sometido a una fuerza aleatoria que depende del tiempo “ $p(t)$ ”. Se desea hallar la respuesta en el tiempo “ $u(t)$ ”. Mediante un equilibrio de fuerzas horizontales se obtiene la ecuación diferencial que describe el movimiento.

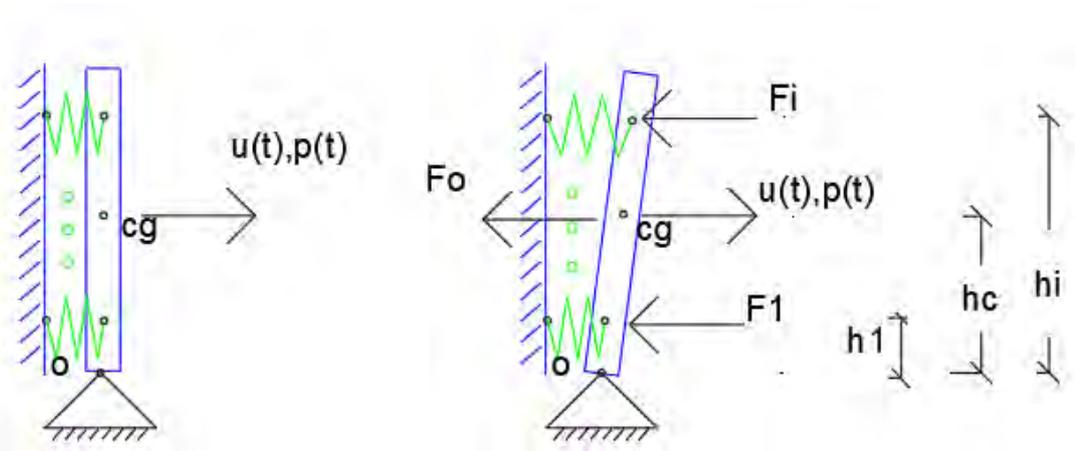


Figure 3.27 (a) Muro sostenido por cuerdas sin desplazarse. (b) Desplazado.

La ecuación diferencial a resolver es:

$$\tilde{m}\ddot{u} + \tilde{k}u = \tilde{p}(t) \quad (5)$$

Donde:

$\tilde{m}$ = masa generalizada

$\tilde{k}$ = rigidez generalizada

$\tilde{p}$ = fuerza generalizada

La fuerza total debido a los resortes corresponderá a la suma de las fuerzas en cada resorte. La fuerza “ $F_i$ ” en el resorte “ $i$ ” está relacionada con el desplazamiento horizontal en el centro de gravedad “ $u$ ” mediante:

$$F_i = u * \frac{h_i}{h_c} * k_i \quad (6)$$

Donde:

$h_c$  = altura desde el punto “ $o$ ” hasta el centroide del bloque rígido

$h_i$  = altura desde el punto “ $o$ ” hasta el resorte “ $i$ ”

“ $k_i$ ” es la rigidez del resorte “ $i$ ”.

La fuerza total de los resortes será:

$$\sum_{i=1}^N F_i = \sum_{i=1}^N u * \frac{h_i}{h_c} * k_i \quad (7)$$

Sea “ $\theta$ ” el grado de libertad de giro en el punto “ $o$ ”

La relación entre “ $u$ ” y “ $\theta$ ” es:

$$u = \theta * h_c \quad , \quad \theta = \frac{u}{h_c} \quad , \quad \ddot{\theta} = \frac{\ddot{u}}{h_c} \quad (8), (9) \text{ y } (10)$$

Haciendo sumatoria de momentos en “o” tenemos:

$$p(t) * hc - \sum_{i=1}^N Fi * hi - M_I = 0 \quad (11)$$

Donde:

$M_I$ = Momento debido a la inercia respecto al punto “o”

$$M_I = I_o * \ddot{\theta} = I_o * \frac{\ddot{u}}{hc} \quad (12)$$

“ $I_o$ ” es el momento de inercia de masa respecto al punto “o”. La inercia de masa se puede hallar mediante:

$$I_o = \int \int \int \rho(x, y, z) \|r^2\| dv \quad (13)$$

Donde:

$\rho(x, y, z)$ = función de densidad del solido

$\|r^2\|$ =vector perpendicular al eje de giro

Para el caso de un análisis en el plano (x, y), con un sólido de dimensión constante perpendicularmente al plano, el momento de inercia de masa será:

$$I_o = (Ix + Iy) * \frac{masa}{Area} \quad (14)$$

Para el presente caso

$$I_o = m * \frac{h^2}{3} \quad (15)$$

Reemplazando las fuerzas debidas a los resortes y las fuerzas de inercia:

$$I_o * \frac{\ddot{u}}{hc} + \sum_{i=1}^N \frac{hi^2}{hc} * ki * u = hc * p(t) \quad (16)$$

$$I_o * \frac{\ddot{u}}{hc^2} + \sum_{i=1}^N \frac{hi^2}{hc^2} * ki * u = p(t) \quad (17)$$

Si tomamos la fuerza p(t) como la fuerza debida al movimiento del suelo, p(t)=- $m\ddot{u}_g$  tendremos:

$$I_o * \frac{\ddot{u}}{hc^2} + \sum_{i=1}^N \frac{hi^2}{hc^2} * ki * u = -m\ddot{u}_g \quad (18)$$

Las propiedades generalizadas serán:

$$\tilde{m} = \frac{I_o}{hc^2} \quad (19)$$

$$\tilde{k} = \sum_{i=1}^N \frac{h_i^2}{hc^2} * k_i \quad (20)$$

$$\tilde{p}(t) = -m\ddot{u}_g \quad (21)$$

### 3.3.5. Comparación entre un análisis en MATLAB y SAP2000

En el 2017 el grupo de investigación GERDIS perteneciente a la PUCP, del cual se es parte, realizó un trabajo de investigación para la obtención de las fuerzas en las sogas en un modelo de vivienda conformado por 2 bloques rígidos. Debido a que solo uno de los bloques se mueve se simplificó el modelo a un bloque sobre un apoyo fijo arriostrado en un extremo a un empotramiento. Se comparan las respuestas horizontales en desplazamiento del centro de gravedad del bloque rígido simplemente apoyado obtenidas en MATLAB y SAP2000.

El bloque es sometido a una historia de aceleración perteneciente a un ensayo de un modelo de vivienda de adobe de 1 piso a escala natural reforzado con sogas realizado en el 2017 en el laboratorio de estructuras antisísmicas de la PUCP por el grupo GERDIS. Este registro es similar al acelerograma de Lima de 1970 y está escalado a una aceleración máxima de 1.2g.

Se asignaron propiedades al muro (bloque) parecidas a uno de los muros del modelo de vivienda de adobe ensayado en el laboratorio. En la figura 3.28 se muestra un modelo del muro en SAP2000 con elementos “link” que solo funcionan a compresión para simular el choque. Las cuerdas también se modelaron con elementos “link” que solo funcionan a tracción, ambos elementos se encuentran superpuestos y en color verde.

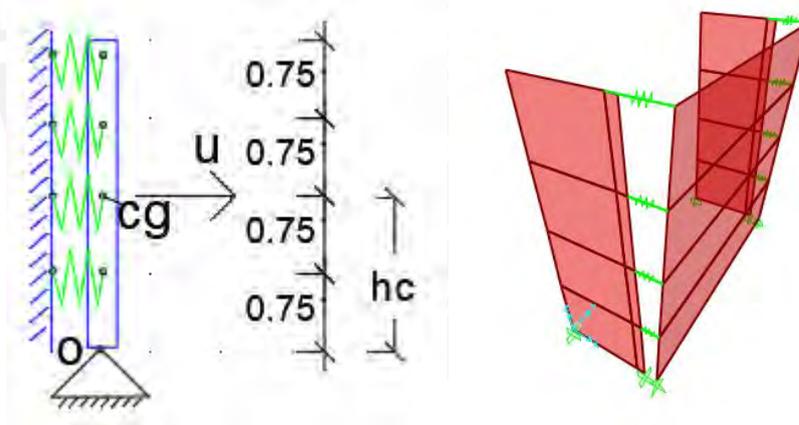


Figure 3.28 Muro rígido simplemente apoyado (izquierda). Modelo en SAP2000 con elementos link para simular el choque y cuerdas (derecha).

Con el fin de comprender los detalles detrás de lo que sucede en SAP2000 se resuelve el problema anterior utilizando los siguientes datos:

El muro tiene una densidad  $p=1.7 \text{ Ton/m}^2$ , 3m de alto, 3m de ancho y 0.2m de espesor. Los resortes corresponden a las sogas que tendrá el muro para evitar que colapse. La longitud de cada sogas es de 0.675m. El módulo de elasticidad de la sogas es  $E=610 \text{ N/mm}^2$ . El área de cada sogas será  $A=7.37 \text{ mm}^2$ .

La rigidez de cada fila con sogas para el análisis en MATLAB será:

$$k = E * A * \frac{N}{L} = 610 * 7.37 * \frac{8}{675} = 53.2 \frac{N}{mm} = 5.32 \frac{Ton}{m}$$

Las propiedades generalizadas para la masa se hallan mediante la ecuación 18.

Para el caso de un muro con apoyo simple en la base el momento de inercia será:

$$I_o = m * h^2/3 = 0.3 * 3^2 / 3 = 0.9 \text{ Ton} \cdot s^2 \cdot m$$

La masa generalizada masa será:

$$\tilde{m} = \frac{I_\theta}{h_c^2} = \frac{0.9}{1.5^2} = 0.4 \text{ Ton} \cdot \frac{s^2}{m}$$

La rigidez generalizada será:

$$\tilde{k} = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{h_c} * k_i = (0.75^2 + 1.5^2 + 2.25^2 + 3^2) * \frac{5.32}{1.5^2} = 39.9 \text{ Ton/m}$$

La fuerza generalizada será:

$$\tilde{p}(t) = -m\ddot{u}_g$$

Donde “ $\ddot{u}_g$ ” es la aceleración en la base que corresponde al registro utilizado por el grupo GERDIS (Fase5).

La ecuación diferencial a resolver es la planteada en la ecuación 5

$$\tilde{m}\ddot{u} + \tilde{k}u = \tilde{p}(t)$$

A continuación se muestra el desplazamiento horizontal en el tiempo “ $u(t)$ ” obtenido utilizando el método de interpolación lineal modificado por choque en MATLAB. Para el modelo computacional en SAP2000 se utilizó un coeficiente de rigidez para el elemento link que simula el choque de 60000 Ton/m.

Se eligió este valor porque al colocarle un valor superior la respuesta no varía. Para el análisis en MATLAB también se añade un factor de pérdida de energía de 1.5 que al parecer SAP2000 utiliza. Este valor reduce el desplazamiento y velocidad final en el análisis paso a paso cada vez que la respuesta es menor que cero, es decir cuando se produce un impacto entre bloques.

En la figura 3.29 se muestra la respuesta hallada para los análisis en SAP2000 y MATLAB mediante interpolación lineal. Los resultados obtenidos en MATLAB y SAP2000 son similares por lo que es posible el análisis dinámico en SAP2000 de un bloque rígido simplemente apoyado conectado por resortes a algún objeto con el que impacta.

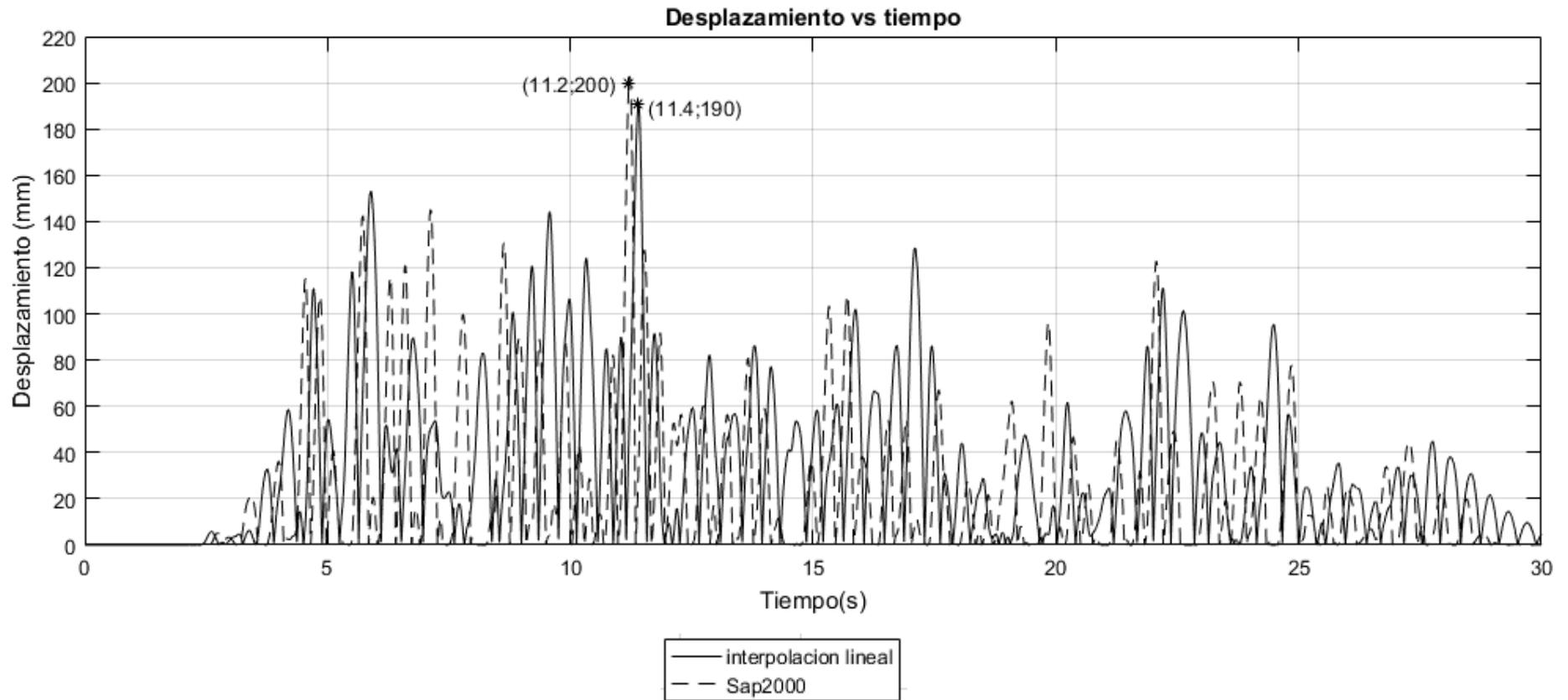


Figure 3.29 Comparación entre respuestas en MATLAB y SAP2000.

### 3.3.6. Análisis numérico comparativo

En el 2017 el grupo de investigación GERDIS estudio el comportamiento de un módulo de adobe de 1 piso reforzado con sogas. El ensayo se realizó en una sola fase bajo una amplitud de desplazamiento máxima de 140mm en la señal de la mesa de simulación sísmica. En la figura 3.30 (a) se observa el modelo de adobe durante el ensayo en el instante de desplazamiento máximo. En la figura 3.30 (b) se observa el módulo luego del ensayo. Las grietas formadas, grandes y pequeñas, se marcaron con pintura roja. La estructura permaneció estable y no se observó colapso parcial ni total de la estructura por lo que el refuerzo cumplió su objetivo.



Figure 3.30 (a) Módulo reforzado durante el ensayo. (b) Módulo luego del ensayo.

En la figura 3.31 se muestra el modelo de vivienda de adobe y los puntos donde se midió los desplazamientos marcados con un círculo. En el ensayo se midió el desplazamiento horizontal, en la dirección paralela al muro que tiene ventana. Además se midió las fuerzas en las sogas horizontales que se encuentran a la misma altura de los puntos de desplazamiento medidos.



Figure 3.31 Módulo antes del ensayo con los puntos de evaluación marcados en rojo.

El grupo GERDIS desarrolló varios modelos computacionales en distintos programas y bajo distintos enfoques para intentar predecir los resultados de desplazamiento y fuerzas en las sogas en el modelo de vivienda de adobe de 1 piso reforzado con sogas ensayado en el laboratorio. A continuación se presentan los análisis numéricos realizados y al final se presenta la comparación de cada caso respecto a los resultados del ensayo de laboratorio.

#### Análisis en MATLAB:

MATLAB es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (Mathworks, 2018). El modelamiento en MATLAB considera para este caso que el muro posterior del modelo de adobe colapsa completamente. Se asume que la estructura está formada por dos bloques rígidos. Un bloque formado por el muro posterior y el otro formado por el resto de la estructura. Para este caso se utilizó las ecuaciones de la dinámica de estructuras para obtener las propiedades generalizadas y la respuesta de un bloque rígido simplemente apoyado que se desprende de la estructura y que está sostenido por cuerdas. Un análisis numérico en MATLAB fue elaborado por el Dr. Blondet de la PUCP. En la figura 3.32 se muestra un esquema del problema.

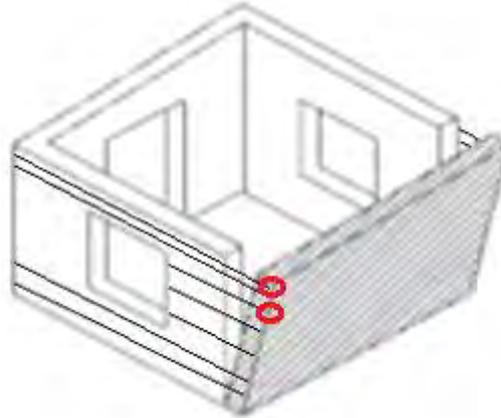


Figure 3.32 Esquema del muro posterior desplomándose. (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

#### Modelo en WORKING MODEL:

WORKING MODEL es una herramienta computacional que permite crear simulaciones de sistemas mecánicos reales (Addlink, 2018). El modelo en working model es similar a lo planteado en el modelo en MATLAB. Consiste en dos bloques rígidos. El primero corresponde al muro posterior y el segundo al resto de la estructura. El muro está separado del resto de la estructura y es sostenido por cuerdas para evitar que colapse. En la figura 3.33 se muestra el modelo computacional en Working Model.

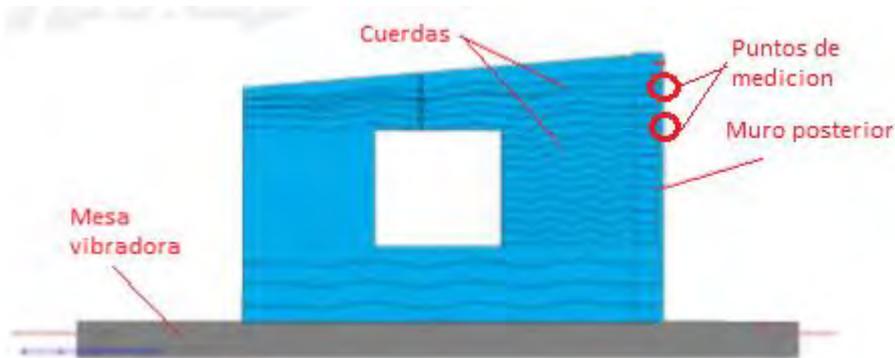


Figure 3.33 Modelo computacional en Working Model (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

### Modelos en ABAQUS

ABAQUS es un programa de simulación que aplica el método de los elementos finitos para realizar cálculos estructurales avanzados (Dassault, 2018). Para el análisis en el programa ABAQUS se realizaron dos modelos. El primero consiste en un modelamiento similar al modelo de WORKING MODEL pero con elementos sólidos y elásticos los cuales tienen un módulo de elasticidad de 200 MPa obtenido de ensayos de compresión en pilas a la mampostería de adobe.

En la figura 3.34 se muestra el modelo computacional 1 en ABAQUS.

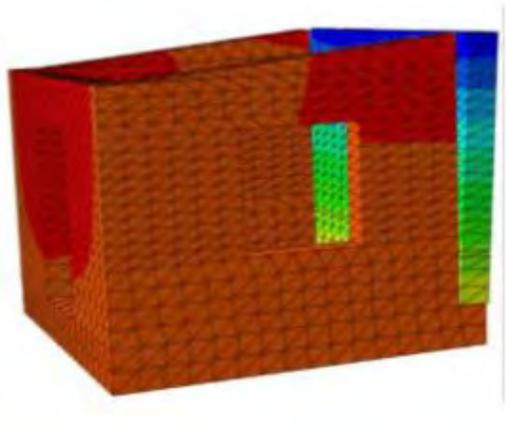


Figure 3.34 Modelo computacional 1 en ABAQUS (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

El segundo modelo computacional en ABAQUS consiste en un modelo no lineal utilizando elementos “shell” y un material de daño y plasticidad “concrete damage plasticity” adaptado al adobe. Además considera por simplicidad que el refuerzo con sogas está adherido a la estructura lo cual no es correcto pero sirvió como un primer cálculo. Se modela además las vigas de madera o vigas collar como elementos elásticos. El esfuerzo máximo usado para el adobe fue de 0,45 MPa a compresión y 0.04 MPa a tracción el cual fue obtenido de ensayos (Blondet, y otros, 2017).

En la figura 3.35 se muestra el modelo computacional 2 en ABAQUS.

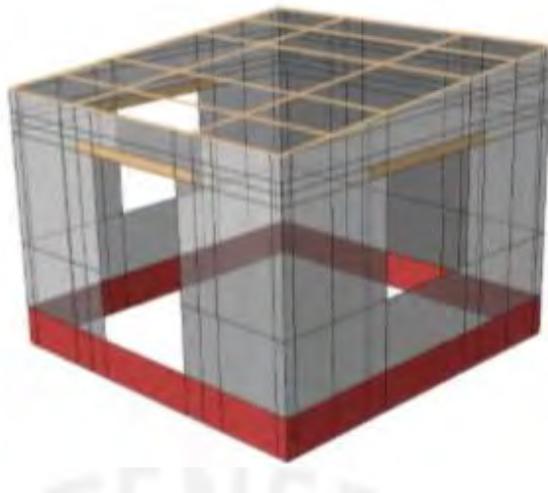


Figure 3.35 Modelo computacional 2 en ABAQUS (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

## Modelos en SAP2000

SAP2000 es un programa de elementos finitos con interfaz gráfica 3D preparado para realizar la modelación, análisis y dimensionamiento de problemas de ingeniería de estructuras (CSI, 2018). Para el modelamiento computacional con SAP2000 se realizaron dos modelos. El primero consiste en un modelo similar al modelo en WORKING MODEL pero con elementos shell con un módulo de elasticidad de 200MPa. Para el modelamiento de las sogas se utilizó elementos “link” que funcionan a tracción más no a compresión con una rigidez igual a la de las sogas. Para el modelamiento del impacto entre bloques se colocó elementos “link” que solo funcionan a compresión con una rigidez muy grande. En este modelo se asume que la grieta se forma de manera vertical separando el muro posterior del resto de la estructura. Donde se encuentra la grieta existe un espacio donde no se tiene elementos Shell (Blondet, y otros, 2017). En la figura 3.36 se muestra el modelo computacional 1 en SAP2000.

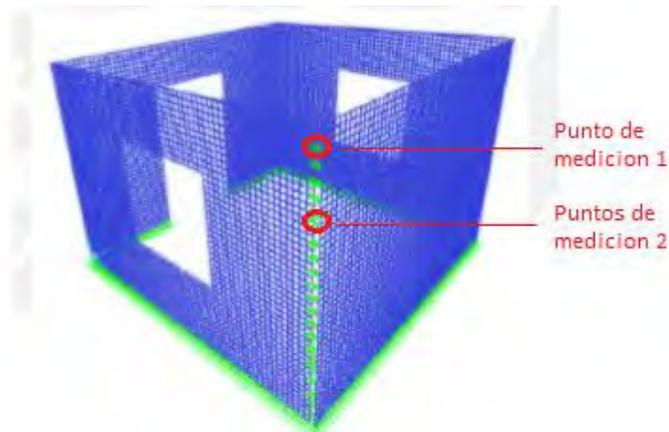


Figure 3.36 Modelo computacional 1 en SAP2000 (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).

El modelo computacional 2 en SAP2000 se realizó utilizando las mismas consideraciones que en el modelo 1 pero las grietas se generan en diversos lugares del módulo según lo observado en ensayos anteriores a modelos de vivienda de adobe. La creación de estas grietas forma bloques. Estos bloques interactúan entre sí y permiten el desplazamiento relativo entre ellos. Este modelo considera el efecto de la gravedad como fuerza restitutiva además de la fuerza ocasionada por las sogas. En la figura 3.37 se muestra la imagen del modelo 2 en SAP2000.

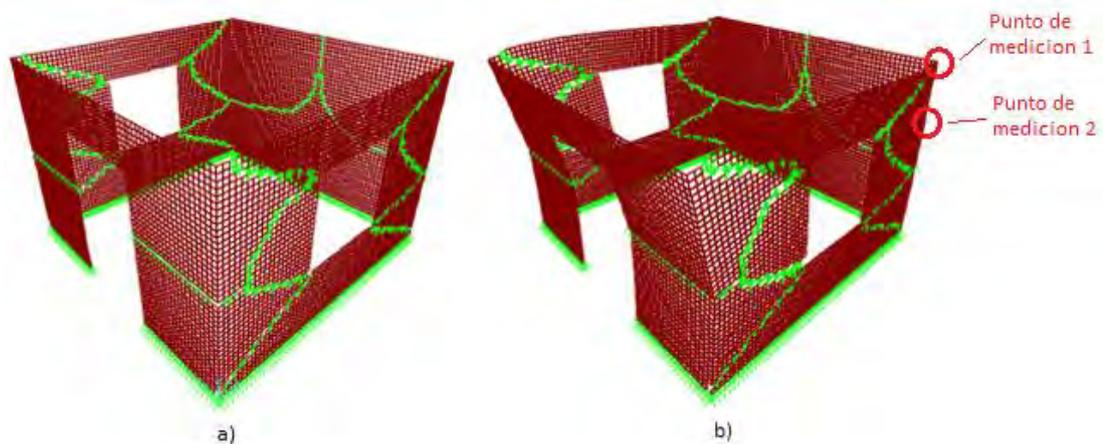


Figure 3.37 (a) Modelo 2 sin deformar. (b) Modelo 2 deformado (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017).

En las tablas 3.2 y 3.3 se presenta una comparación entre los resultados de los diferentes modelos computacionales tanto en desplazamientos como en fuerzas en las sogas y los resultados del ensayo de laboratorio. (M1= modelo 1, M2=modelo 2). Las fuerzas se midieron en el ensayo de laboratorio utilizando celdas de carga atadas a una de las sogas a analizar.

Tabla 3.2: Comparación de fuerzas entre los modelos y el ensayo

	Fuerza (N)						EXPERIMENTAL
	MATLAB	WORKING MODEL	SAP2000		ABAQUS		
	M1	M1	M1	M2	M1	M2	
<b>Punto de medición 1</b>	123	131	125	36	112	116	45.5
<b>Punto de medición 2</b>	302	323	319	10	287	135	66.6

Tabla 3.3: Comparación de desplazamientos entre los modelos y el ensayo

	Desplazamiento relativo (mm)						EXPERIMENTAL
	MATLAB	WORKING MODEL	SAP2000		ABAQUS		
	M1	M1	M1	M2	M1	M2	
<b>Punto de medición 1</b>	538	525	508	88	513	21	80.7
<b>Punto de medición 2</b>	435	432	410	64	452	10	41

En la Tabla 3.2 se pueden comparar las fuerzas. En el modelo computacional 2 en SAP2000 se obtienen resultados similares entre el modelo computacional y el ensayo para el punto de medición 1 mientras que para el punto de medición 2 no son similares. El error en el punto de medición 2 puede deberse a que existe una rigidez de deslizamiento o fricción entre bloques la cual no se colocó en el modelo computacional y esto afecta al desplazamiento relativo de los bloques. La fricción crearía un desplazamiento relativo mayor entre bloques para este caso. Sin embargo, al no haber fricción los bloques se desplazan juntos. Una configuración de bloques más elaborada podría solucionar este problema. En la tabla 3.3 se puede comparar los resultados de desplazamiento. En el modelo computacional 2 en SAP2000 se tienen resultados de desplazamiento similares a los resultados obtenidos en el ensayo de laboratorio (Punto de medición 1 tiene un error menor al 10%).

### 3.4. Conclusiones

Del estado del arte actual se puede concluir lo siguiente:

La mampostería de adobe es un material frágil que ante fuerzas sísmicas se agrieta inmediatamente formando bloques. Estos bloques se desprenden de la estructura y hacen que colapse parcial o totalmente. Para evitar el colapso de los bloques se puede colocar un reforzamiento con sogas.

Es posible realizar un análisis numérico para estimar las fuerzas que se tendrán en las sogas así como los desplazamientos en un modelo de vivienda de adobe. El análisis numérico en SAP2000 donde se modela cada bloque de colapso y se utiliza a la aceleración de la gravedad como fuerza restitutiva además de la fuerza de las cuerdas ha mostrado buenos resultados en la estimación de fuerzas y desplazamientos.

## 4. ENSAYOS DE LABORATORIO DE MODELOS DE VIVIENDA DE MAMPOSTERÍA DE ADOBE DE 2 PISOS

### 4.1. Descripción de los ensayos de laboratorio

#### 4.1.1. El modelo de vivienda

Para poder estudiar el comportamiento sísmico de las viviendas de mampostería adobe de 2 pisos con y sin reforzamiento se deben realizar ensayos de simulación sísmica a modelos de vivienda de adobe. Un modelo de vivienda es una estructura idealizada que contiene solo los componentes básicos necesarios para poder realizar el ensayo de manera que se obtenga la mayor cantidad de información útil. A este modelo de vivienda a escala natural llamaremos prototipo. El diseño del prototipo se realizó utilizando las recomendaciones de la norma peruana E080 de diseño en adobe. Cuenta con muros de 40cm de espesor y vigas collar.

El ensayo se realizó en el laboratorio de estructuras antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Debido a que el laboratorio de la PUCP tiene un límite máximo del peso de la estructura que se coloca para el ensayo se utilizó un modelo a escala del prototipo. La escala utilizada fue de 1:2. Las medidas del modelo a escala ensayado se obtienen a partir de las medidas del prototipo. En la figura 4.1 se muestra el modelo de vivienda de mampostería de adobe de 2 pisos a escala colocado sobre la mesa vibradora del laboratorio de la PUCP. El modelo de vivienda a escala estudiado consta de 4 muros. Tiene en el primer piso 1 muro con puerta y dos con ventana. El segundo piso tiene 3 muros con ventana. Cuenta con un techo inclinado.



Figure 4.1 Módulo de adobe de 2 pisos reforzado con sogas reducido con una escala 1:2 sin tarrajeo colocado sobre la mesa de simulación sísmica.

La mesa vibradora del ensayo utiliza una señal de comando. En la señal de comando se puede observar los movimientos que realiza la mesa vibradora durante el ensayo. La señal utilizada corresponde al registro del sismo de Chimbote de 1970 modificada para obtener un espectro compatible a la norma peruana.

#### 4.1.2. Ensayos y fases

Se realizaron 4 ensayos de laboratorio para los modelos de vivienda de adobe de 2 pisos con y sin refuerzo. Dos ensayos para el caso sin reforzamiento y 2 para el caso con reforzamiento.

Los ensayos están divididos en fases. Las fases son ensayos utilizando una misma señal de comando pero con diferente amplitud. Las fases son aplicadas de manera sucesiva para cada ensayo con una pausa entre fases para examinar el modulo y marcar grietas. Comúnmente cada fase tiene una amplitud mayor a la fase previa.

Ensayos sin reforzamiento:

El primer ensayo consistió en 3 fases. Las amplitudes de cada fase fueron de 15mm, 30mm y 37.5mm. El segundo ensayo consistió también en 3 fases. Las amplitudes fueron de 40mm, 60mm y 90mm.

Ensayos con reforzamiento:

Para este caso el primer ensayo consistió en 4 fases. Las amplitudes de cada fase fueron de 15mm, 30mm, 60mm y 60mm. El segundo ensayo consistió en 2 fases. Las amplitudes fueron de 60mm y 60mm.

Se selecciona un número determinado de fases de las cuales se extraerá respuestas en determinados puntos de medición. Las respuestas serán comparadas con los resultados de un modelo computacional. A continuación se presentan 4 observaciones importantes respecto a la selección de las fases:

1) Hay fases que son aplicadas cuando la estructura no está dañada mientras que otras fases son aplicadas cuando ya está dañada. Esta diferencia tiene un gran efecto en los resultados finales. Para una misma amplitud de desplazamiento de la señal de comando los resultados de las fuerzas en las cuerdas varían dependiendo de si se realizó un ensayo previo a la estructura o no. Si la estructura ha tenido un ensayo previo la fuerza en la soga puede elevarse hasta el triple del valor comparado con el caso de que no hubiese tenido un ensayo previo. Esto se debe posiblemente a que el adobe presenta desplazamientos relativos permanentes entre bloques. Los bloques van cediendo ante las fuerzas con cada fase. Por esta razón se debería elegir fases que no tengan fases previas.

2) Si se realiza un modelo computacional donde se asume que la mampostería está agrietada desde el principio debería compararse con los resultados de un ensayo donde también la estructura está agrietada desde el principio. Es decir se debería elegir fases que tengan fases previas. Debe tenerse en cuenta también que los bloques de falla se forman bajo desplazamientos con una amplitud grande (60mm). Las fases con desplazamiento con amplitud pequeña (15mm) no logran este efecto.

3) Debido a la cedencia de los bloques de falla las fases que tienen fases previas presentan un desplazamiento inicial que no se incluye en el modelo computacional.

4) Las sogas presentan una fuerza inicial porque son amarradas a la estructura. Esta fuerza inicial varía para cada fase y cada ensayo.

Fases elegidas

Por lo expuesto en las 4 observaciones expuestas no es posible la elección de una fase que logre al mismo tiempo resultados de desplazamientos y fuerzas en las sogas comparables al modelo computacional de manera perfecta. Desde el punto de vista de la ingeniería se consideró los diferentes factores y se eligió para el módulo no reforzado la fase 1 del ensayo 1 (15mm) y la fase 2 del ensayo 2 (60mm) y para el módulo reforzado se eligió la fase 1 del ensayo 1 (15mm) y la fase 1 del ensayo 2 (60mm).

## 4.2. Construcción de los modelos de vivienda de adobe reforzados con sogas

### 4.2.1. Dimensiones del modelo de vivienda de adobe a escala reducida

El modelo de vivienda a escala está compuesto por 2 pisos conformados por 4 muros y un techo a 1 agua. La altura máxima es de 3.5 metros. Tiene un ancho de 2.06 metros y una profundidad de 1.82 metros. El espesor de los muros es de 20 centímetros. La altura de entrepiso es de 1.46m. En la figura 4.2 se muestra (a) la vista anterior del modelo de vivienda (b) la vista posterior con las medidas respectivas.

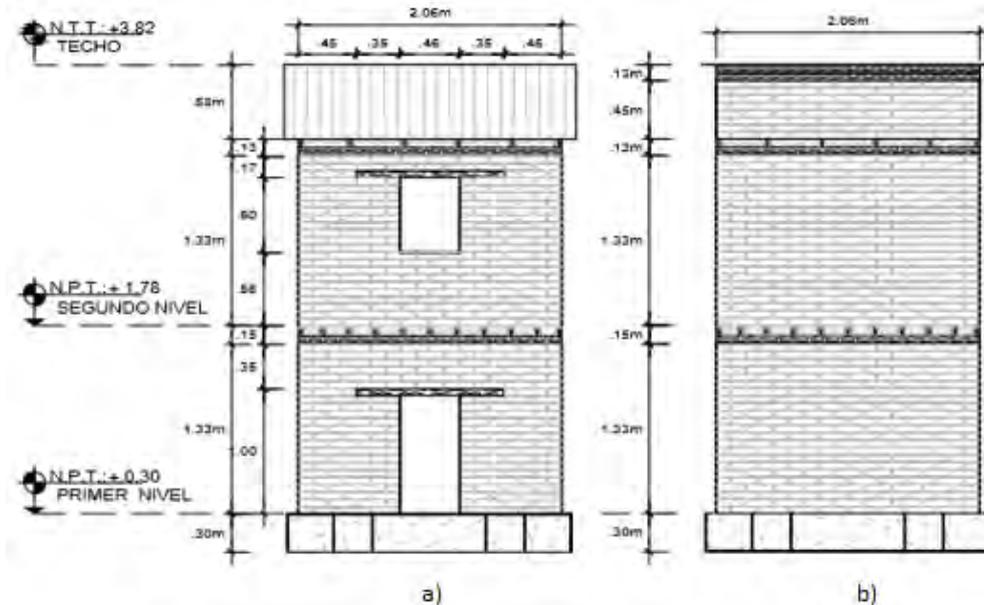


Figure 4.2. (a) Muro anterior. (b) Muro posterior.

El modelo se construyó sobre un cimiento de concreto reforzado de 35 centímetros de ancho y 30 centímetros de altura. Este cimiento tiene unas agarraderas de acero embebidas que permiten alzar y transportar el modelo con ayuda de una grúa. Las puertas y ventanas cuentan con un dintel elaborado con cañas la cual se inserta en la mampostería 30 centímetros.

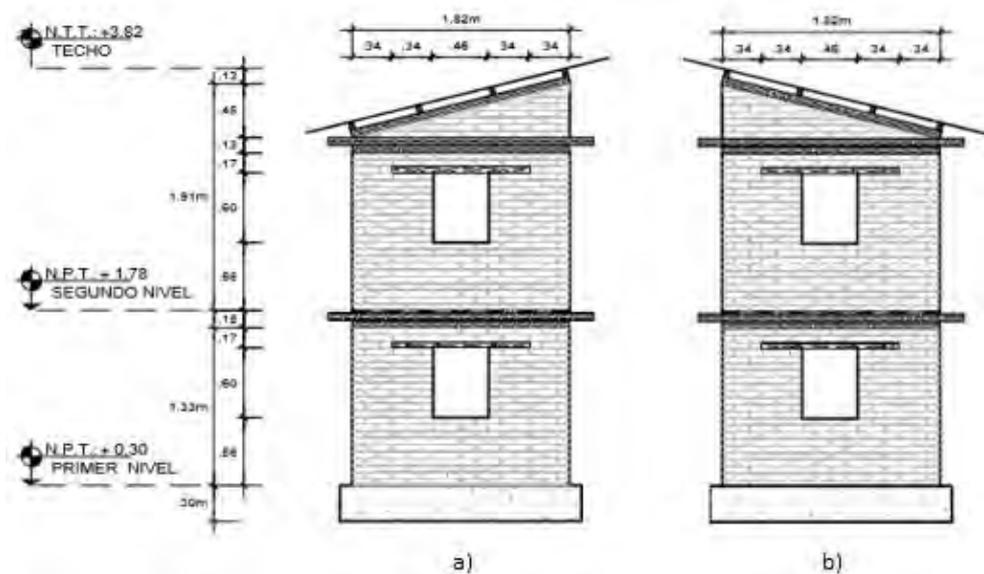


Figure 4.3. (a) Muro longitudinal derecho. (b) Muro longitudinal izquierdo.

La figura 4.3 muestra las vistas laterales (a) derecha (b) izquierda del modelo de vivienda. El modelo de vivienda cuenta con una viga collar que se colocó siguiendo las recomendaciones de la norma peruana de construcción en adobe E-080. La viga collar permite arriostrar los muros y dificultar el colapso. En la figura 4.4 se muestra (a) la vista en planta de la viga collar (b) vista del entablado del segundo y tercer piso. Sobre el entablado se coloca un piso de adobe con un espesor de 20 centímetros.

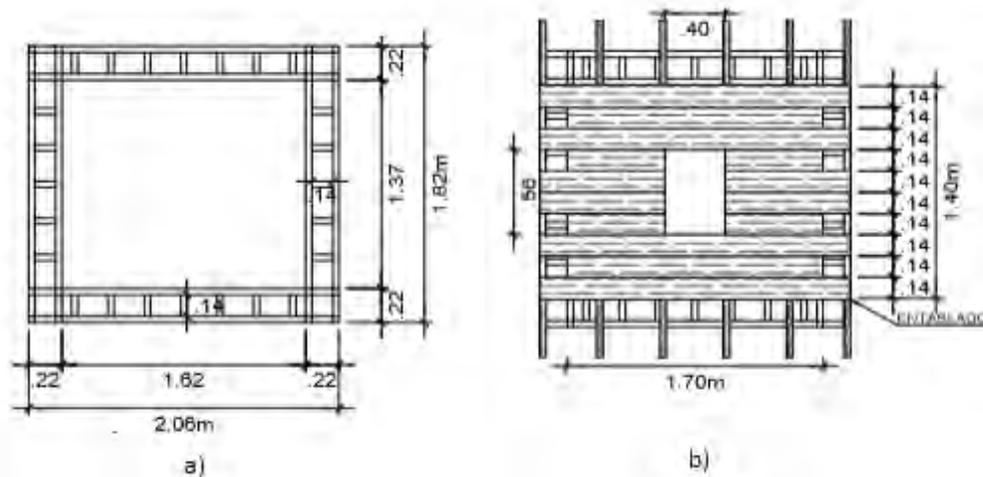


Figure 4.4. (a) Viga collar típica de entepiso (b) Entablado del segundo piso.

#### 4.2.2. Unidades de adobe

Las unidades de adobe utilizadas para la construcción del modelo de vivienda a escala fueron de 20 centímetros x 20 centímetros por 5 centímetros de alto. Los moldes tienen 2 centímetros adicionales por tenerse en cuenta la contracción por secado. Para la elaboración de los ladrillos de adobe primero se humedece el molde y se rellena con bolas de barro para luego ser compactadas en el molde. Segundo se nivela con una regla húmeda. Y se desmolda sobre una superficie plana y se dejan secar protegidos del sol y del viento. El secado de los ladrillos tarda 6 semanas. A los 10 días se voltean las unidades de albañilería para garantizar un secado uniforme. En la figura 4.5 se muestra (a) compactación del barro en el molde (b) nivelación (c) desmoldamiento de la unidad de albañilería.



Figure 4.5. (a) Compactación del barro. (b) Nivelación con regla. (c) Desmoldamiento. (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

#### 4.2.3. Construcción del modelo de vivienda sin refuerzo

El modelo de vivienda de adobe se construyó sobre un anillo de concreto que simula una cimentación rígida. En la figura 4.6 se muestra (a) vista frontal del emplantillado sobre la cimentación rígida (b) primera hilada sobre una base de mortero. La albañilería se construye utilizando barro como mortero para adherir las unidades. Se intercala la posición de los ladrillos entre cada hilada para aumentar el agarre entre unidades.



Figure 4.6. (a) Emplantillado sobre cimentación. (b) Primera hilada sobre base de mortero. (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

En las esquinas se utiliza mitades de unidades de albañilería para completar el intercalamiento. En la figura 4.7 se observa el detalle de emplantillado (a) de la primera hilada (b) segunda hilada.

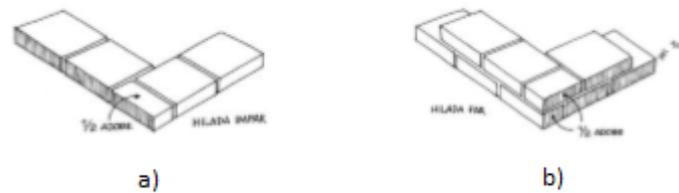


Figure 4.7 Detalles de emplantillado de esquina (a) tipo 1 (b) tipo 2 (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

En la figura 4.8 se muestra el modelo de mampostería de adobe a escala terminado colocado sobre la mesa vibradora del laboratorio de la PUCP listo para ser ensayado.



Figure 4.8. Modelo de vivienda de adobe no reforzado terminado.

#### 4.2.4. Reforzamiento con sogas

El reforzamiento se realizó utilizando sogas de 1/8" de diámetro con un área de 7.37mm<sup>2</sup>. Las sogas se colocan envolviendo al muro y atravesando los muros perpendiculares a este para poder lograrlo. El refuerzo con sogas se efectúa de manera horizontal y vertical. En la figura 4.9 se muestra un esquema del reforzamiento.

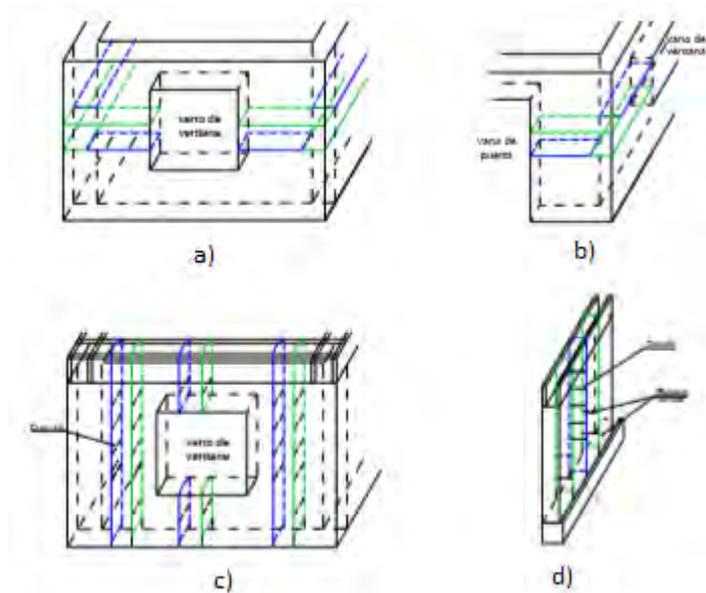


Figure 4.9. Reforzamiento típico con sogas de muros de mampostería de adobe (a) y (b) Reforzamiento horizontal. (c) y (d) Reforzamiento vertical (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

Para poder colocar el refuerzo en el muro se perforan orificios por los cuales se pasan las sogas con ayuda de un alambre guía. En la figura 4.10 se muestra la perforación de uno de los muros.



Figure 4.10. Perforación de la mampostería para insertar el refuerzo con sogas (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

El amarre de las sogas se efectúa utilizando un nudo tipo 8 el cual luego se tensa. En la figura 4.11 se muestra (a) el nudo tipo 8 (b) el tensado del nudo. Debido al tensado la sogas presenta una pre-carga con la cual trabajará durante el ensayo de simulación sísmica.

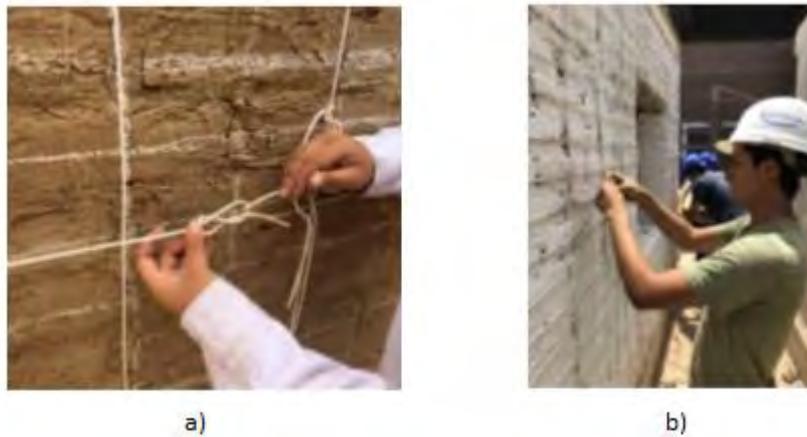


Figure 4.11. Nudo 8 antes del tensado. (b) Tensado del nudo. (Blondet, Villa Garcia, Vargas, Sosa, & Soto, 2017)

El refuerzo en el muro se organiza en líneas de refuerzo. Una línea de refuerzo puede contener 1 o varias sogas. La cantidad de líneas de refuerzo en el muro del primer y segundo piso es de 11 líneas de refuerzo horizontal y 14 líneas de refuerzo vertical. En las líneas de refuerzo horizontal se colocaron doble soga mientras que en las líneas de refuerzo vertical tan solo una soga. En la figura 4.12 se observa el modelo de vivienda de mampostería de adobe reforzado con sogas terminado y colocado sobre la mesa vibradora.



Figure 4.12. Modelo de mampostería de adobe reforzado con sogas terminado.

### 4.3. Ensayos complementarios

#### 4.3.1. Ensayos de compresión de prismas de adobe

Para hallar el módulo de elasticidad de la mampostería de adobe se realizó un ensayo a compresión en pilas. En la figura 4.13 se muestra una imagen del ensayo realizado.



Figure 4.13 Ensayo de compresión en pilas a la mampostería de adobe

Del ensayo se obtiene la relación fuerza deformación que se debe transformar a esfuerzo vs deformación unitaria. En la figura 4.14 se muestra el grafico de los esfuerzos promedio de 6 ensayos vs la deformación unitaria.

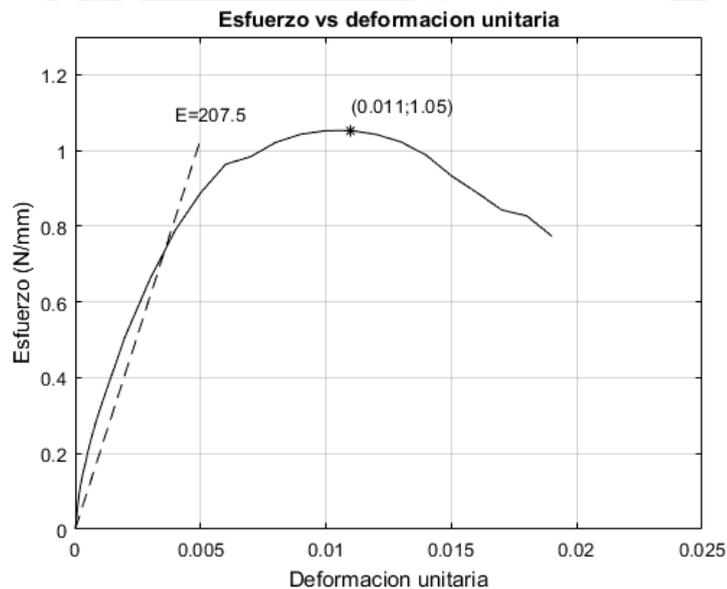


Figure 4.14 Grafico esfuerzo vs deformación unitaria

Podemos observar del grafico anterior que en la zona lineal el adobe posee un módulo de elasticidad de 200Mpa.

4.3.2. Ensayos de tracción de sogas

Para hallar el módulo de elasticidad de las sogas se realizaron ensayos de tracción. En la figura 4.15 se muestra una imagen del ensayo de tracción realizado.



Figure 4.15 Ensayo de tracción a las sogas de refuerzo

Para el refuerzo de los módulos del ensayo de laboratorio se utilizaron sogas de 1/8” con un área de la soga “A” es igual a 7.37mm<sup>2</sup>. En la figura 4.16 se muestra el grafico del promedio de los esfuerzos vs la deformación unitaria de 3 ensayos de tracción realizados a las sogas.

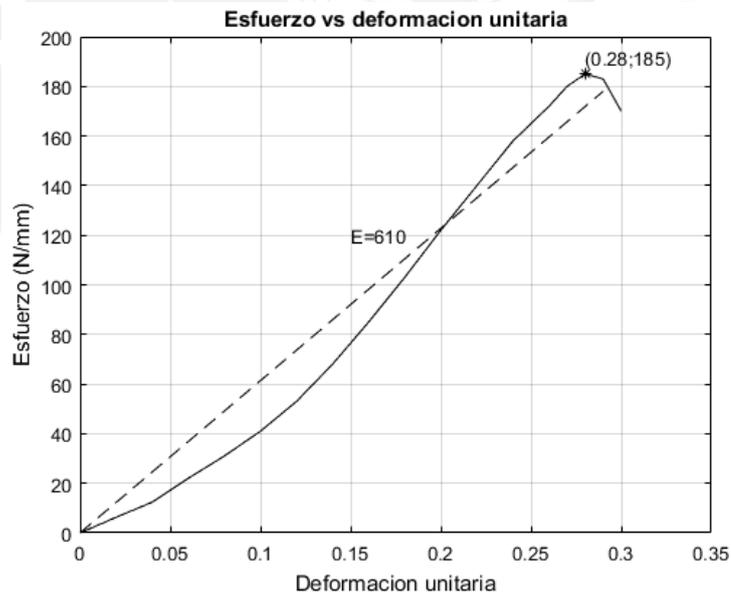


Figure 4.16 Grafico esfuerzo vs deformación unitaria

En la figura 4.16 podemos observar que las sogas posee un módulo de elasticidad “E” igual a 610Mpa. En una línea de la estructura reforzada puede haber varias sogas. La rigidez total de la línea de refuerzo “K” se estima mediante la fórmula:

$$K = \frac{N * E * A}{L}$$

Donde “N” es el número de sogas en la fila, “E” corresponde al módulo de elasticidad, “A” al área y “L” a la longitud. En la tabla 4.1 se muestra las rigideces para cada grupo de sogas horizontales según su longitud:

Tabla 4.1: Rigidez equivalente en cada línea de sogas

Tipo	Rigidez	Posición
Línea de refuerzo de 4 sogas de 675mm de longitud	26.6 N/mm	A la altura de la ventana
Línea de refuerzo de 4 sogas de 1800mm de longitud	10 N/mm	Arriba y debajo de la ventana

Estos valores serán utilizados cuando se modele computacionalmente el refuerzo

#### 4.4. Teoría de modelos

Para poder estudiar el comportamiento dinámico de un determinado tipo de estructuras se agrupa a todas por conveniencia en una sola estructura idealizada. Esta estructura debe proveer toda la información necesaria para el estudio del problema. Esta estructura representa un sistema llamado prototipo. Para poder definir precisamente el sistema de estudio es común que se realicen muchas asunciones. Estas asunciones dan lugar a la creación de un nuevo sistema llamado prototipo idealizado. En la figura 4.17 se puede observar el flujo del análisis del problema. Una primera alternativa para resolver el problema es mediante un modelo matemático. Este modelo puede resolverse mediante análisis o de manera análoga (experimental). Para poder resolver el problema mediante un modelo matemático las ecuaciones que describen todo el comportamiento deben poder conocerse muy bien. Una segunda alternativa para resolver el problema es mediante un modelo similar. En la práctica es referido simplemente como modelo. Este modelo se define como un sistema similar en apariencia y usualmente con dimensiones más pequeñas que el prototipo (modelo a escala). La utilización de un modelo similar tiene frecuentemente algunas ventajas como el estudio de problemas complejos con mayor facilidad, menor número de asunciones o menor costo. Una desventaja posible en la utilización del modelo es tener ciertos límites en cuanto a la aplicabilidad de los resultados. La teoría de modelos solo sirve en etapa elástica lineal (Jha, 2004).

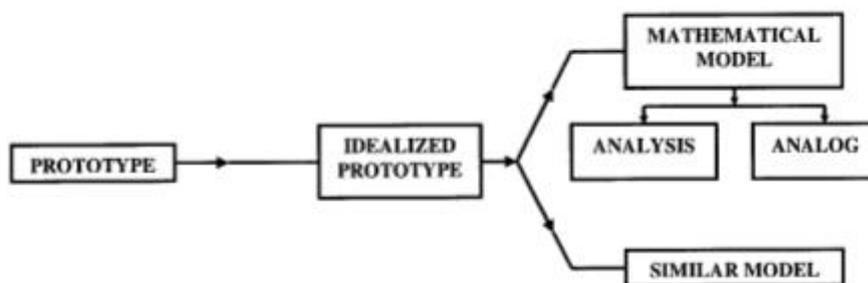


Figure 4.17 Cuadro de flujo del análisis del problema. (Jha, 2004)

Se debe establecer una relación entre el modelo y el prototipo. En un sistema que utiliza un modelo matemático las relaciones aparecen naturalmente pero en un sistema con un modelo similar la relación debe hallarse. Existen dos métodos para obtener la relación entre el prototipo y el modelo. El primer método consiste en el análisis de la ecuación característica

del sistema y el segundo consiste en el análisis dimensional. En el primer método el sistema es descrito en términos del modelo matemático y luego se desarrollan del modelo las leyes de escalamiento, condiciones para el diseño del modelo o requerimientos de similitud. En el segundo método la derivación de las leyes de escalamiento por análisis dimensional requiere que todos los parámetros del sistema sean listados y que se aplique el teorema de Buckingham para obtener la relación entre los elementos adimensionales. El método del análisis dimensional ha sido usado efectivamente por ingenieros en el modelamiento. La complejidad y extensión de un ensayo puede ser ampliamente simplificada utilizando este método. (Jha, 2004)

Todo modelo estructural debe ser diseñado, cargado e interpretado de acuerdo a un conjunto de requerimientos de similitud que relacionen al modelo con el prototipo. Esta similitud puede derivarse a partir del análisis dimensional. Un fenómeno físico puede ser descrito de manera cualitativa mediante unidades fundamentales. Existen 3 clases generales de problemas físicos: los problemas mecánicos, termodinámicos y eléctricos. Todos pueden ser descritos con el uso de 5 unidades fundamentales: longitud, masa, tiempo, temperatura y carga eléctrica. De manera cuantitativa se tiene un número y una unidad estándar de comparación. Esta unidad estándar está asociada a los sistemas de medición comúnmente usados en la actualidad como el sistema Americano, el sistema internacional, el sistema métrico, etc. Todo fenómeno físico puede ser descrito de forma dimensionalmente homogénea, es decir que la ecuación que describe el fenómeno debe ser válida sin importar la elección de la unidad dimensional en la cual las variables físicas fueron medidas. De esta forma la ecuación que gobierna un fenómeno físico puede expresarse en otros términos. Los sistemas físicos que difieren solamente en la magnitud de sus unidades, como las cantidades en un prototipo y su modelo a escala reducida tienen la posibilidad de encontrar sus relaciones de similitud del resultado de forzar los elementos adimensionales a ser iguales en el modelo y el prototipo, y con la utilización del teorema Pi de Buckingham. (Harris & Sabnis, 1999)

Debido a que el ensayo se realizó a un modelo a escala del prototipo la señal de comando que se utilizó en el ensayo se modificó siguiendo los lineamientos de la teoría de modelos. El factor de escala elegido para el modelo fue de 0.5. Para el presente ensayo se tienen las dimensiones de longitud, tiempo y masa. Debido a que el modelo a escala utiliza una longitud menor y se desea que los esfuerzos obtenidos durante el ensayo al modelo a escala sean los mismos que los que se obtendrían en un ensayo al prototipo se debe hallar los factores de equivalencia para la señal de comando. La señal de comando depende la longitud y el tiempo.

A continuación se halla las relaciones entre el prototipo y el modelo utilizando el teorema Pi de Buckingham para el presente ensayo con el fin de hallar el factor del tiempo para la señal de comando. Debido a que el modelo está construido con una escala reducida en 2 tenemos:

$$Longitud\ prototipo = 2 * Longitud\ modelo$$

Por lo que:

$$Área\ prototipo = 4 * Área\ modelo$$

$$Volumen\ prototipo = 8 * Volumen\ modelo$$

Para la construcción del modelo de adobe se utilizó un material con la misma densidad que la del prototipo. Por esta razón tendremos:

$$Densidad\ prototipo = Densidad\ modelo$$

La relación entre la masa del prototipo y del modelo es:

$$Masa\ prototipo = \lambda m * Masa\ modelo$$

Donde " $\lambda m$ " es un factor por el que se multiplica la masa total del modelo para obtener la masa total del prototipo

$$\begin{aligned} \text{Volumen prototipo} * \text{Densidad prototipo} \\ = \lambda m * \text{Volumen modelo} * \text{Densidad modelo} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8 * \text{Volumen modelo} * \text{Densidad modelo} \\ = \lambda m * \text{Volumen modelo} * \text{Densidad modelo} \end{aligned}$$

Por tanto el factor que relaciona la masa del prototipo y el modelo " $\lambda m$ " es:

$$\text{Masa prototipo} = \lambda m \text{ Masa modelo} , \quad \lambda m = 8$$

Para el análisis de la presente tesis se busca que los esfuerzos en el modelo sean iguales a los esfuerzos en el prototipo de manera que:

$$\text{Esfuerzos prototipo} = \text{Esfuerzos modelo}$$

$$\frac{\text{Fuerza prototipo}}{\text{Área prototipo}} = \frac{\text{Fuerza modelo}}{\text{Área modelo}}$$

$$\frac{\text{Fuerza prototipo}}{4 * \text{Área modelo}} = \frac{\text{Fuerza modelo}}{\text{Área modelo}}$$

$$0.25 \text{ Fuerza prototipo} = \text{Fuerza modelo}$$

Luego teniendo en cuenta que fuerza=masa\*aceleración tendremos:

$$\text{Masa prototipo} * \text{aceleración prototipo} = 4 * \text{Masa modelo} * \text{aceleración modelo}$$

Sabiendo que aceleración=longitud/tiempo<sup>2</sup> y sustituyendo algunas igualdades tendremos:

$$8 * \text{Masa modelo} * \frac{2 * \text{Longitud modelo}}{\text{tiempo prototipo}^2} = 4 * \text{Masa modelo} * \frac{\text{Longitud modelo}}{\text{tiempo modelo}^2}$$

$$4 * \text{tiempo modelo}^2 = \text{tiempo prototipo}^2$$

$$\text{tiempo modelo} = 0.5 * \text{tiempo prototipo}$$

Es decir que para poder obtener esfuerzos iguales en la mampostería del prototipo y el modelo tendremos que dividir el intervalo de tiempo de la señal de comando del modelo entre 2.

Se observa con una aceleración igual a la mitad de la aceleración utilizada en el modelo se tendrá el mismo valor de esfuerzos en la mampostería del prototipo.

$$\text{aceleracion modelo} = 2 * \text{aceleracion prototipo}$$

Se observa que para el caso de un modelo reforzado con sogas las fuerzas en las sogas en el prototipo serán 4 veces el resultado de las fuerzas en las sogas obtenidas en el modelo.

### Tabla resumen

Ecuacion general de relación:  $\lambda p * \text{Medida Prototipo} = \lambda m * \text{Medida Modelo}$

Medida	Factor del prototipo " $\lambda p$ "	Factor del modelo " $\lambda m$ "
Esfuerzos	1	1
Fuerza	0.25	1
Tiempo	0.5	1
Aceleración	2	1

#### 4.5. Señal de comando para el prototipo

El registro de aceleración del suelo elegido para el ensayo de simulación sísmica al prototipo corresponde al acelerograma del sismo registrado en la ciudad de Lima en el año 1970 del terremoto con epicentro cerca de la ciudad de Chimbote. Se eligió esta señal por tener un espectro compatible con el espectro de la norma peruana.

En el ensayo de simulación sísmica se utiliza una señal de desplazamiento que corresponde al movimiento de la mesa y simula el movimiento del suelo. La señal de desplazamiento del prototipo se obtuvo a partir del registro de aceleración del sismo de Lima de 1970. En la figura 4.18 se muestra la señal de desplazamiento con amplitud de 112mm y con intervalo de 0.01 segundos.

La señal de comando tiene una amplitud máxima de 112 mm. Esta señal es la que se utilizaría en un ensayo de simulación sísmica a escala natural a un prototipo de vivienda de mampostería de adobe de 2 pisos. Debido a que la mesa del laboratorio de estructuras de la PUCP tiene un peso máximo con el que puede realizar ensayos no es posible un ensayo a escala natural y es necesario utilizar modelos a escala reducida.

En la figura 4.19 se muestra el gráfico de la señal de aceleración en el tiempo derivada de la señal de desplazamiento con amplitud de 112mm. Los valores de la señal de aceleración para cada intervalo se obtuvieron utilizando las siguientes ecuaciones:

$$v_i = \frac{df - do}{intervalo} ; a_i = \frac{vf - vo}{intervalo}$$

Donde:  $df$ =desplazamiento final ;  $do$ =desplazamiento inicial ;  $v_i$ =velocidad en el intervalo “i” ;  $vf$ =velocidad final ;  $vo$ =velocidad inicial ;  $a_i$ =aceleración en el intervalo “i”.

En la figura 33 se puede observar que la señal de aceleración tiene valores máximos de 4.2 y 5.5 m/s<sup>2</sup>. Esta señal de aceleración sería la que se utilizaría en un modelo numérico del prototipo.

#### 4.6. Señal de comando para el modelo

De acuerdo a lo desarrollado en la sección 3.3 teoría de modelos, para que los esfuerzos obtenidos en el modelo sean iguales a los esfuerzos en el prototipo, el tiempo y la longitud en el modelo deberán ser de la mitad a los del prototipo. La señal de desplazamiento del modelo tendrá un intervalo y una amplitud que será la mitad de lo usado para la señal de desplazamiento del prototipo. El intervalo de la señal pasará de 0.01 a 0.005 segundos y la amplitud de 112 a 56. En la figura 4.20 se muestra la señal de desplazamiento del modelo la cual se tiene una amplitud de 56mm pero corresponde a la señal de “60mm de amplitud” que se utilizará en el ensayo de simulación sísmica.

En la figura 4.21 se muestra la señal de aceleración para el modelo obtenida a partir de la señal de desplazamiento con amplitud de 60mm. Esta señal corresponde a la señal de “60mm de amplitud” que se utilizará para realizar el análisis sísmico de los modelos computacionales. En la figura 4.19 se puede observar que la señal de aceleración para el modelo tiene valores máximos de 8.3 y 11 m/s<sup>2</sup>. Comparando los resultados de aceleración máxima de las señales del prototipo y modelo podemos observar la siguiente relación

$$aceleración\ modelo = \frac{11}{5.5} * aceleración\ prototipo = 2 * aceleración\ prototipo$$

Esto equivale a usar una señal de aceleración en el modelo con una amplitud 2 veces mayor y concuerda con lo desarrollado en la sección de teoría de modelos.

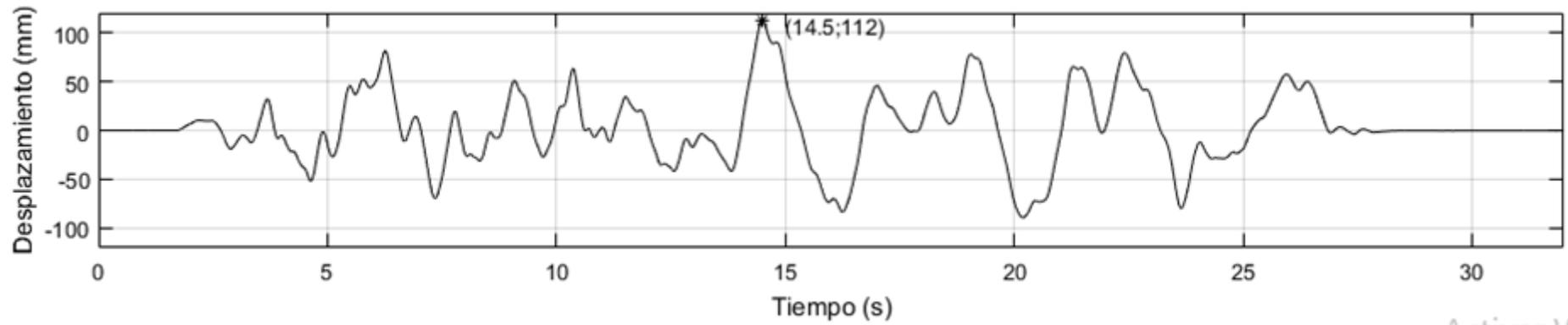


Figure 4.18 Señal de desplazamiento en el prototipo

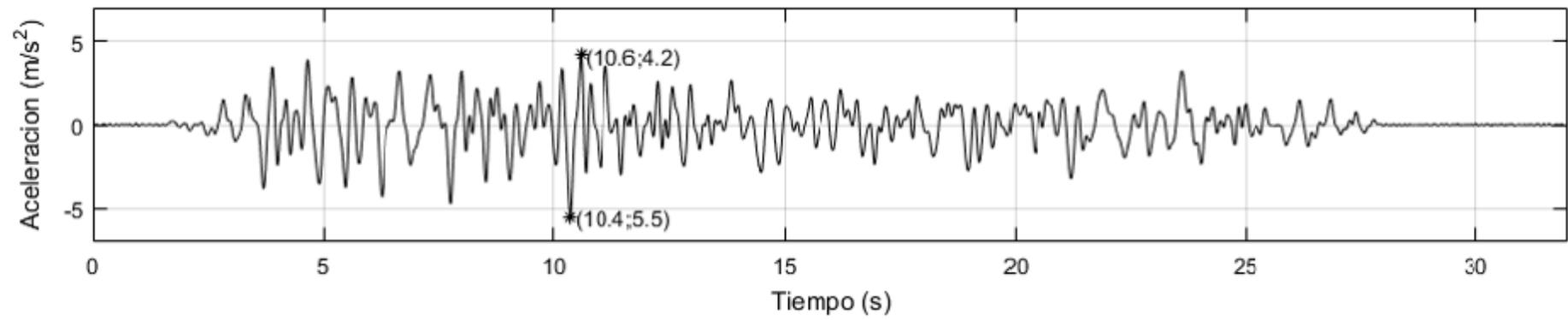


Figure 4.19 Señal de aceleración en el prototipo

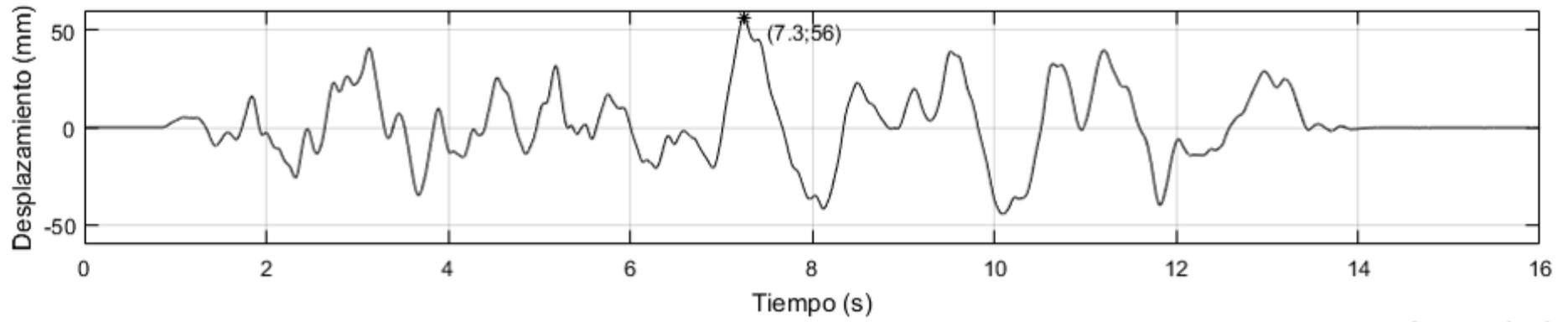


Figure 4.20 Señal de desplazamiento en el modelo

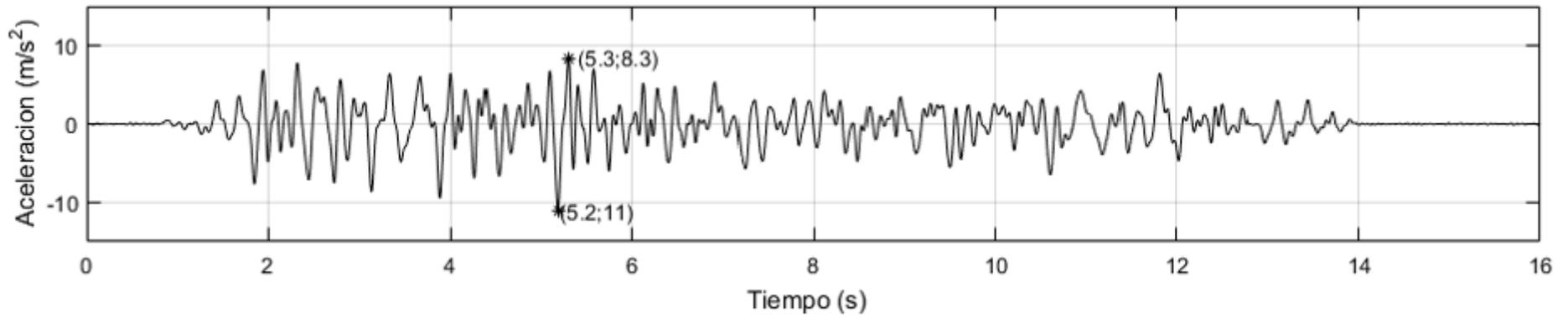


Figure 4.21 Señal de aceleración en el modelo

#### 4.7. Puntos de medición en el ensayo

Se colocaron 8 dispositivos de medición LVDT, 2 celdas de carga y dos deformímetros. Los dispositivos LVDT miden el desplazamiento absoluto, las celdas de carga miden la fuerza en alguna soga y los deformímetros miden la deformación entre dos puntos de manera local. En la figura 4.22 se muestra una vista isométrica del modelo de vivienda y una vista en planta que indica las vistas en elevación.

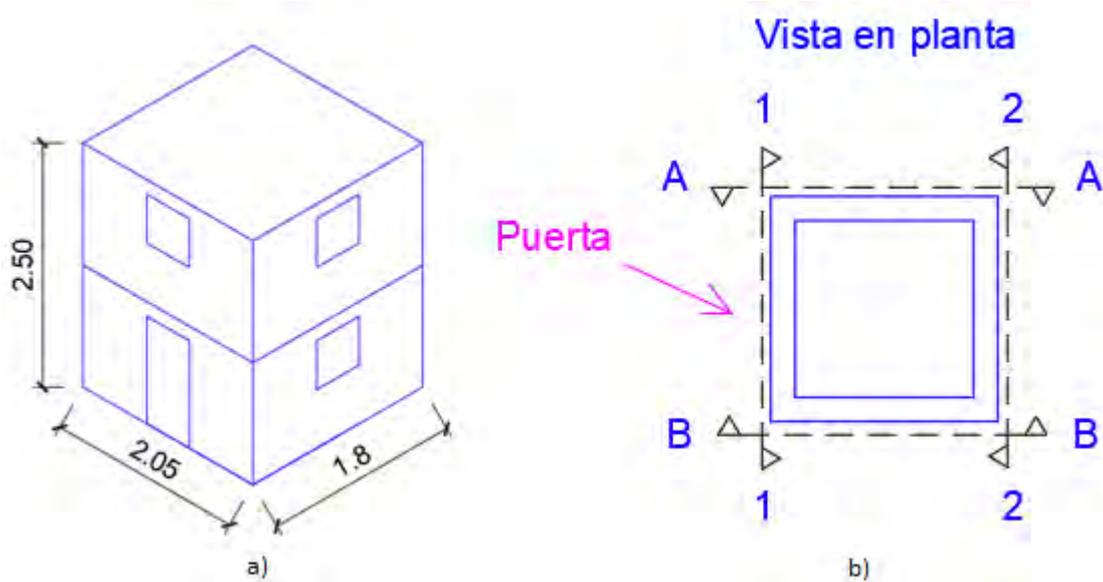


Figure 4.22 (a) Vista 3D del modelo a escala. (b) Vista en planta del modelo.

En la figura 4.23 y 4.24 se muestra las vistas en elevación con los puntos donde se colocaron los dispositivos de medición LVDT (D#) y los acelerómetros (A#).

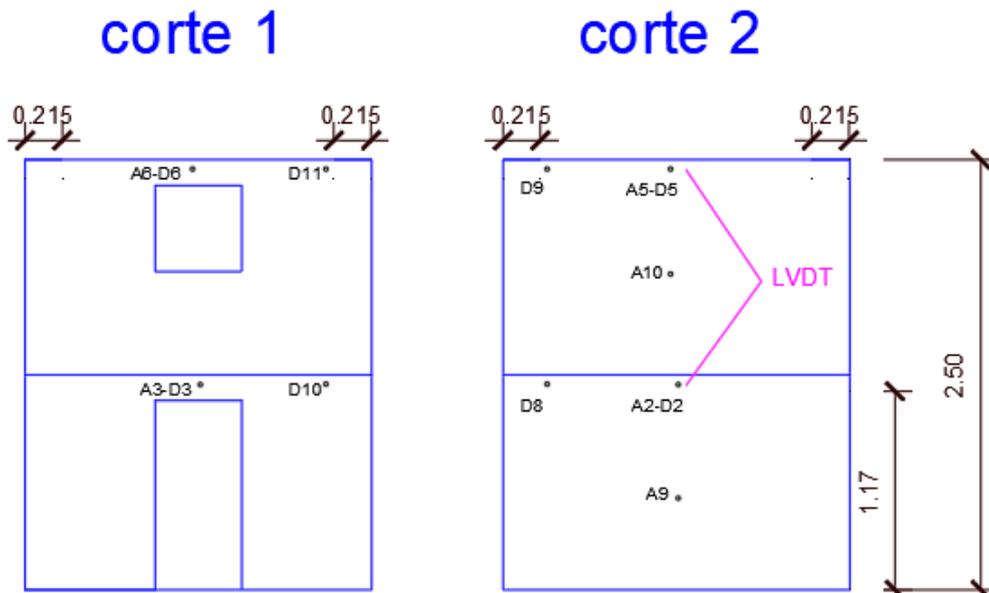


Figure 4.23 Vista en elevación (a) muro frontal. (b) muro posterior mostrando la ubicación de los dispositivos.

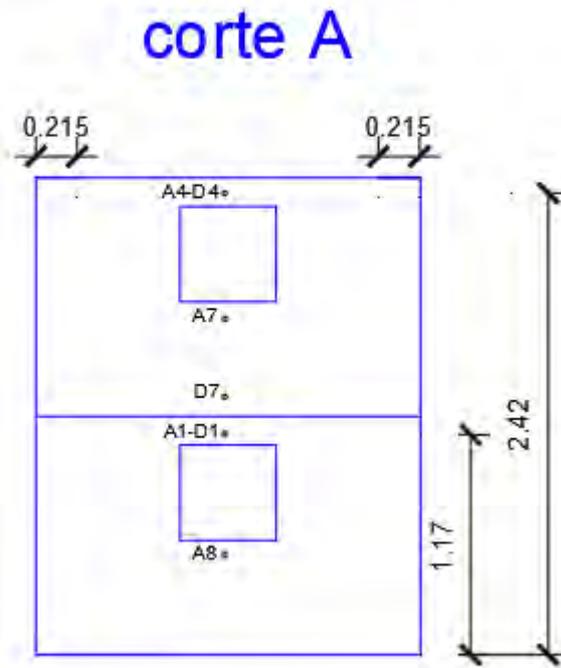


Figure 4.24 Vista en elevación del muro lateral mostrando la ubicación de los dispositivos

En la figura 4.25 se muestra los lugares donde se colocaron las celdas de carga para medir las fuerzas en las sogas. A su vez se muestra el lugar donde se colocaron los deformímetros.

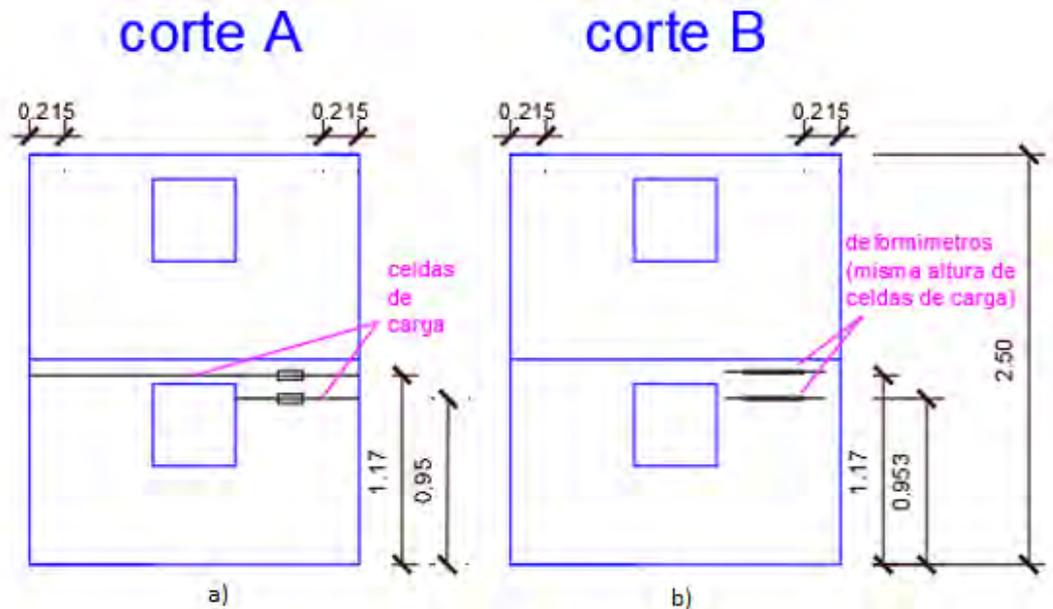


Figure 4.25 (a) Vista del muro lateral izquierdo. (b) Muro lateral derecho.

#### 4.8. Resultados del ensayo al modelo no reforzado

De los ensayos realizados solo se extrae las mediciones de desplazamiento realizadas de algunos de los dispositivos. Se extrae las mediciones de los dispositivos LVDT D8 y D9 que corresponden al desplazamiento a la altura del primer y segundo piso respectivamente. En la figura 4.26 se indica (a) la dirección de medición (b) ubicación de los dispositivos marcados con un círculo.

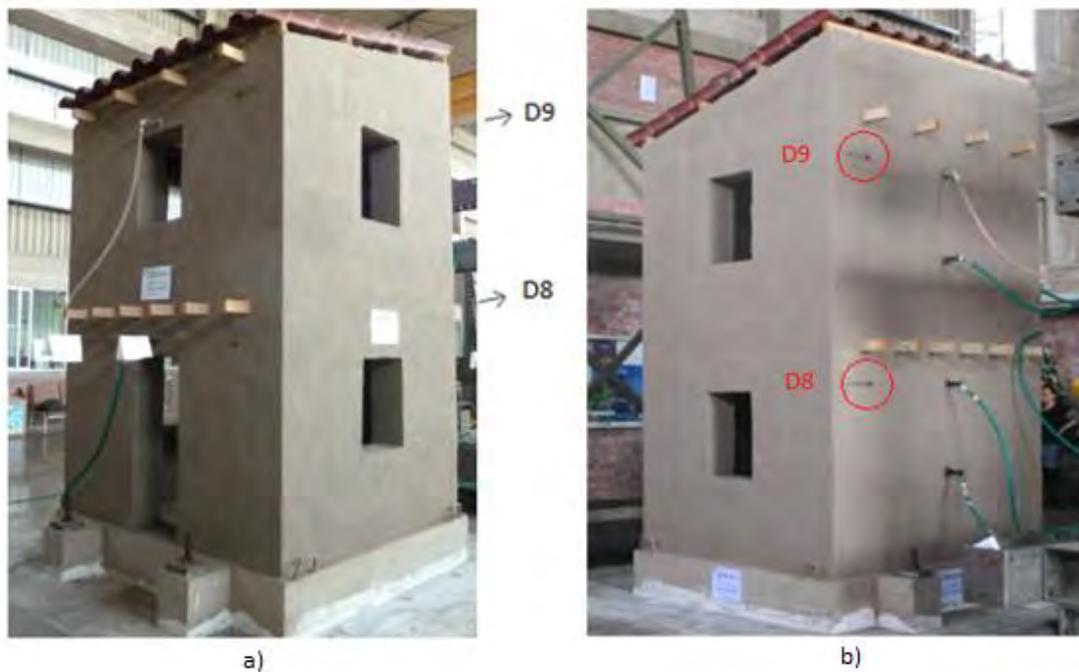


Figure 4.26 (a) Desplazamientos D8 y D9. (b) Ubicación de los dispositivos.

También se extrae el desplazamiento de la base o mesa vibradora. Luego se resta el desplazamiento de los puntos D8 y D9 menos el desplazamiento de la base en cada instante de tiempo para obtener el desplazamiento relativo. El desplazamiento relativo es necesario para comparar resultados porque muchos de los programas de análisis numérico entregan desplazamientos relativos y no absolutos.

En las figuras 4.27 y 4.28 se muestran los desplazamientos relativos en los puntos de medición D8 y D9 para los ensayos a los modelos de vivienda de adobe de 2 pisos sin refuerzo bajo una señal de movimiento de la base de 15mm y 60mm de amplitud máxima respectivamente. Para la señal de 15mm se puede observar un desplazamiento máximo de 4.5mm y 8.7mm para los puntos D8 y D9 respectivamente. Para la señal de 60mm se puede observar un desplazamiento máximo de 48.2mm y 120.6mm para los puntos D8 y D9 respectivamente.

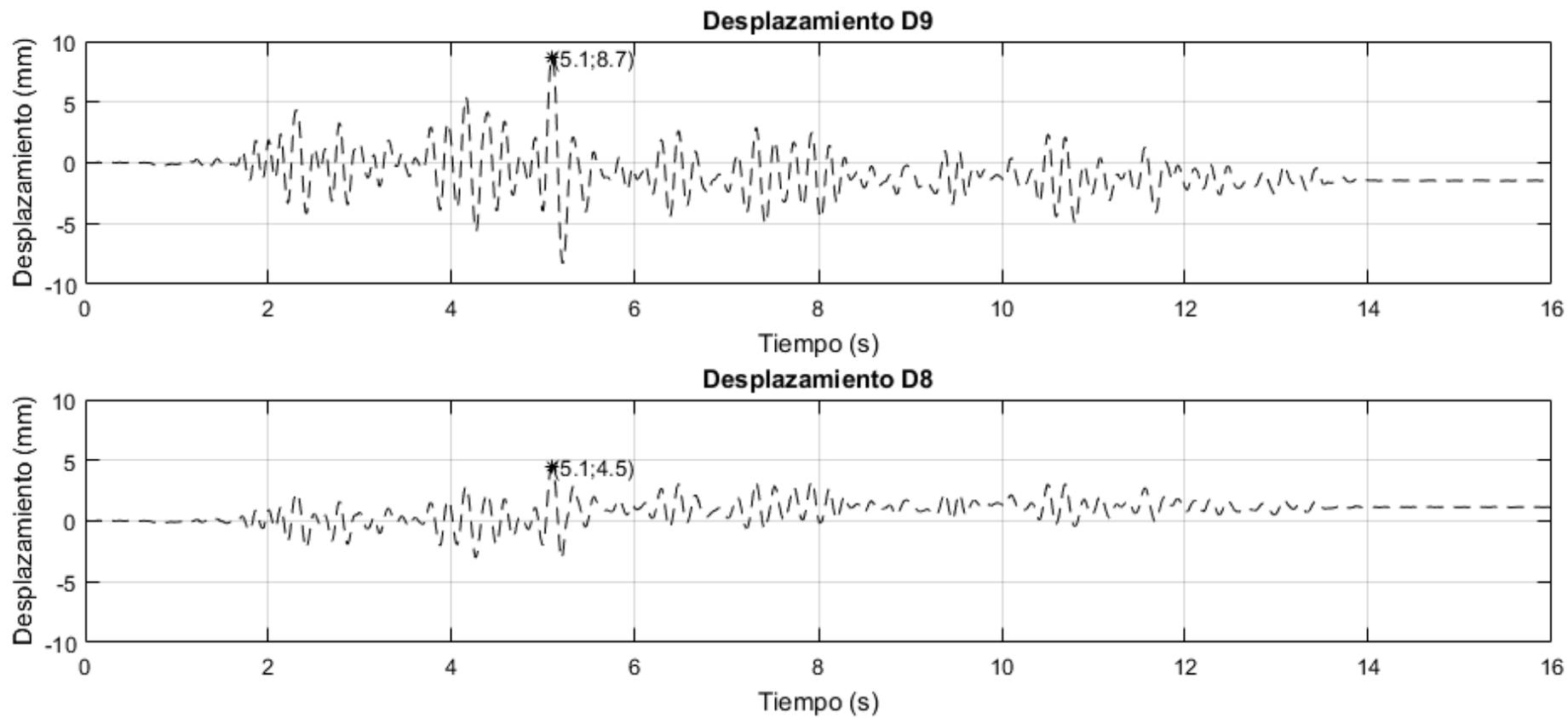


Figure 4.27 Desplazamientos. Primer ensayo al módulo no reforzado. Fase 1. (15mm)

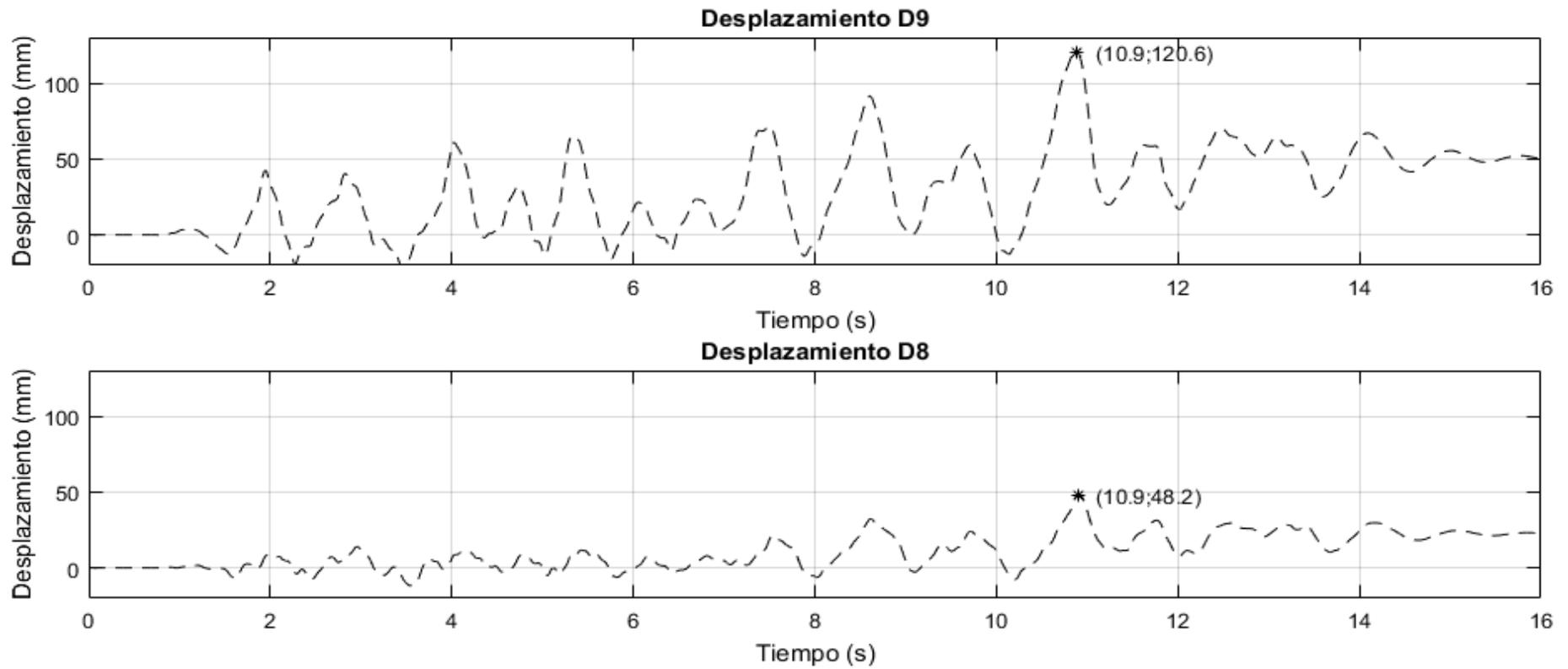


Figure 4.28 Desplazamientos. Segundo ensayo al módulo no reforzado. Fase 1. (60mm)

#### 4.9. Resultados del ensayo al modelo reforzado

En la figura 4.29 se muestra una vista del ensayo al módulo de adobe reforzado con la ubicación de las celdas de carga F1 y F2 encerradas con un círculo. Las celdas están amarradas en sus extremos a la soga de refuerzo. Para la instalación de la celda se cortó la soga, se amarró la soga a la celda y se volvió a tensar. La celda mide la respuesta en fuerza en 1 soga.



*Figure 4.29 Modelo de 2 pisos de mampostería de adobe reforzado con sogas con tarrajeo*

Las celdas de carga se colocaron en una de las líneas de refuerzo pero solo están amarradas a una de las sogas y miden por tanto la fuerza en una soga. Para poder amarrar las celdas de carga a las sogas es necesario omitir el tarrajeo de algunas zonas del módulo.

Se realizó un ensayo al modelo con tarrajeo porque es lo más parecido al acabado final de una vivienda y un ensayo sin tarrajeo para poder observar el daño en las cuerdas y sobre todo las grietas en la mampostería. En la figura 4.30 se muestra el módulo de adobe reforzado sin tarrajeo luego del ensayo de 60mm.



*Figure 4.30 Modelo de 2 pisos reforzado con sogas sin tarrajeo. Ensayo de 60mm*

En las figuras 4.31 y 4.32 se muestran los desplazamientos en los puntos de medición D8 y D9 para los ensayos a los modelos de vivienda de adobe de 2 pisos reforzados bajo una señal de movimiento de la base de 15mm y 60mm de amplitud máxima respectivamente. Para la señal de 15mm se puede observar un desplazamiento máximo de 4mm y 7.3mm para los puntos D8 y D9 respectivamente. Para la señal de 60mm se puede observar un desplazamiento máximo de 48mm y 84.8mm para los puntos D8 y D9 respectivamente.

En las figuras 4.33 y 4.34 se muestran las fuerzas medidas en las celdas de carga F1 y f2 para los ensayos a los modelos de vivienda de adobe de 2 pisos reforzados bajo una señal de movimiento de la base de 15mm y 60mm de amplitud máxima respectivamente. Para la señal de 15mm se puede observar una fuerza máxima de 7.9N y 2.6N para los puntos F1 y F2 respectivamente. Para la señal de 60mm se puede observar una fuerza máxima de 33.3N y 91.4N para los puntos F1 y F2 respectivamente.



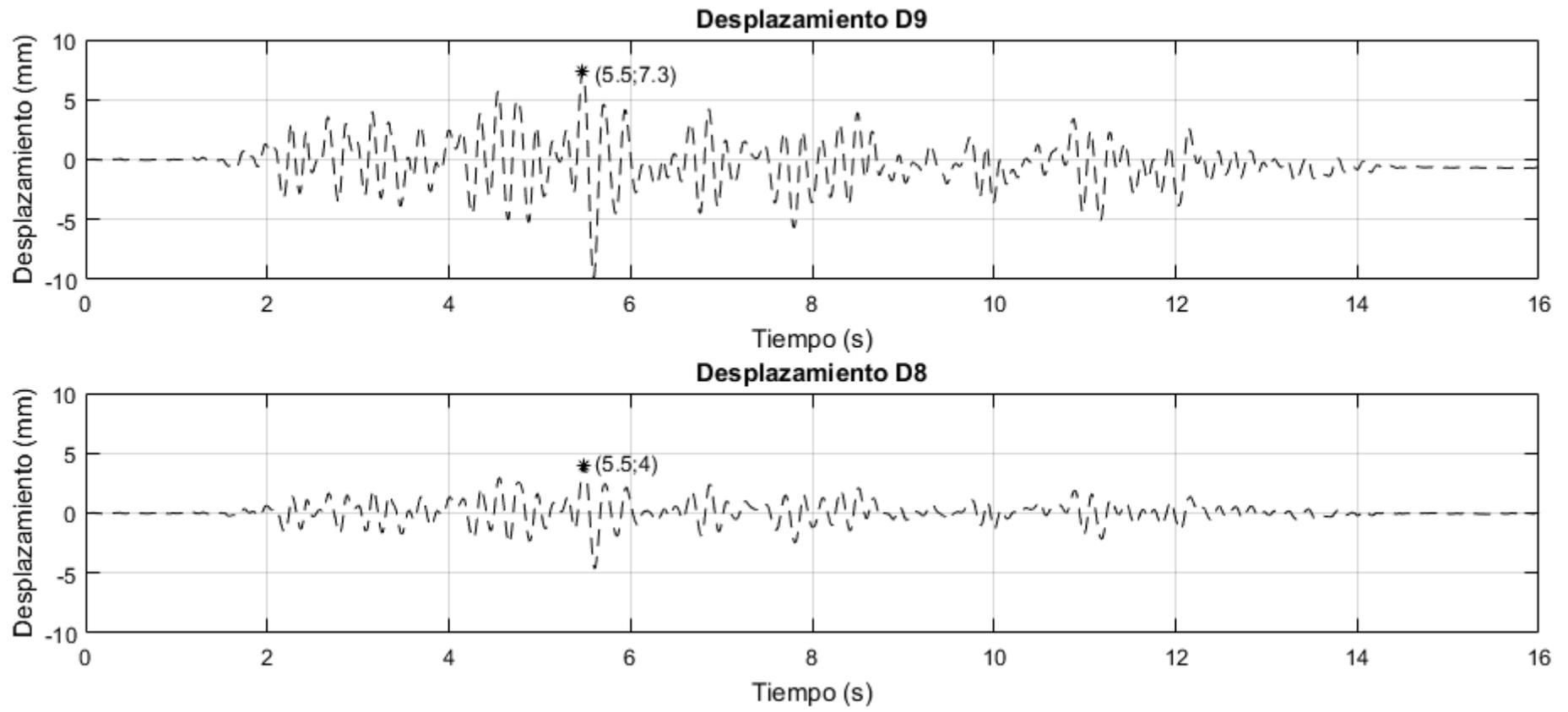


Figure 4.31 Desplazamientos. Segundo ensayo al módulo reforzado. Fase 1 (15mm)

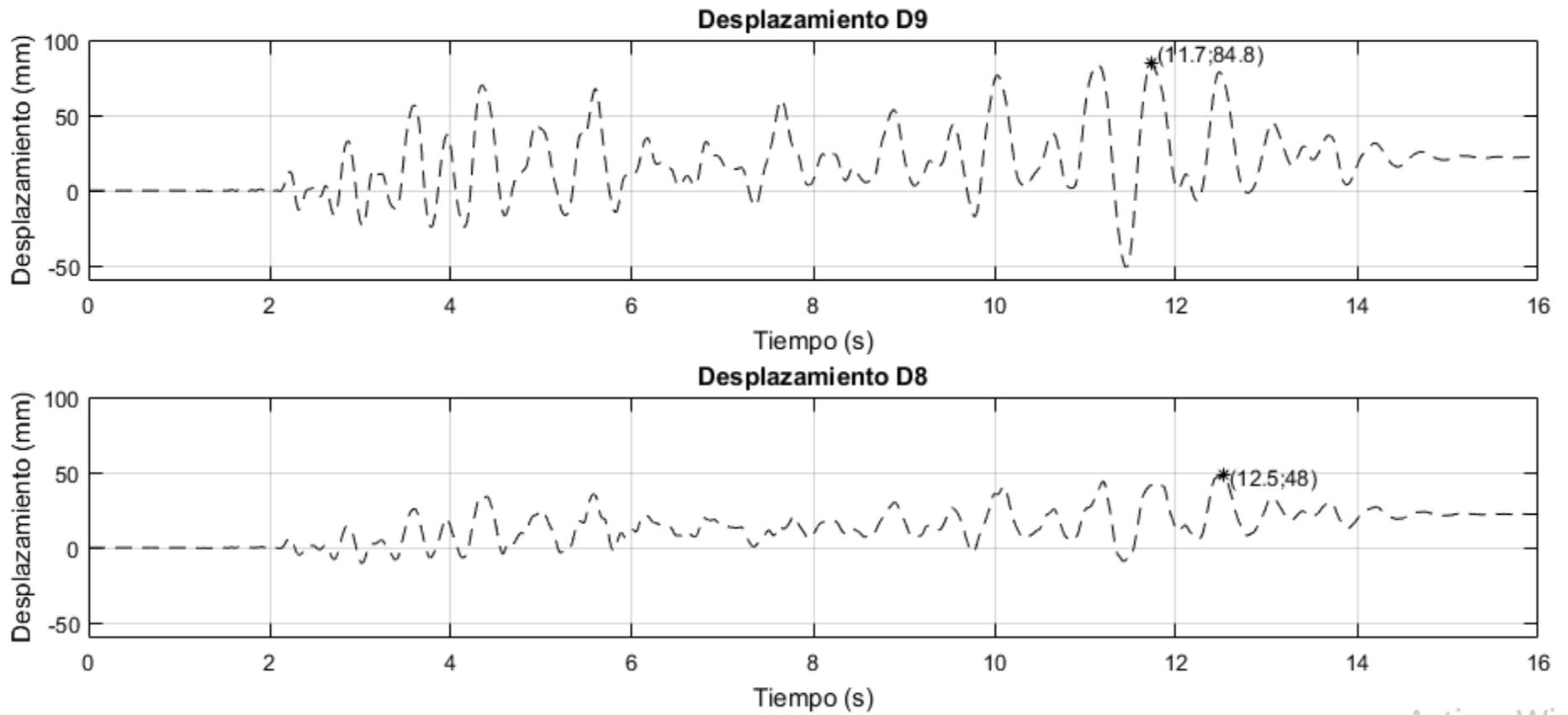


Figure 4.32 Desplazamientos. Segundo ensayo al módulo reforzado. Fase 1 (60mm)

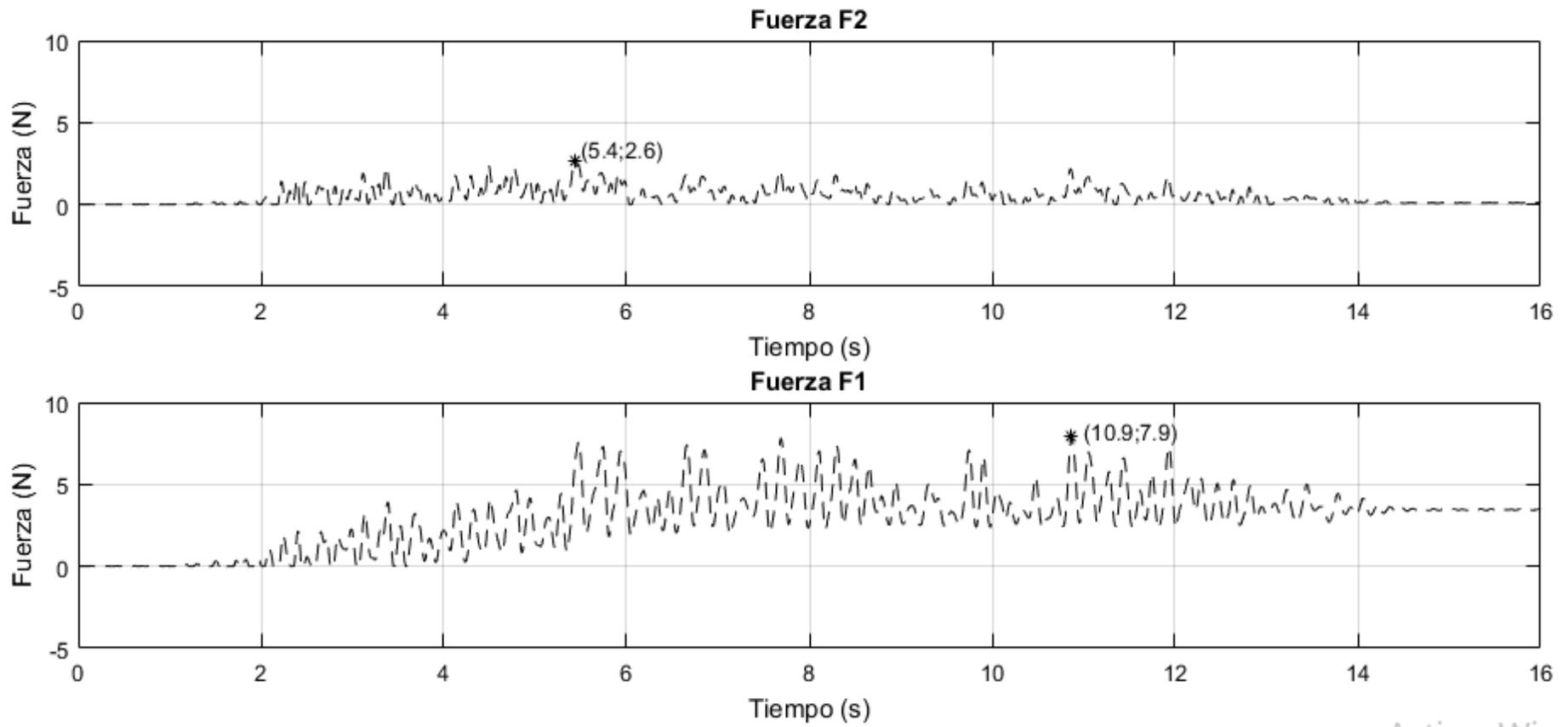


Figure 4.33 Fuerzas en una soga. Segundo ensayo al módulo reforzado (15mm)

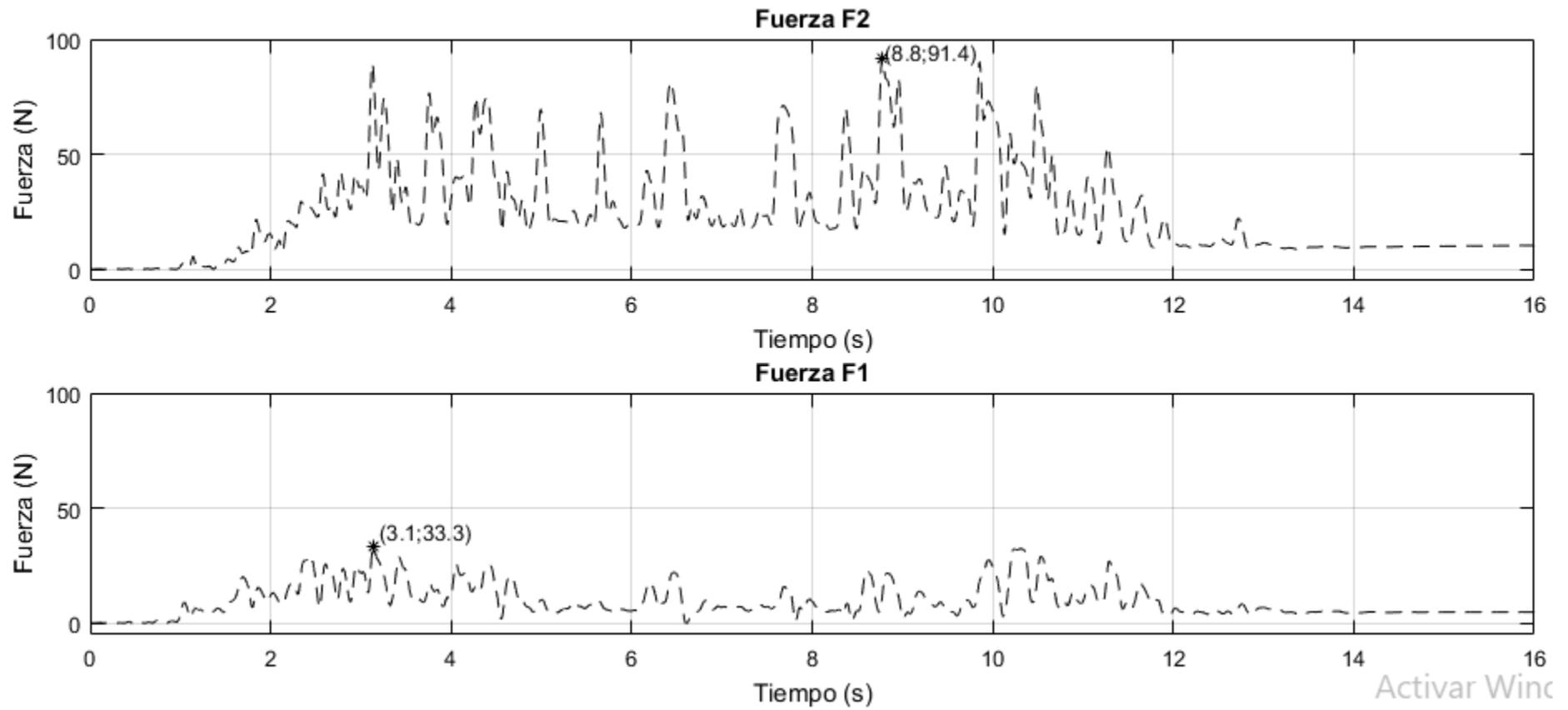


Figure 4.34 Fuerzas en una sogá. Segundo ensayo al módulo reforzado (60mm).

#### 4.10. Estados de daño en los modelos de vivienda ensayados

A continuación se describe lo observado en las fases utilizadas en la presente tesis.

##### Ensayo con amplitud de 15mm del modelo no reforzado

Este ensayo pertenece a la fase 1 del primer modelo no reforzado evaluado. Este ensayo no tuvo una fase previa por lo que el modelo no estaba dañado antes del ensayo. El modelo osciló durante el ensayo dentro del rango elástico. El periodo fue aproximadamente de 0.2s en el instante de mayor desplazamiento lateral. Se observó la formación de pequeñas grietas superficiales. No hubo desprendimiento de tarrajeo.

En la figura 4.35 se muestra el estado de daño del modelo de vivienda de adobe de 2 pisos luego del ensayo. Se puede observar que las grietas originadas luego del ensayo de 15mm son muy pequeñas y los bloques de colapso no se han formado.

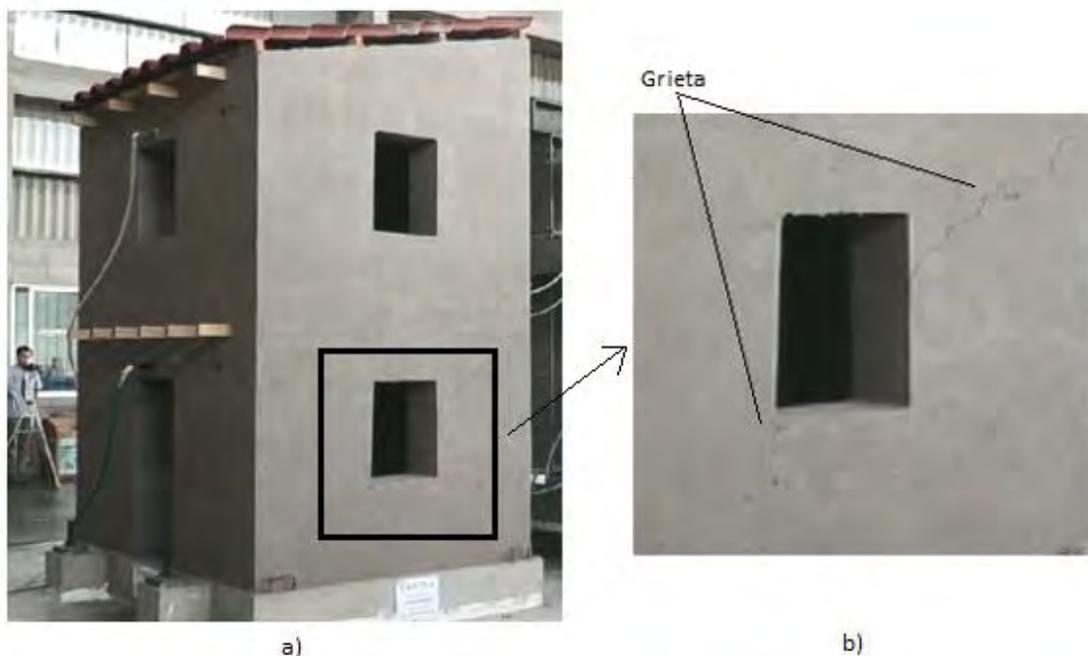


Figure 4.35 (a) Modelo de vivienda sin refuerzo. Ensayo (15mm). (b) Acercamiento.

##### Ensayo con amplitud de 60mm del modelo no reforzado

Este ensayo pertenece a la fase 2 del segundo modelo no reforzado evaluado. Este ensayo tuvo una fase previa con amplitud de 40mm por lo que el modelo ya se encontraba dañado antes del ensayo. En el ensayo de 40mm se observó un desprendimiento vertical del techo, grietas diagonales en las esquinas de las ventanas y trituration de la mampostería debajo de la ventana del segundo piso.

El modelo no se mantuvo en el rango elástico. Se observó la formación de bloques de colapso y tuvo un periodo aproximado de 0.5s en el instante de mayor desplazamiento lateral. En la figura 4.36 se muestra el estado de daño del modelo no reforzado luego del ensayo con una amplitud de 40mm.



*Figure 4.36 Modelo de vivienda sin refuerzo luego del ensayo con amplitud de 40mm*

En el ensayo con amplitud de 60mm se observó gran deterioro de la estructura y desprendimiento de material. El periodo de la estructura fue aproximadamente de 1s en el instante de mayor desplazamiento lateral. En la figura 4.37 se observa el modelo luego del ensayo de 60mm de amplitud. Se tiene un gran daño en el modelo y los bloques de colapso se han formado. Se tiene un desplazamiento residual considerable. Se observa deslizamiento horizontal entre los bloques de colapso. Para este caso la estructura se encuentra en un estado muy inestable y a punto de colapsar.



*Figure 4.37 Modelo de vivienda sin refuerzo luego del ensayo con amplitud de 60mm.*

Para observar la capacidad máxima del modelo no reforzado se lo sometió a una tercera fase luego de la fase 2 de amplitud de 60mm. La nueva fase tuvo una amplitud de 90mm. En esta fase se observa el colapso total del modelo de vivienda de mampostería de adobe. En la figura 4.38 se observa el colapso del bloque conformado por el dintel del segundo piso señalado con un círculo. El colapso del dintel ocurrió a los 4 segundos de iniciado el ensayo de 90mm.



*Figure 4.38 Modelo de vivienda sin refuerzo durante el ensayo con amplitud de 90mm (a)*

A los 5 segundos se produce el colapso de una porción del muro posterior del primer piso señalado con un círculo en la figura 4.39.



*Figure 4.39 Modelo de vivienda sin refuerzo durante el ensayo con amplitud de 90mm (b)*



*Figure 4.40 Modelo de vivienda sin refuerzo durante el ensayo con amplitud de 90mm (c)*

En la figura 4.40 se observa el desprendimiento de los bloques del primer y segundo piso señalados con un círculo ocurrido a los 9 segundos de haber comenzado el ensayo de 90mm.



*Figure 4.41 Modelo de vivienda sin refuerzo durante el ensayo con amplitud de 90mm (d)*

En la figura 4.41 se observa el instante en que inicia el colapso completo del modelo de vivienda el cual se produce a los 10 segundos de haber comenzado el ensayo.



*Figure 4.42 Modelo de vivienda sin refuerzo luego del ensayo con amplitud de 90mm*

En la figura 4.42 se observa el modelo de vivienda totalmente colapsado.

#### **Ensayo con amplitud de 15mm del modelo reforzado**

Este ensayo pertenece a la fase 1 del primer modelo reforzado evaluado. Este ensayo no tuvo una fase previa por lo que el modelo no estaba dañado antes del ensayo. El modelo osciló durante el ensayo dentro del rango elástico. El periodo fue aproximadamente de 0.2s en el instante de mayor desplazamiento lateral. No se observó la formación de grietas superficiales.

En la figura 4.42 se muestra el modelo de vivienda de adobe luego del ensayo con amplitud de 15mm. Luego del ensayo el modelo se encuentra totalmente operacional y no necesita ninguna reparación.



*Figure 4.43 Modelo de adobe reforzado luego del ensayo con amplitud de 15mm.*

### Ensayo con amplitud de 60mm del modelo reforzado

Este ensayo pertenece a la fase 1 del segundo modelo reforzado evaluado. Este ensayo no tuvo una fase previa por lo que el modelo no estaba dañado antes del ensayo. En el modelo se observó la formación de grietas y bloques de colapso. Estos bloques se desplazaron en menor medida que en el ensayo del modelo de vivienda no reforzado con una amplitud de 60mm. El periodo fue aproximadamente de 0.4s en el instante de mayor desplazamiento lateral.

En la figura 4.38 se muestra el modelo de vivienda reforzado luego del ensayo con una amplitud de 60mm. Para este ensayo se pintó el modelo de blanco y se omitió el tarrajeo para observar mejor las grietas. Se observó gran daño en la estructura pero esta permanece estable y no hay riesgo de colapso gracias al refuerzo. Se observa cierto desplazamiento residual y deslizamiento horizontal entre los bloques de colapso.



Figure 4.44 Modelo de adobe reforzado luego del ensayo con amplitud de 60mm

## 5. ANÁLISIS NUMÉRICO Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

### 5.1. Análisis lineal

Se construyó un modelo elástico lineal en el programa SAP2000 utilizando un módulo de elasticidad  $E=200\text{MPa}$  obtenido del ensayo de compresión realizado a la mampostería de adobe y un módulo de elasticidad de  $600\text{MPa}$  para el refuerzo. En la figura 5.1 se muestra el modelo computacional con y sin refuerzo.

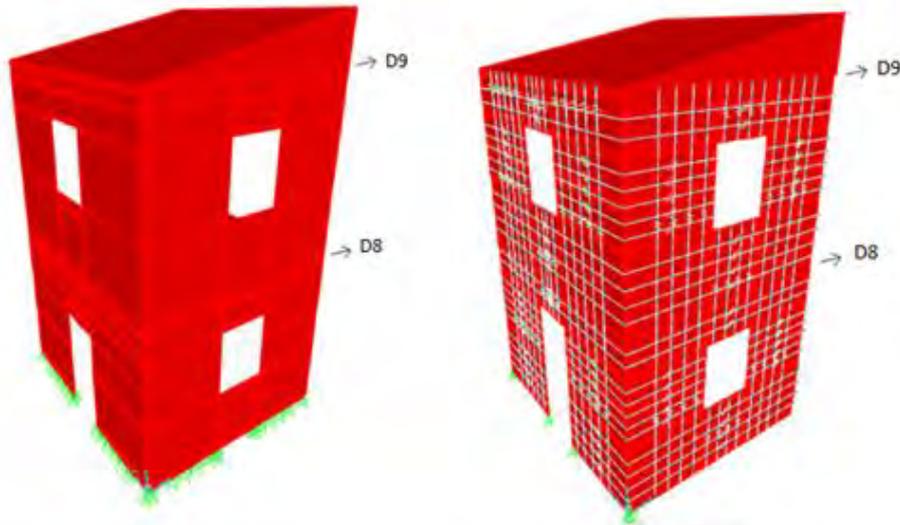


Figure 5.1 Vista del modelo computacional reforzado (izquierda) y sin refuerzo (derecha)

Al realizar un análisis sísmico utilizando la señal de aceleración con amplitud de  $60\text{mm}$  se obtuvieron desplazamientos laterales y fuerzas en las sogas muy pequeñas. Esto debido a que el modelo resulta en un sistema demasiado rígido. Estos resultados no concuerdan con los resultados obtenidos en el ensayo de laboratorio por tanto este modelo no es adecuado.

### 5.2. Análisis con mecanismos de falla y bloques rígidos

#### 5.2.1. Modelamiento

El modelo computacional de la estructura de mampostería de adobe agrietada se modela en SAP2000 utilizando elementos “shell” y elementos “link”. Los muros del modelo computacional se construyen con elementos “shell”. El elemento shell es un objeto tipo área incorporado en el programa. La figura 5.2 muestra el esquema de un elemento tipo Shell. Este elemento rectangular cuenta con 3 o 4 nodos en cada esquina y 5 grados de libertad por nodo. Tres grados de libertad son traslacionales y dos son rotacionales. (CSI manual, 2016).

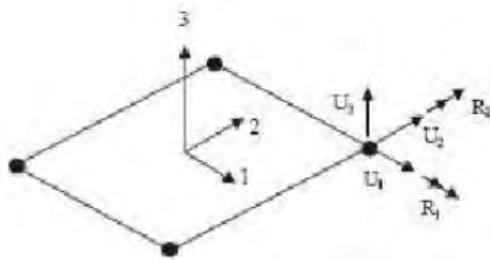


Figure 5.2 Esquema del elemento shell (CSI manual, 2016).

Los elementos link son elementos lineales con 2 nodos en los extremos y 6 grados de libertad en cada nodo pero que además cuentan con características especiales. Para el presente caso se utiliza el elemento link del tipo “friction isolator”. Este tipo de elemento link permite colocar una rigidez independiente en cada grado de libertad tanto para la tracción como para la compresión. Estos elementos link se utilizan para modelar el choque entre elementos shell y el refuerzo con sogas.

En la figura 5.3 se observa (a) el muro del modelo de vivienda (b) el muro del modelo computacional en Sap2000 construido con elementos shell. En la figura 5.3 (b) se observa que los elementos shell están separados entre sí por zonas vacías donde no existe ningún elemento. El espacio que genera las zonas vacías es la idealización de las grietas que se originan en la mampostería de adobe durante el ensayo de simulación sísmica.

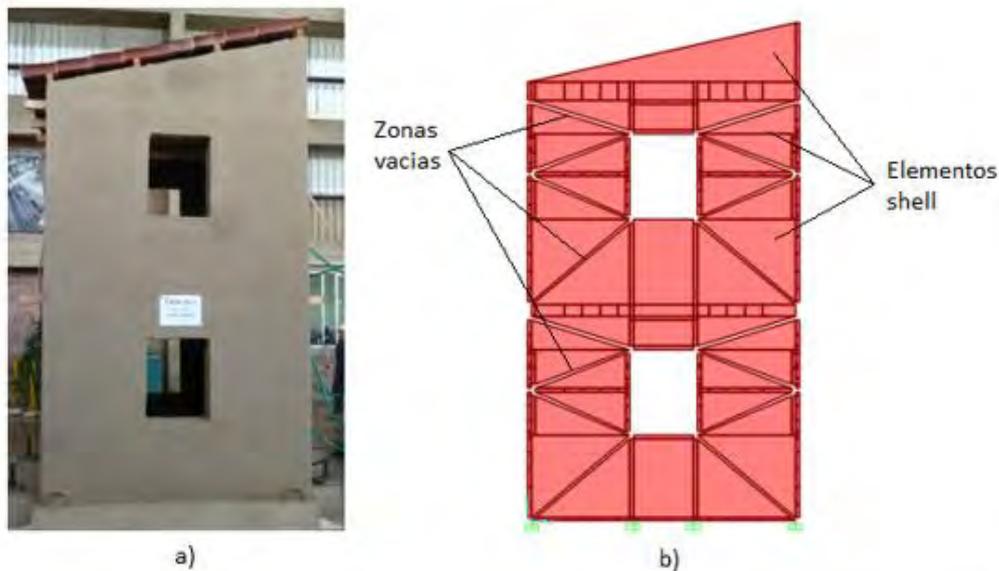


Figure 5.3 (a) Muro del modelo de vivienda (b) Muro del modelo computacional en Sap2000.

Los elementos shell se crean con una rigidez muy grande para que se asemejen a bloques rígidos. Utilizar bloques rígidos disminuye el tiempo de cálculo del programa notablemente. Los bloques o elementos shell están unidos entre sí solamente por elementos “link”. En la figura 5.4 se observa (a) modelo computacional en Sap2000 con elementos link en color verde (b) Acercamiento. Estos elementos “link” solo funcionan a compresión y poseen una rigidez muy grande la cual simula el choque entre bloques. La rigidez a tracción de estos elementos es cero. Debido a que los elementos link tienen una rigidez a la tracción y a la compresión diferente el tipo de análisis requerido en el programa se convierte en no lineal. La rigidez utilizada en estos elementos link es la mayor posible.

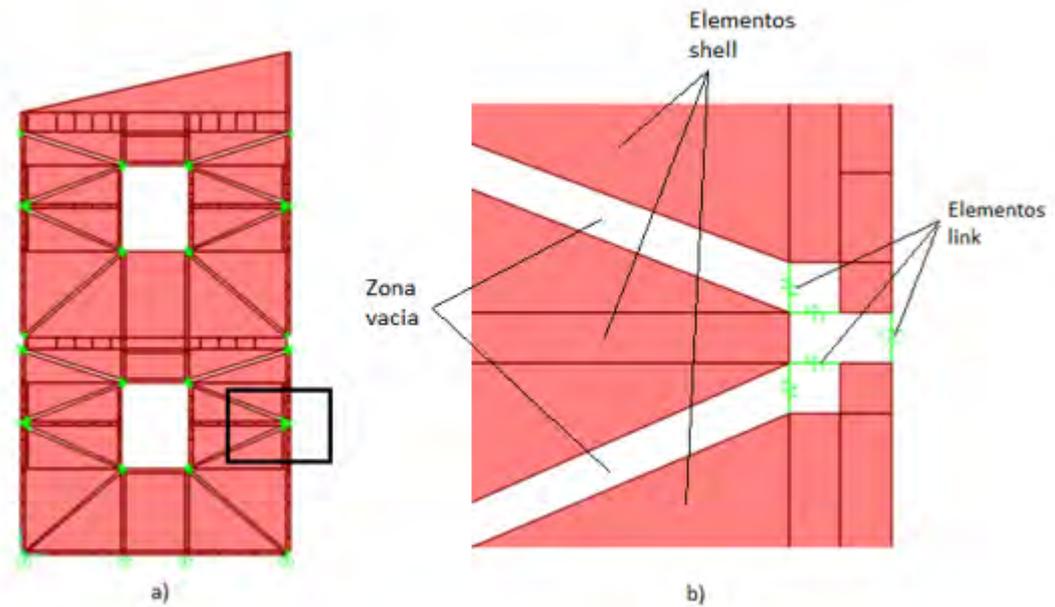


Figure 5.4 (a) Modelo computacional en Sap2000 con elementos link en color verde (b) Acercamiento.

Para incluir el efecto de la gravedad se incluye en el modelo computacional una aceleración constante en dirección vertical hacia el suelo igual a la aceleración de la gravedad.

Para la presente tesis se construyeron dos modelos computacionales con diferentes configuraciones de los bloques rígidos. Estas configuraciones representan los patrones de agrietamiento más comunes encontrados en ensayos anteriores de modelos de vivienda de mampostería de adobe. En la figura 5.5 se muestra la configuración 1 y 2 de los modelos computacionales.

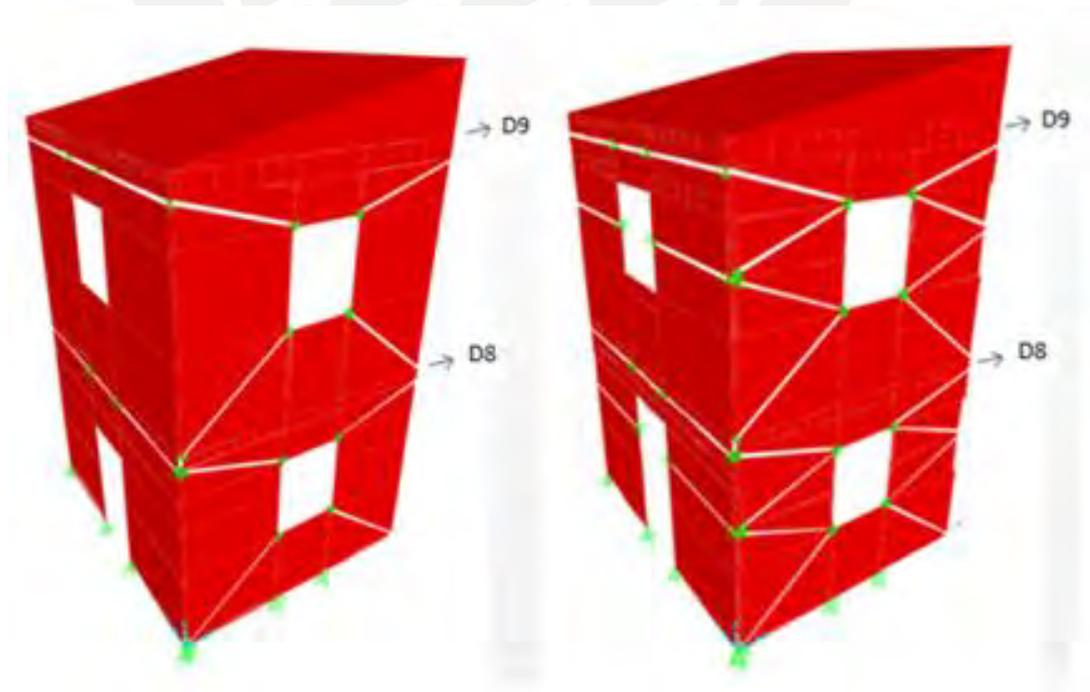


Figure 5.5 Configuración 1 (izquierda). Configuración 2 (derecha).

En el caso de los modelos reforzados con sogas se agrega al modelo computacional una idealización del refuerzo utilizando elementos link. En la figura 5.6 se observa la configuración 1 y la configuración 2 con la idealización del refuerzo incorporada. Los elementos link que idealizan las sogas de refuerzo se unen a la estructura mediante sus extremos, es decir el elemento no está embebido, en concordancia con el modelo ensayado en el laboratorio. Estos elementos funcionan a tracción pero no a compresión y tienen una rigidez a la tracción igual a la rigidez de la soga. En el caso de tenerse varias sogas se multiplica la rigidez por el número de sogas. Debido a que el refuerzo en el muro es por ambas caras se multiplica la rigidez de las sogas por 2. Cabe resaltar que las sogas ofrecen también un efecto de malla que mantiene los bloques unidos. Este efecto no fue incluido en la modelación computacional. Además, las sogas fueron pre-tensadas durante su colocación. El efecto de pre-carga no fue incorporado en el modelo computacional. Todas las consideraciones y detalles se encuentran en la sección titulada observaciones importantes, al final del documento.

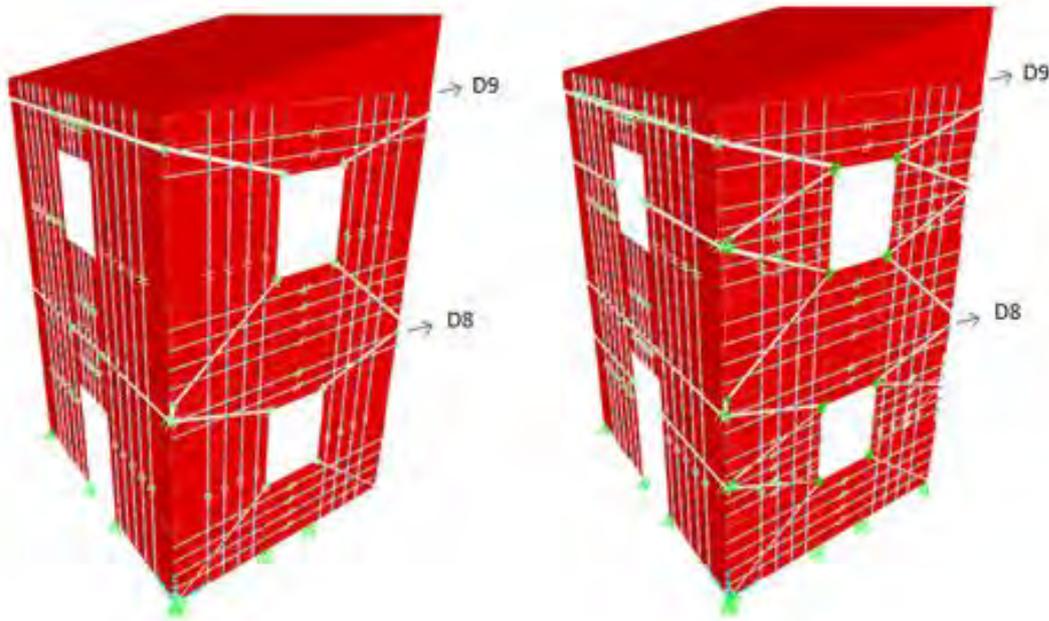


Figure 5.6 Configuración 1 reforzada (izquierda). Configuración 2 reforzada (derecha).

### 5.3. Análisis numérico y comparación con el ensayo utilizando la configuración 1

Se construye el modelo con la configuración 1 en SAP2000 mediante bloques rígidos y se coloca un valor de rigidez del elemento “link” que simula el choque de 10000 Ton/m. Para este caso se utilizan 9 bloques rígidos. Se realiza un análisis no lineal tiempo historia utilizando una señal de aceleración obtenida a partir de la señal de desplazamiento utilizada en el ensayo de laboratorio de simulación sísmica. El amortiguamiento modal se consideró del 5%. Se considera el efecto de la gravedad. La medición del desplazamiento en el programa SAP2000 se realizó en el mismo punto donde se midió en el ensayo de laboratorio.

#### 5.3.1. Modelo computacional configuración 1 sin refuerzo

En la figura 5.7 se muestra de izquierda a derecha algunas capturas del movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 1 sin refuerzo.

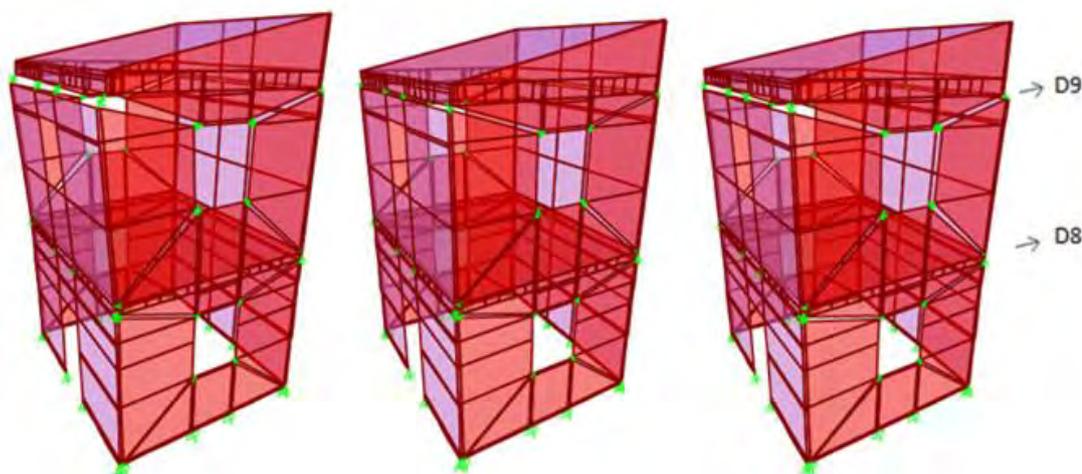


Figure 5.7 Movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 1 sin refuerzo.

En las figuras 5.8 y 5.9 se muestra la comparación de las respuestas en desplazamiento de los puntos D8 y D9 del modelo computacional y el ensayo de laboratorio para las amplitudes de la señal de comando de 15mm y 60mm. De las figuras 5.8 y 5.9 se puede observar lo siguiente:

Punto de medición D9 con 15mm de amplitud: Los resultados del desplazamiento de la configuración 1 tiene el triple de amplitud máxima que los resultados del ensayo. Entre los segundos 4 y 6 las señales son muy similares.

Punto de medición D8 con 15mm de amplitud: Las señales de desplazamiento de la configuración 1 y el ensayo son muy distintas pero en amplitud llegan a ser similares pero no ocurren en el mismo instante.

Punto de medición D8 y D9 con 60mm de amplitud: Las señales no se parecen y las amplitudes difieren bastante.

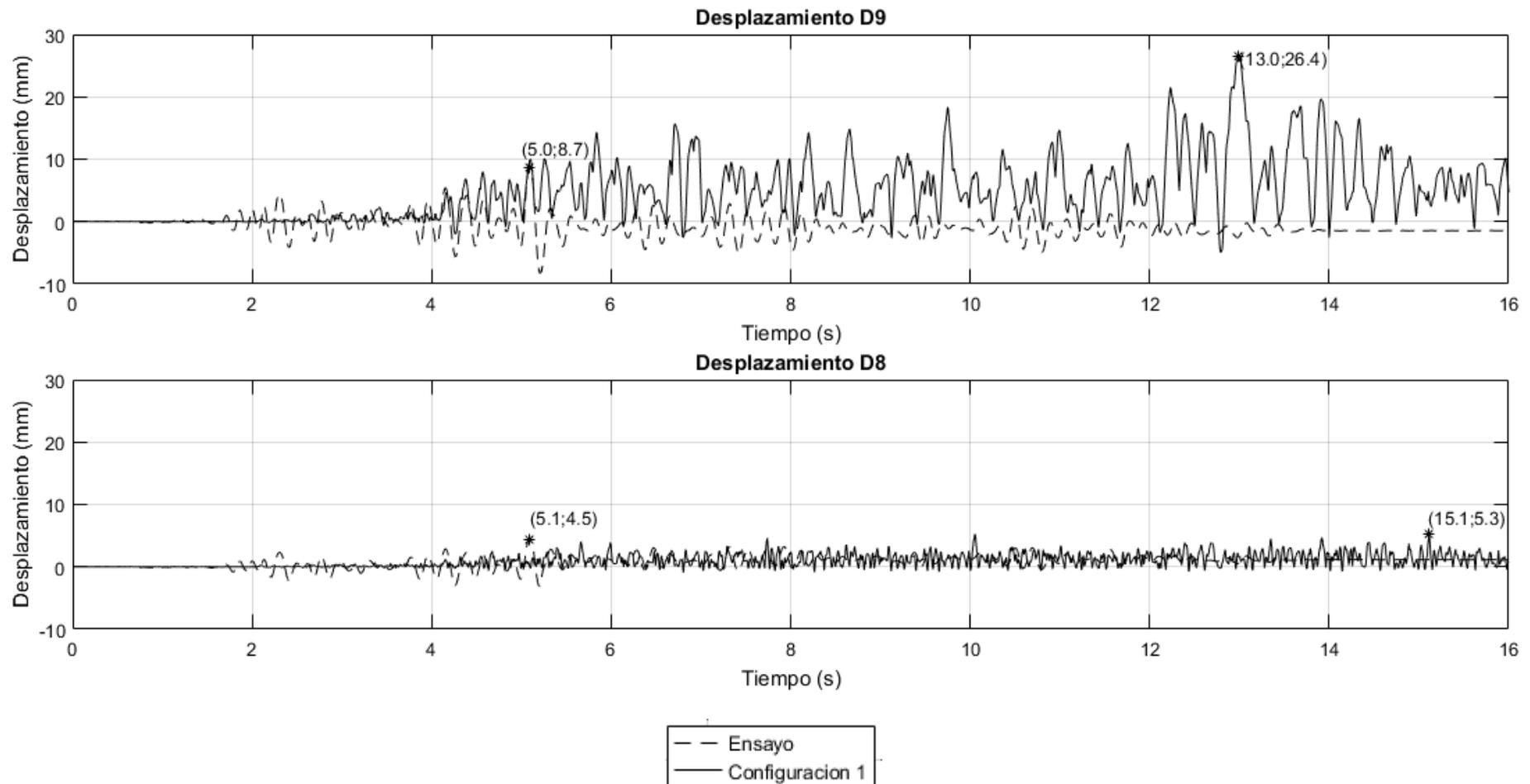


Figure 5.8 Desplazamientos del ensayo al módulo no reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 1. Señal del ensayo con amplitud de 15mm.

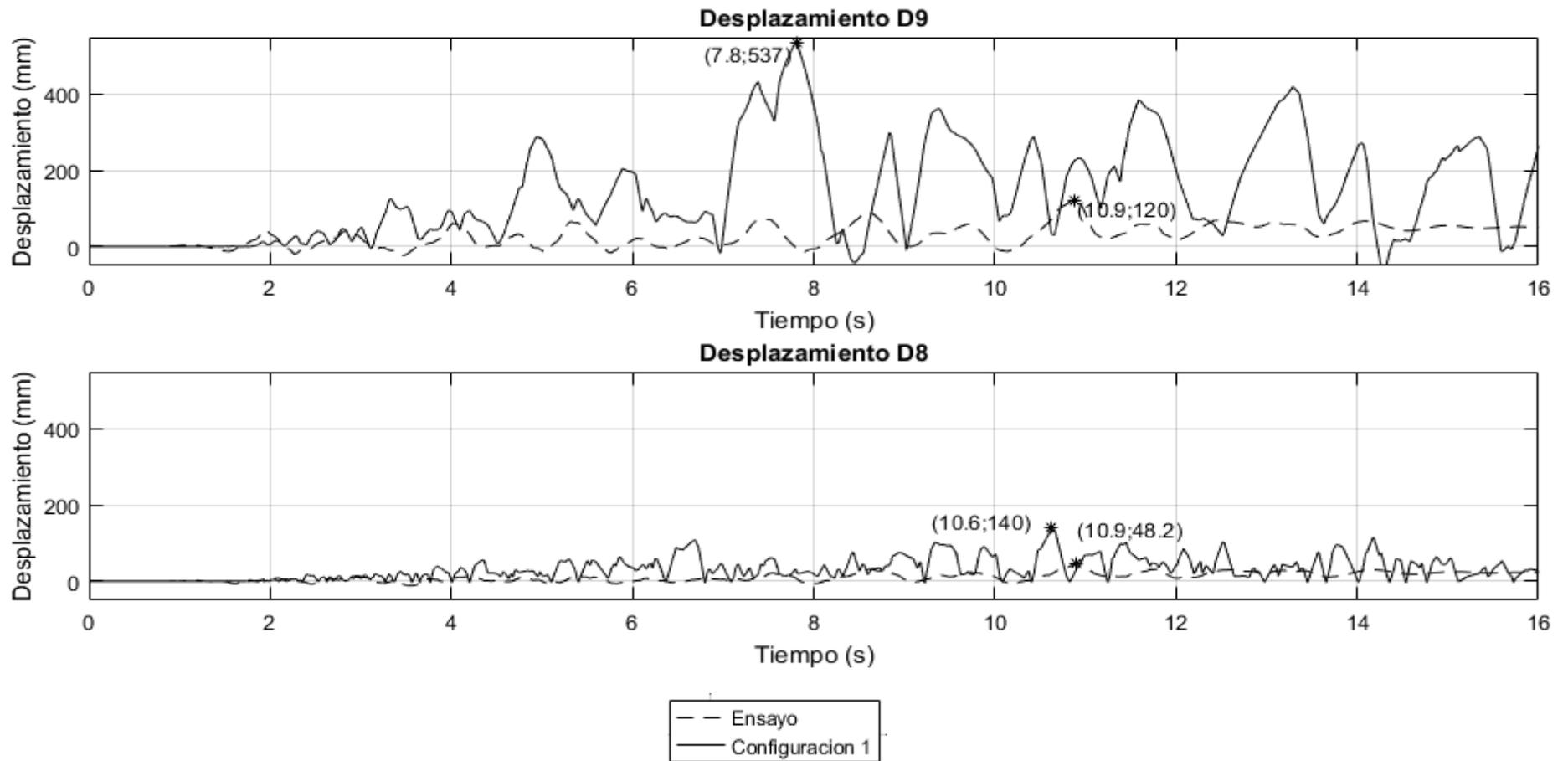


Figure 5.9 Desplazamientos del ensayo al módulo no reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2. Señal del ensayo con amplitud de 60mm.

### 5.3.2. Modelo configuración 1 con refuerzo

En la figura 5.10 se muestra de izquierda a derecha algunas capturas del movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 1 reforzada.

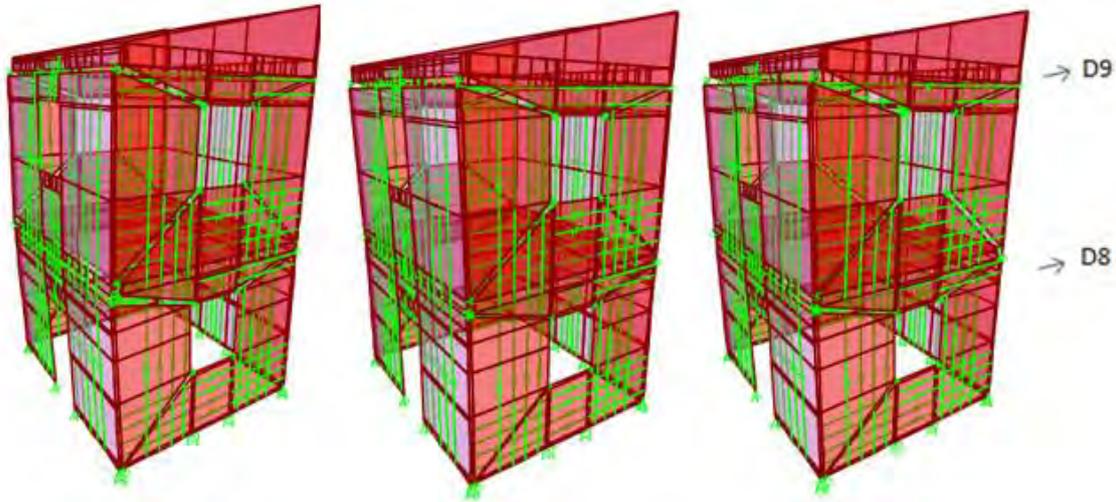


Figure 5.10 Movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 1 reforzada.

En las figuras 5.11 y 5.12 se muestra la comparación de las respuestas en desplazamiento de los puntos D8 y D9 del modelo computacional y el ensayo de laboratorio, para el caso donde ambos modelos se encuentran reforzados con sogas, para las amplitudes de la señal de comando de 15mm y 60mm. De las figuras 5.11 y 5.12 se puede observar lo siguiente:

Punto de medición D8 y D9 con 15mm de amplitud: los resultados del desplazamiento de la configuración 1 y el ensayo son similares entre los segundos 4 y 6. La amplitud máxima de la configuración 1 es el doble que la obtenida en el ensayo. Las amplitudes máximas se presentan en instantes cercanos a diferencia del caso no reforzado.

Punto de medición D8 y D9 con 60mm de amplitud: Las señales no se parecen y las amplitudes de la configuración 1 son el doble (para D8) o el triple (para D9) que las encontradas en el ensayo.

En las figuras 5.13 y 5.14 se muestra la comparación de las respuestas en cuanto a la fuerza en una soga de los puntos de medición F1 y F2 (ver figura 4.29) del modelo computacional y el ensayo de laboratorio para las amplitudes de la señal de comando de 15mm y 60mm. De las figuras 5.13 y 5.14 se puede observar lo siguiente:

Punto de medición F1 y F2 con 15mm de amplitud: Las señales de las fuerzas no se parecen y las amplitudes máximas de la configuración 1 son el triple que las obtenidas en el ensayo

Punto de medición F1 y F2 con 60mm de amplitud: Las señales no se parecen y las amplitudes máximas de las fuerzas difieren bastante entre la configuración 1 y el ensayo.

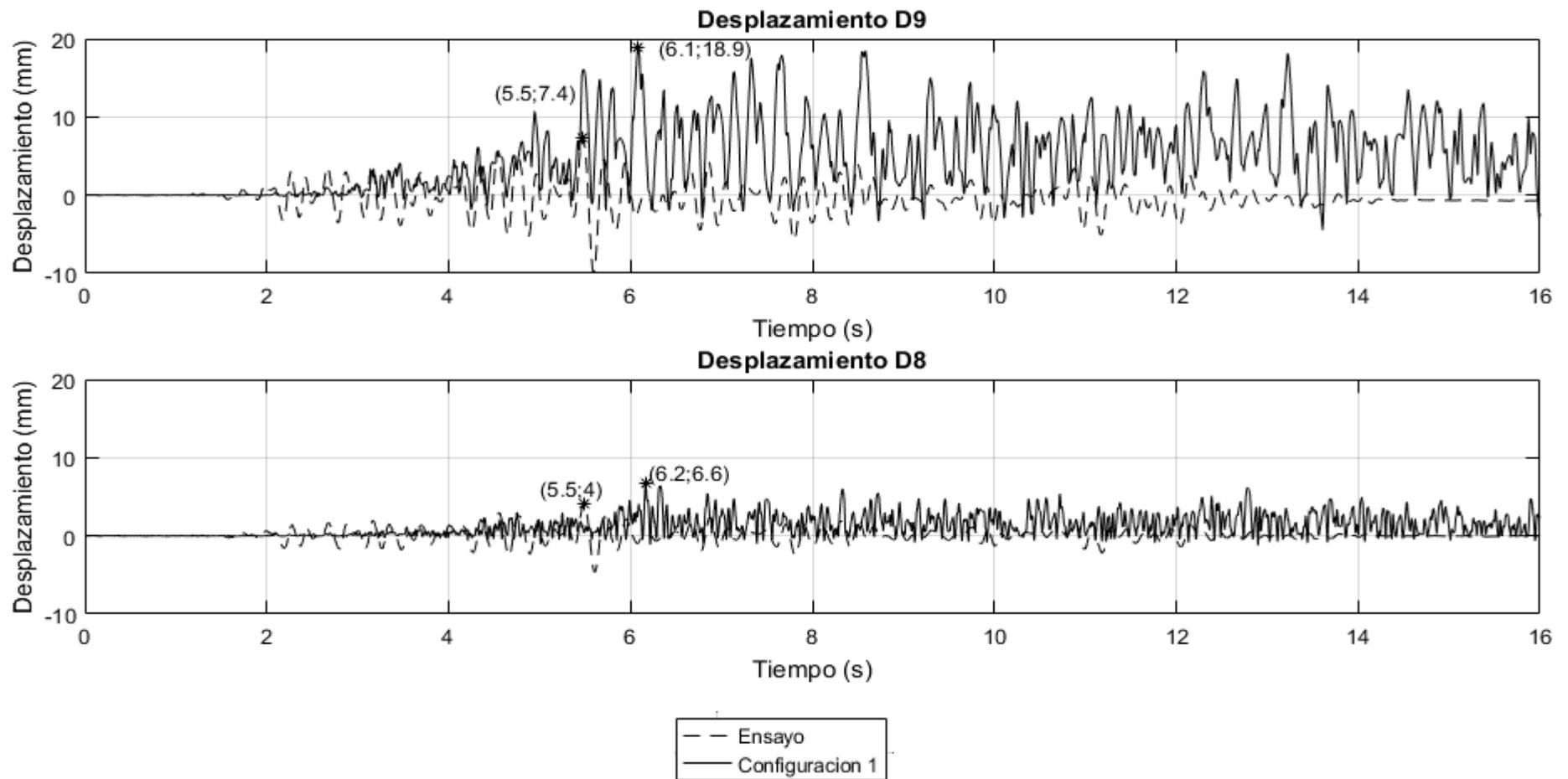


Figure 5.11 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 15mm.

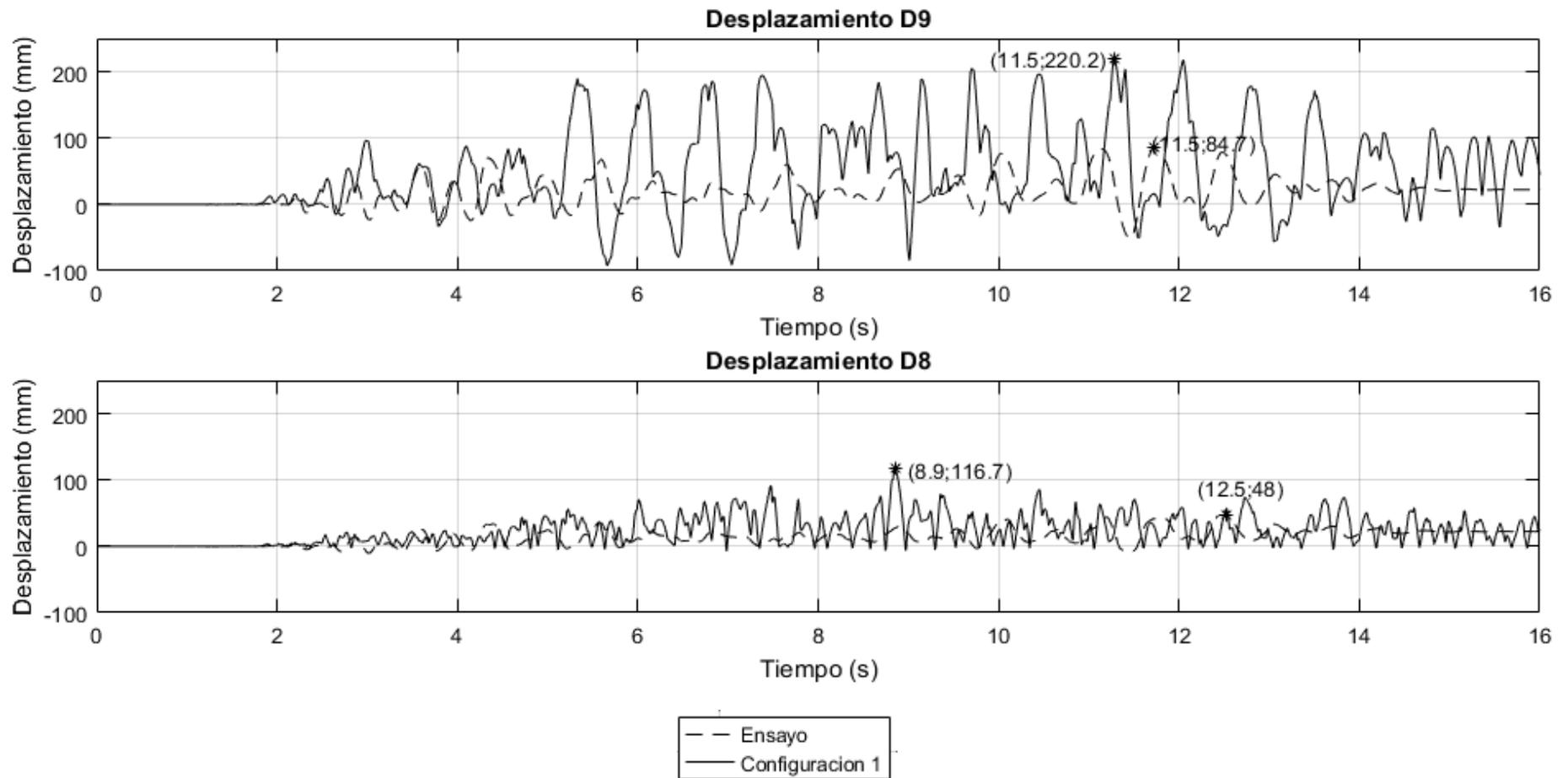


Figure 5.12 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm.

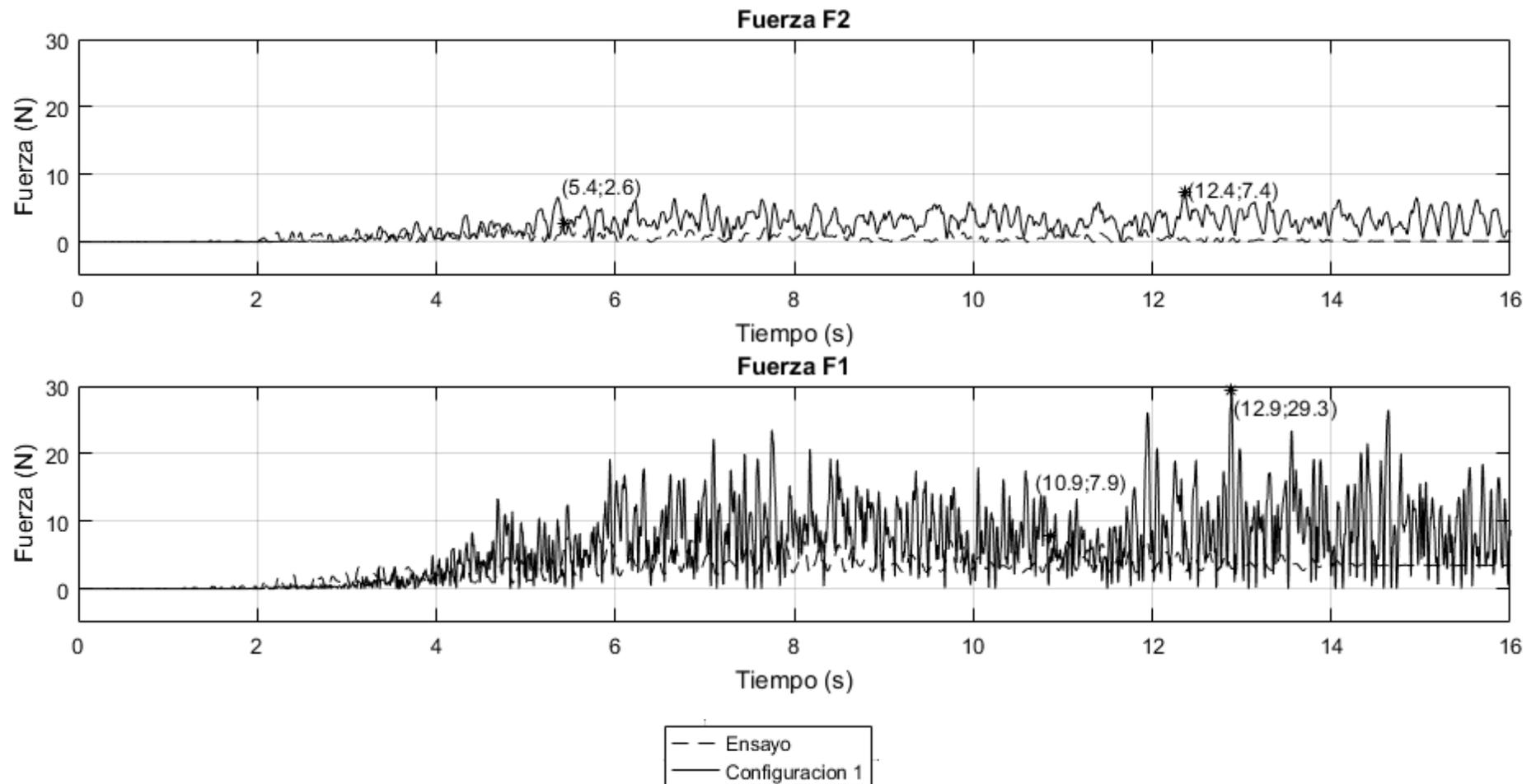


Figure 5.13 Fuerzas del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 15mm.

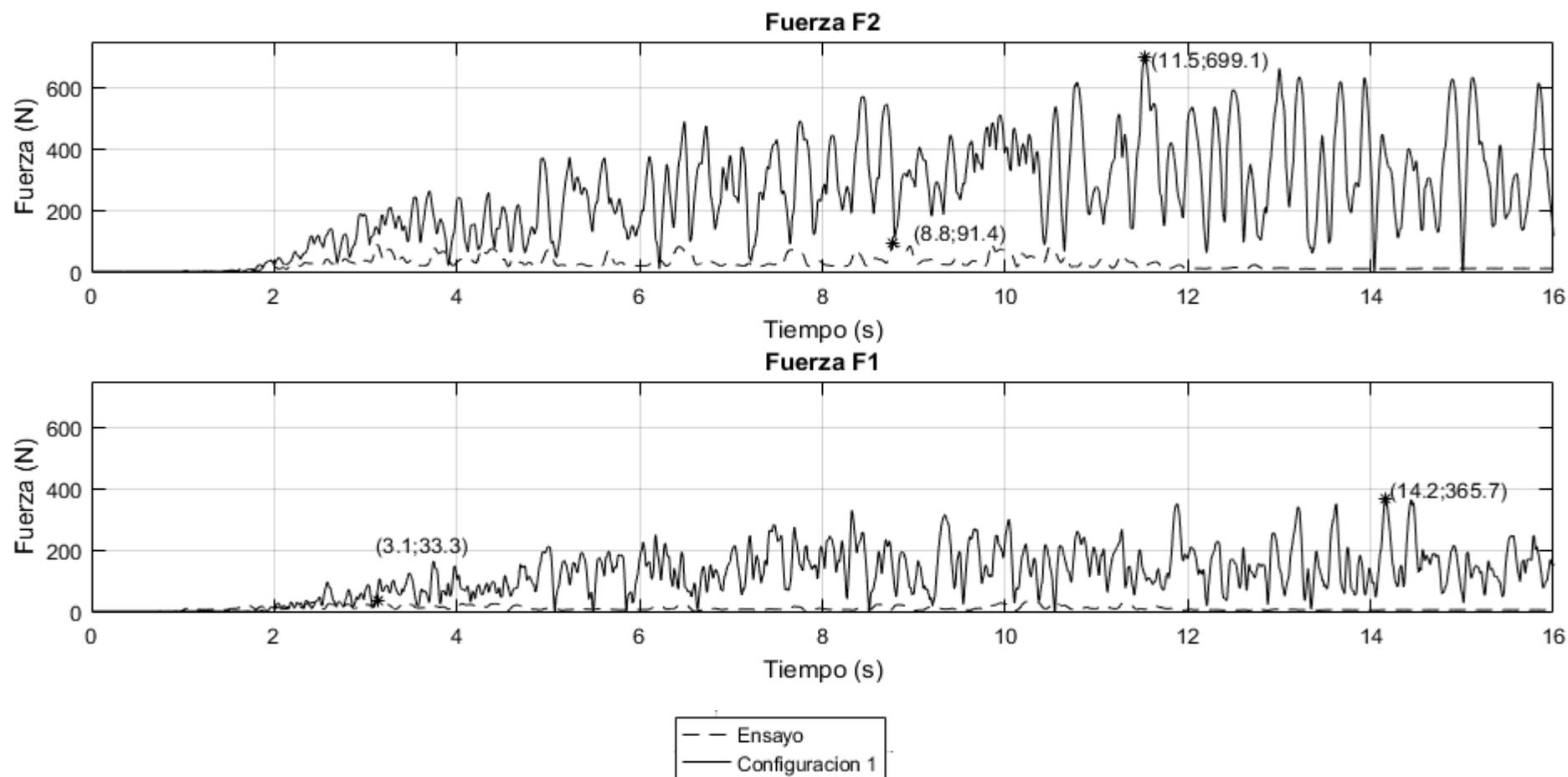


Figure 5.14 Fuerzas del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm.

#### 5.4. Análisis numérico y comparación con el ensayo utilizando la configuración 2

Esta configuración consta de 23 bloques rígidos. Se consideró una rigidez del elemento “link” que simula el impacto entre bloques de 10000 Ton/m, un amortiguamiento modal del 5% y el efecto de la gravedad.

##### 5.4.1. Modelo configuración 2 sin refuerzo

En la figura 5.15 se muestra de izquierda a derecha algunas capturas del movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 2 sin refuerzo.

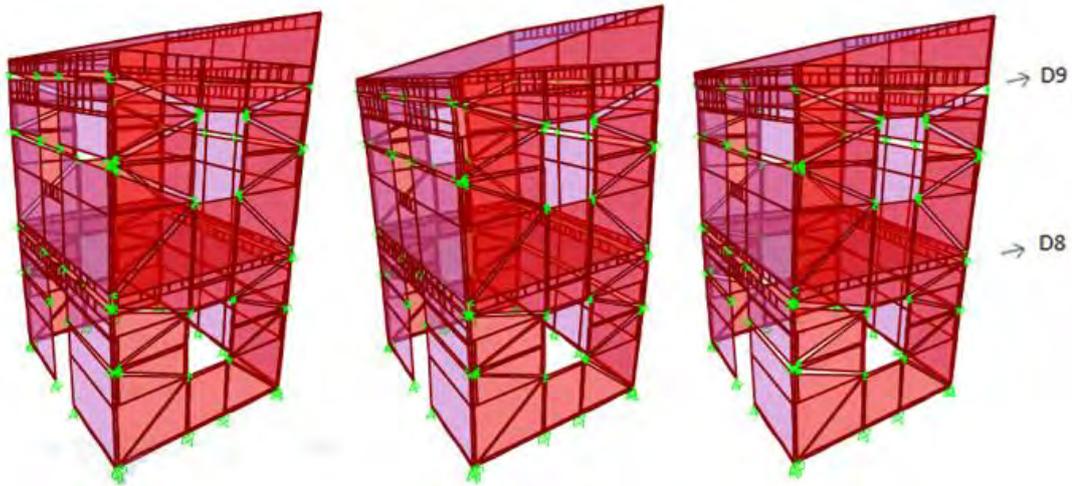


Figure 5.15 Movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 2 sin refuerzo.

En las figuras 5.16 y 5.17 se muestra la comparación de las respuestas en desplazamiento de los puntos D8 y D9 del modelo computacional y el ensayo de laboratorio para las amplitudes de la señal de comando de 15mm y 60mm. De las figuras 5.16 y 5.17 se puede observar lo siguiente:

Punto de medición D8 y D9 con 15mm de amplitud: Las señales no se parecen pero en algunos instantes son algo similares. La amplitud de desplazamiento máxima de la configuración 2 es la mitad de lo obtenido en el ensayo y no se dan en el mismo instante.

Punto de medición D8 y D9 con 60mm de amplitud: Las señales son algo similares. Las amplitudes de desplazamiento máximas también son algo similares aunque no se dan en el mismo instante. Se observa que se tiene un desplazamiento residual bastante grande en la señal del ensayo. Esto se debe a que los bloques están cediendo por deslizamiento hacia afuera por esto se obtiene un valor residual de desplazamiento positivo. Esto no ocurre en el modelo computacional porque los bloques están unidos en puntos fijos que no deslizan entre sí.

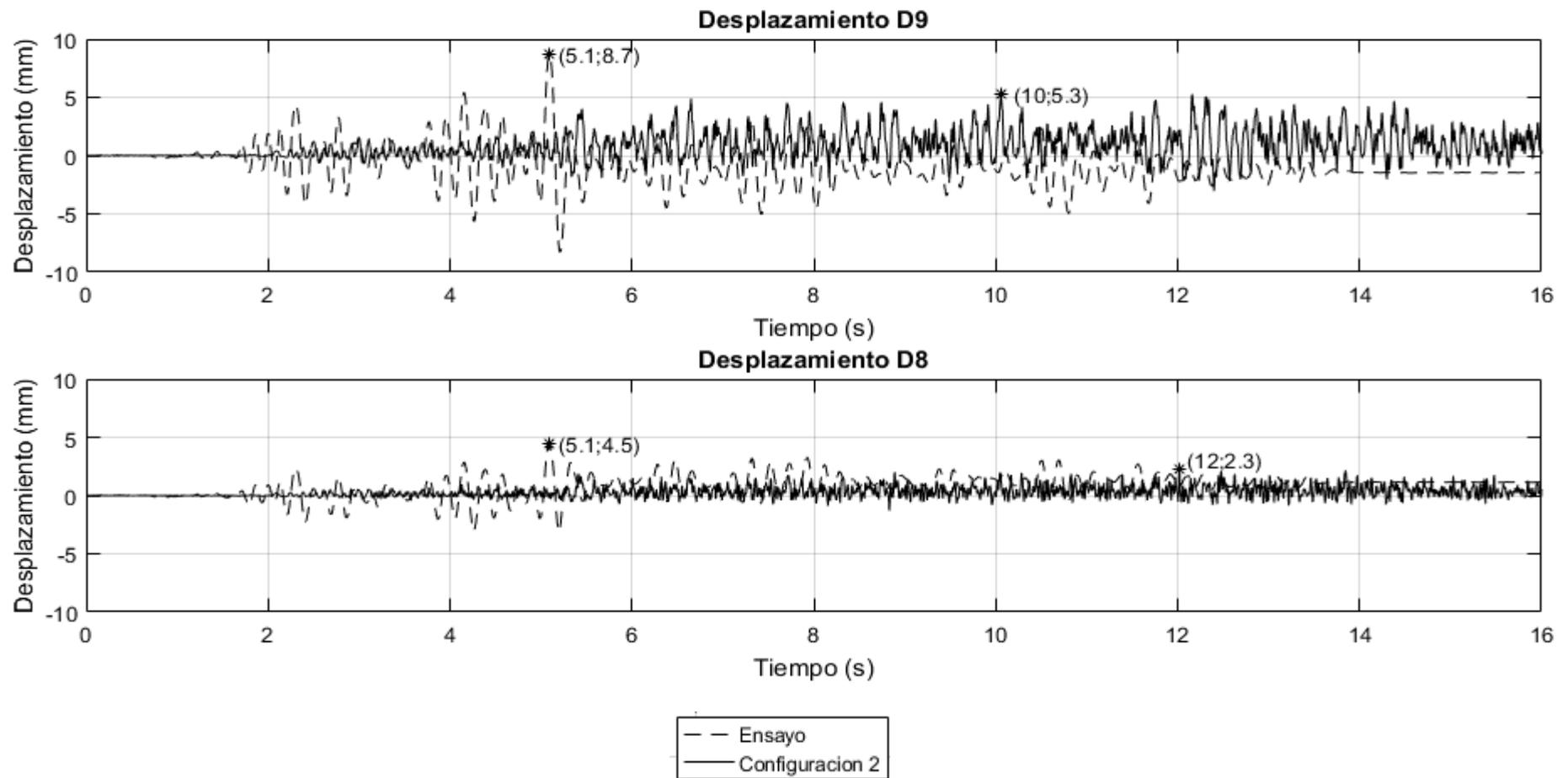


Figure 5.16 Desplazamientos del ensayo al módulo no reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 3. Señal del ensayo con amplitud de 15mm.

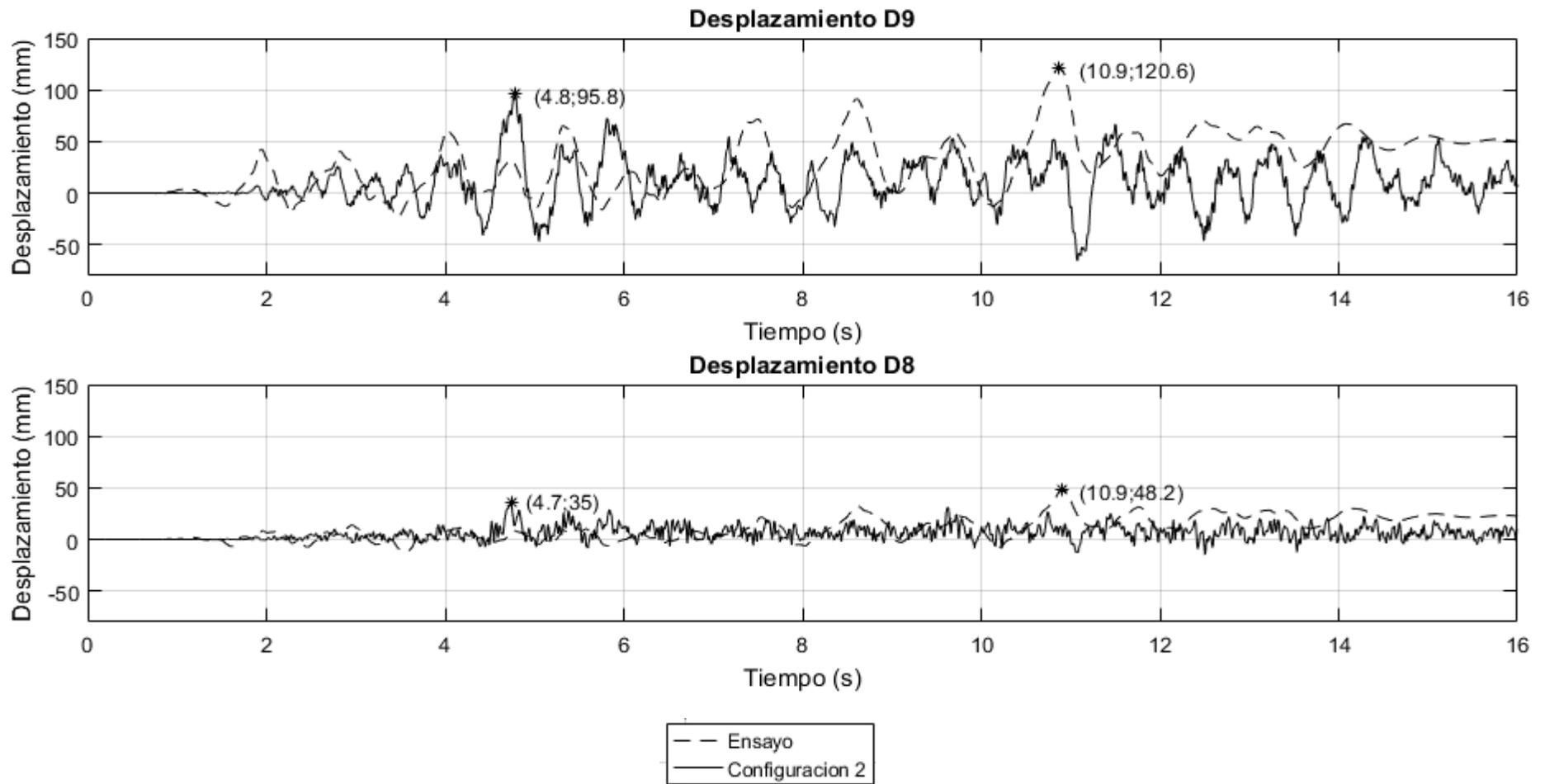


Figure 5.17 Desplazamientos del ensayo al módulo no reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 3. Señal del ensayo con amplitud de 60mm.

#### 5.4.2. Modelo configuración 2 con refuerzo

En la figura 5.18 se muestra de izquierda a derecha algunas capturas del movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 2 reforzada.

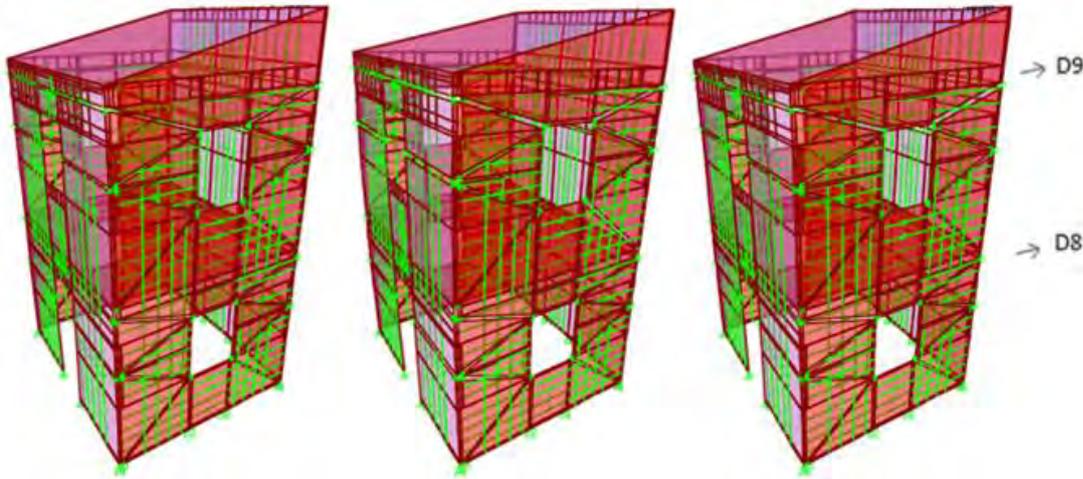


Figure 5.18 Movimiento en los instantes de gran desplazamiento de la estructura idealizada mediante bloques rígidos con la configuración 2 reforzada.

En las figuras 5.19 y 5.20 se muestra la comparación de las respuestas en desplazamiento de los puntos D8 y D9 del modelo computacional y el ensayo de laboratorio, para el caso donde ambos modelos se encuentran reforzados con sogas, para las amplitudes de la señal de comando de 15mm y 60mm. De las figuras 5.19 y 5.20 se puede observar lo siguiente:

Punto de medición D8 y D9 con 15mm de amplitud: Las señales de desplazamiento de la configuración 2 y del ensayo no se parecen. Las amplitudes máximas de desplazamiento son similares pero no ocurren en instantes cercanos.

Punto de medición D8 y D9 con 60mm de amplitud: Las señales de desplazamiento de la configuración 2 y del ensayo son muy similares y en ocasiones iguales. La amplitud máxima de desplazamiento es muy similar. La señal del ensayo presenta un desplazamiento residual grande debido al deslizamiento entre bloques. Este deslizamiento causado por el daño extremo altera los resultados de la señal. Si se descarta los resultados más allá de los 11 segundos debido a este efecto se observa que las amplitudes máximas de desplazamiento entre la configuración 2 y el ensayo son iguales y ocurren en el mismo instante de tiempo que corresponde a los 10 segundos.

En las figuras 5.21 y 5.22 se muestra la comparación de las respuestas en cuanto a la fuerza en una soga de los puntos de medición F1 y F2 (ver figura 4.29) del modelo computacional y el ensayo de laboratorio para las amplitudes de la señal de comando de 15mm y 60mm respectivamente. En el ensayo de 15mm se observa que hay una diferencia entre las fuerzas F1 del 100% y entre las fuerzas F2 de 200%. En el ensayo de 60mm se observa una diferencia entre las fuerzas F1 del 100% y entre las fuerzas F2 del 40%.

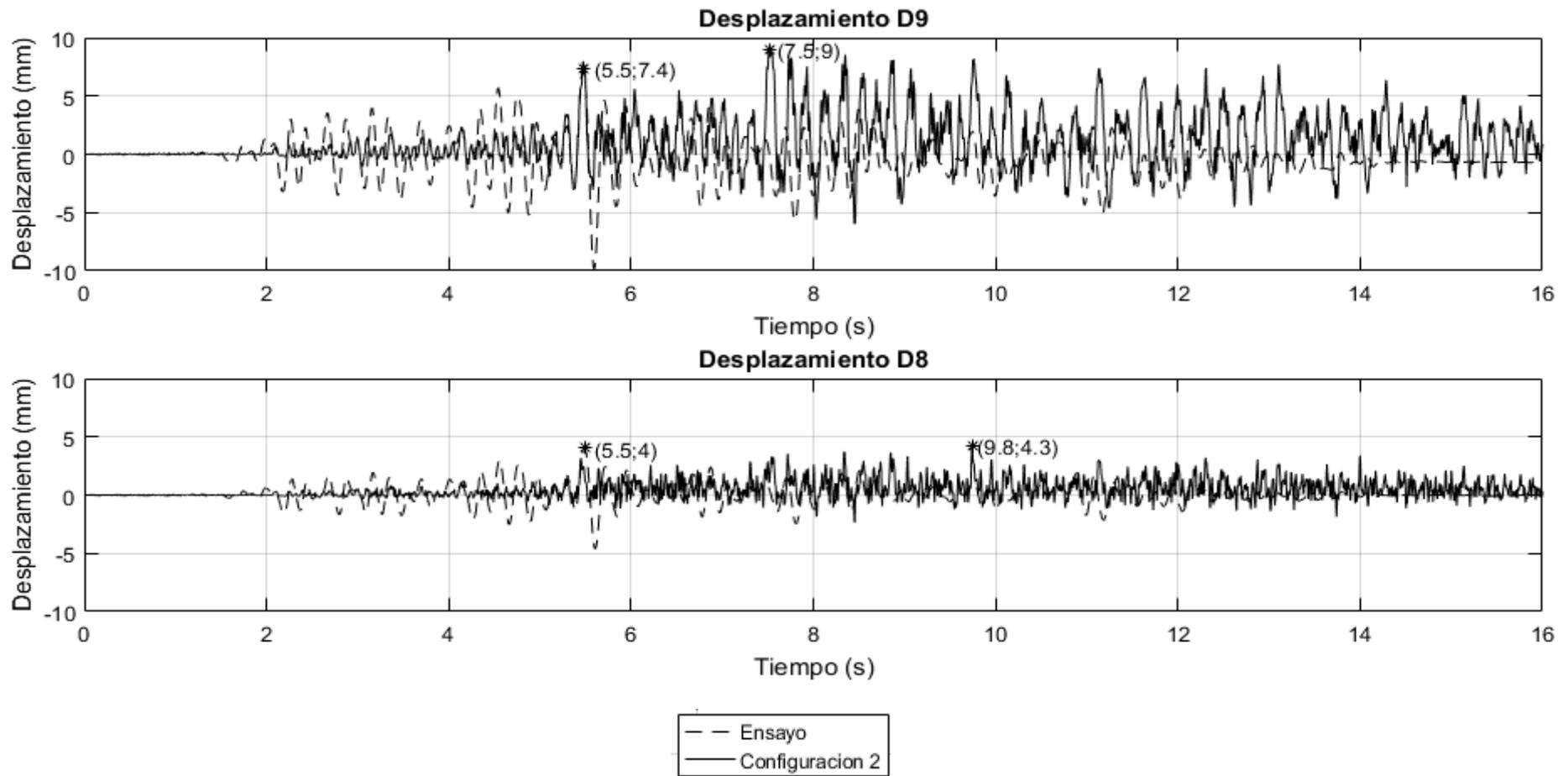


Figure 5.19 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 15mm.

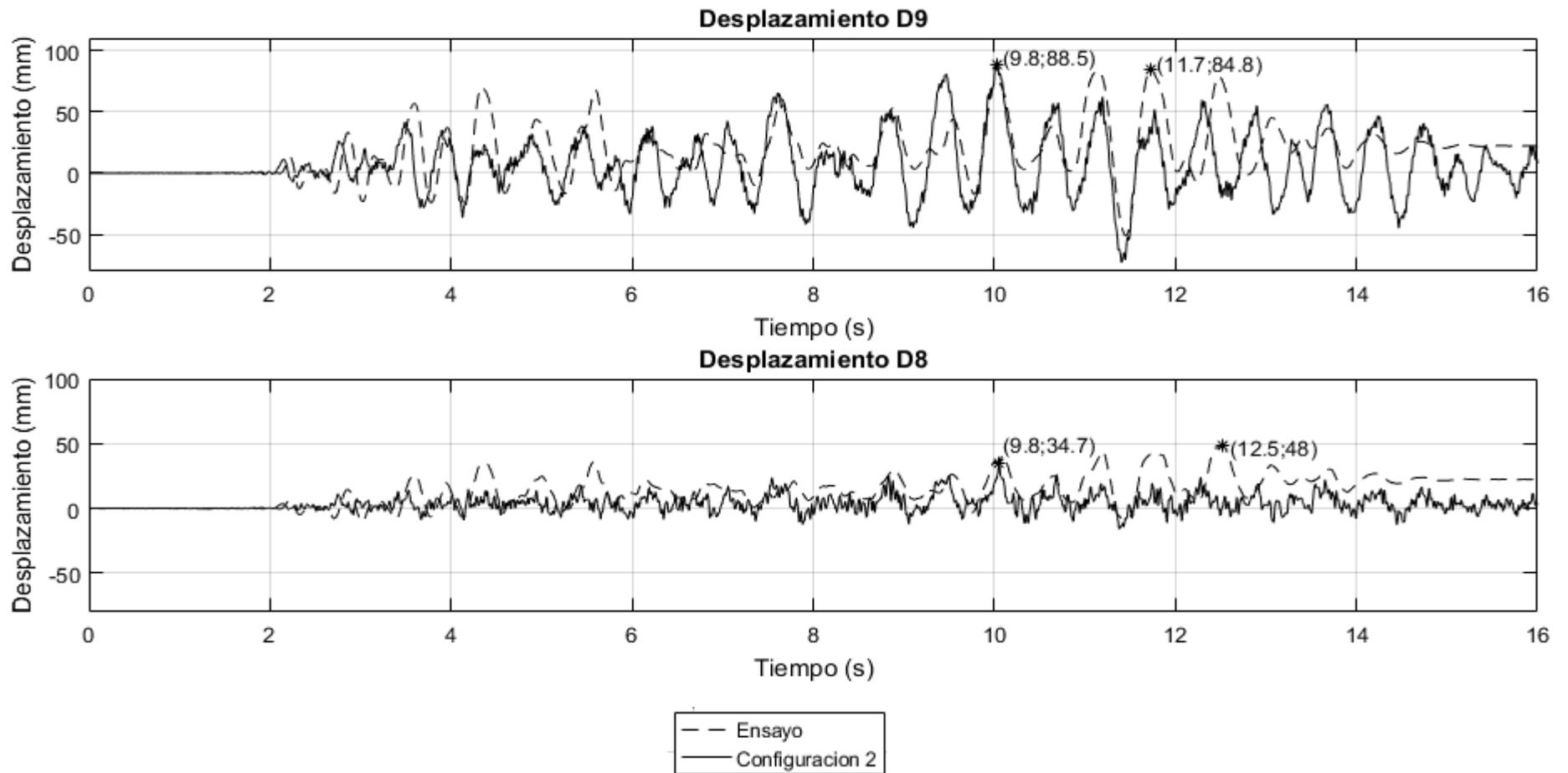


Figure 5.20 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm.

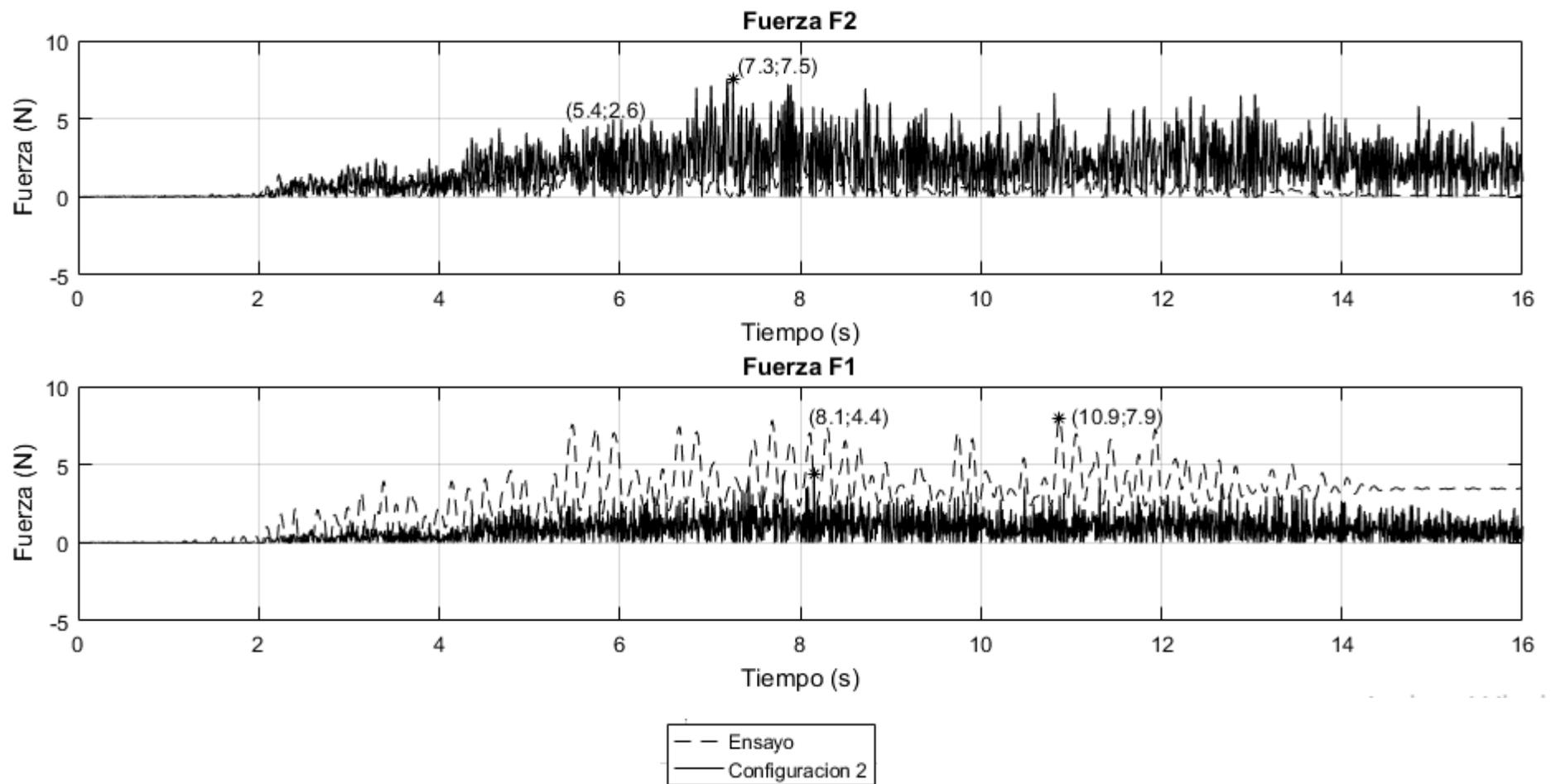


Figure 5.21 Fuerzas del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 15mm.

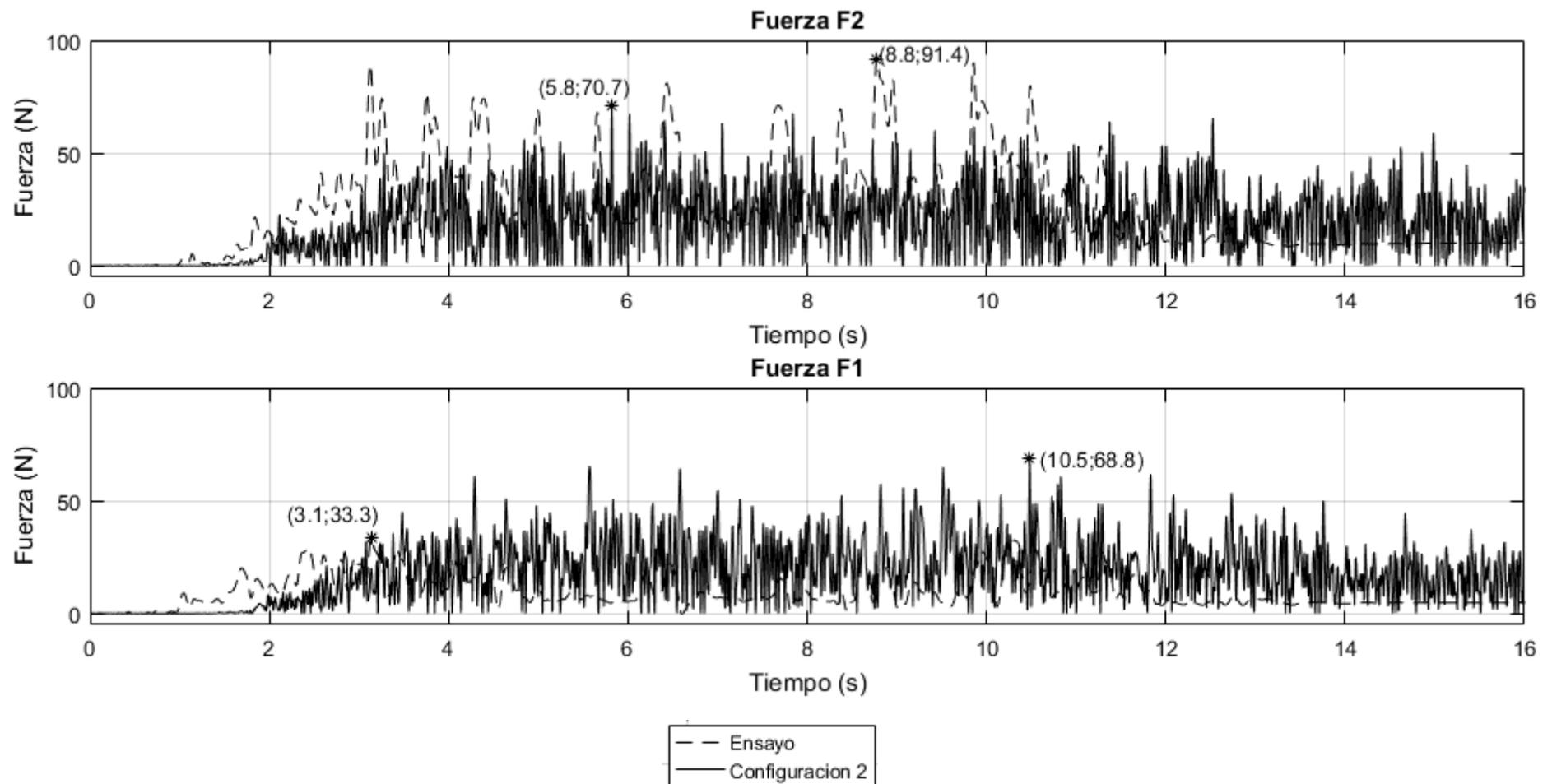


Figure 5.22 Fuerzas del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm.

### 5.5. Comparación utilizando espectros de Fourier

Se compara los espectros de Fourier de las respuestas en desplazamiento de los puntos D8 y D9 para el ensayo de 60mm reforzado utilizando la configuración 2. En la figura 5.23 y 5.24 se observa que el valor máximo en el espectro de Fourier para ambas respuestas ocurre en una frecuencia aproximada de 1.65 Hz.

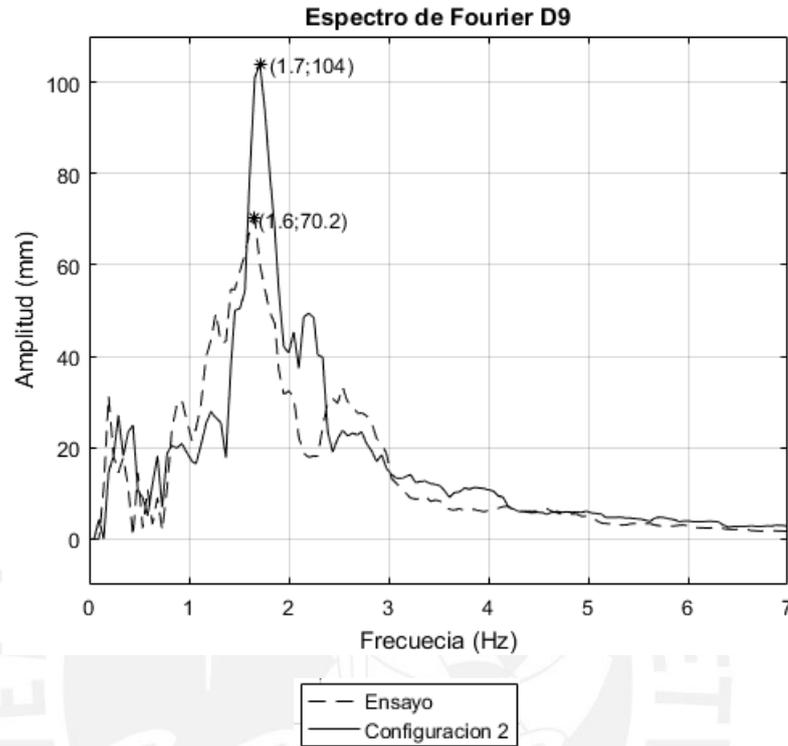


Figure 5.23 Espectro de Fourier para las respuestas del punto de medición D9

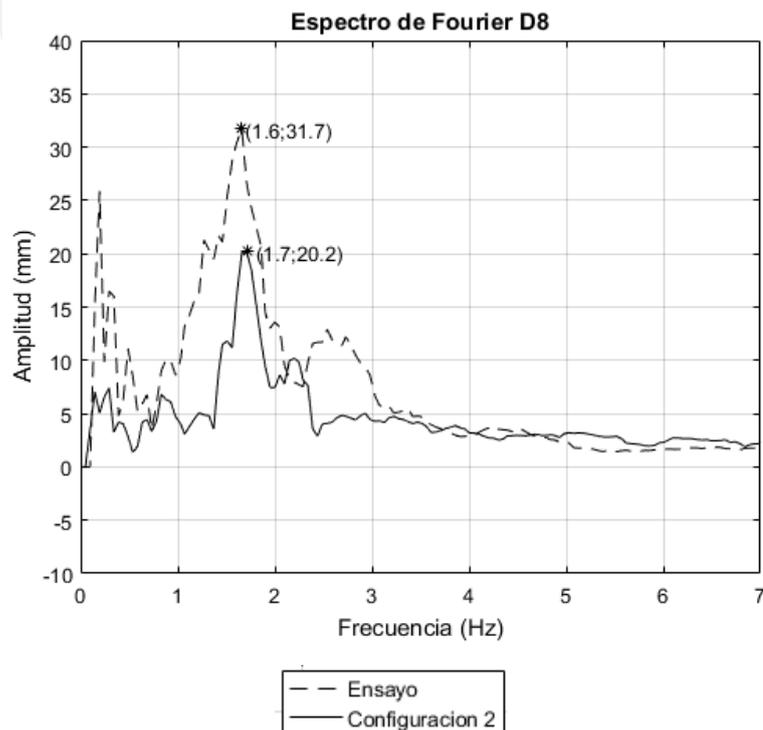


Figure 5.24 Espectro de Fourier para las respuestas del punto de medición D8

## 5.6. Comparación entre amplitudes máximas de las respuestas

### 5.6.1. Ensayo vs configuración 1 y 2 sin refuerzo.

En las tablas 5.1 y 5.2 se muestra un cuadro resumen de la comparación entre amplitudes máximas de los resultados obtenidos.

Tabla 5.1: Valores de desplazamiento máximos. Amplitud 15mm

<b>Valores máximos. Desplazamientos. 15mm</b>			
	Desplazamiento D8	Desplazamiento D9	Error
Ensayo no reforzado	4.5	8.6	
Configuración 1 no reforzado	5.3	26.4	112%
Configuración 2 no reforzado	2.3	5.2	81%

Tabla 5.2: Valores de desplazamiento máximos. Amplitud 60mm

<b>Valores máximos. Desplazamientos. 60mm</b>			
	Desplazamiento D8	Desplazamiento D9	Error
Ensayo no reforzado	48.2	120.6	
Configuración 1 no reforzado	139.9	537.4	268%
Configuración 2 no reforzado	35.1	95.8	32%

De las tablas 5.1 y 5.2 se puede observar que la configuración 1 posee un mayor error en la estimación de la amplitud máxima que la configuración 2 tanto para una amplitud de la señal de comando de 15mm como para 60mm. La configuración 2 tiene un menor error para el ensayo con amplitud de 60mm comparado con el ensayo de 15mm. La configuración 2 posee el menor error para el caso de una amplitud de 60mm.

### 5.6.2. Ensayo vs configuración 1 y 2 con refuerzo.

En las tablas 5.3 y 5.4 se muestra un cuadro resumen de la comparación entre amplitudes máximas de los resultados obtenidos.

Tabla 5.3: Valores de desplazamiento máximos. Amplitud 15mm. Reforzado.

<b>Valores máximos. Desplazamientos. 15mm</b>			
	Desplazamiento D8	Desplazamiento D9	Error
Ensayo reforzado	4	7.3	
Configuración 1 reforzado	6.6	18.8	111%
Configuración 2 reforzado	4.2	9	14%

Tabla 5.4: Valores de desplazamiento máximos. Amplitud 60mm. Reforzado.

<b>Valores máximos. Desplazamientos. 60mm</b>			
	Desplazamiento D8	Desplazamiento D9	Error
Ensayo reforzado	48	84.7	
Configuración 1 reforzado	116.6	220	151%
Configuración 2 reforzado	34.7	84.5	19%

En las tablas 5.3 y 5.4 se puede observar que la configuración 1 posee un mayor error en la estimación de la amplitud máxima que la configuración 2 tanto para una amplitud de 15mm como para 60mm. El error en la configuración 2 tanto para el caso de una amplitud de 15mm como de una de 60mm es bajo.

Se puede observar que la configuración 2 estima mejor la amplitud máxima de las fuerzas en las sogas. El error en la estimación es menor en el caso de la configuración 2 con una amplitud de 60mm.

*Tabla 5.5: Fuerzas máximas en las sogas. Amplitud 15mm*

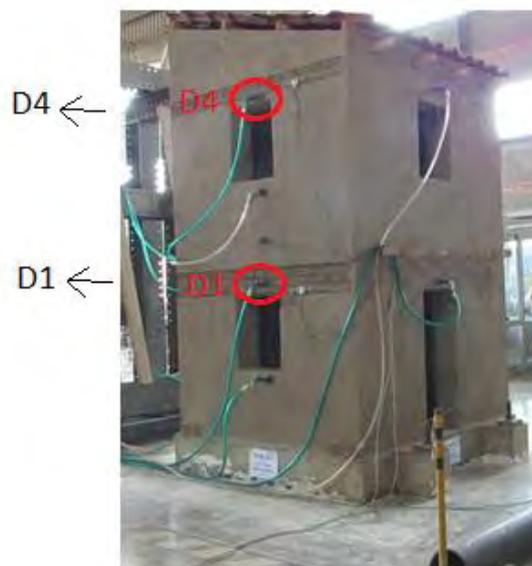
<b>Valores máximos. Fuerzas. 15mm</b>			
	Fuerza F1	Fuerza F2	Error
Ensayo reforzado	7.9	2.6	
Configuración 1 reforzado	29.3	7.4	228%
Configuración 2 reforzado	4.4	7.6	136%

*Tabla 5.6: Fuerzas máximas en las sogas. Amplitud 60mm*

<b>Valores máximos. Fuerzas. 60mm</b>			
	Fuerza F1	Fuerza F2	Error
Ensayo reforzado	33.3	91.4	
Configuración 1 reforzado	365.7	699.1	832%
Configuración 2 reforzado	68.8	70.7	68%

### 5.7. Comparación de desplazamientos en otros puntos de medición

Debido a que los resultados del ensayo y el modelo computacional con la configuración 2 cuando se utilizó una amplitud de 60mm fueron muy parecidos se compara los resultados utilizando otros puntos de medición.



*Figure 5.25 Módulo de vivienda con los puntos de medición a evaluar marcados en rojo*

Los nuevos puntos de medición elegidos están ubicados arriba de las ventanas de cada piso del muro paralelo a la puerta. En la figura 5.25 se muestra la ubicación de los puntos de medición a evaluar marcados con un círculo rojo.

En la figura 5.26 se observa una gran similitud entre los desplazamientos encontrados en el ensayo y el modelo computacional para los puntos D1 y D4. Para el punto D1 el desplazamiento máximo fue de 24.3mm y 33.7mm para el modelo computacional y el ensayo respectivamente. Para el punto D4 el desplazamiento máximo fue de 77mm y de 76.8 para el modelo computacional y el ensayo respectivamente.

Estos desplazamientos máximos no surgen en el mismo instante. A los 10 segundos se observa un desplazamiento muy similar entre el modelo computacional y el ensayo para los puntos D1 y D4. Es posible que luego de este punto haya ocurrido una gran degradación del material junto con desplazamientos plásticos que origine una mayor diferencia entre los resultados del modelo computacional y el ensayo.

### **5.8. Observaciones importantes**

Se observó que las señales de desplazamiento utilizadas en la mesa vibradora no son perfectamente iguales para cada fase o ensayo lo que crea cierta variabilidad en los resultados. Los resultados entregados por el laboratorio no tienen la misma cantidad de puntos. Esta variabilidad no es grande.

La señal de aceleración utilizada para el cálculo de la respuesta en los modelos computacionales en SAP2000 se obtuvo a partir de una de las señales de desplazamiento. Ya que las señales de desplazamiento no son perfectamente iguales los resultados también deben compararse con cierta tolerancia.

Se observó deslizamiento entre bloques durante el ensayo sobre todo en las fallas horizontales. Este deslizamiento no se consideró en los modelos computacionales en SAP2000. Los bloques que se apoyaban sobre otros bloques lo hacían con uniones tipo rotulas sin posibilidad de deslizamiento.

Las sogas presentan una fuerza inicial con la que son pretensadas al momento de ser colocadas en el modelo de vivienda de adobe de 2 pisos. Esta fuerza no fue incluida en el modelo computacional en SAP2000. Las fuerzas en las sogas en fases que han tenido alguna fase previa es mucho mayor a las fuerzas en las sogas en fases sin fase previa. Por esta razón para realizar una adecuada comparación se utilizaron fases sin fase previa.

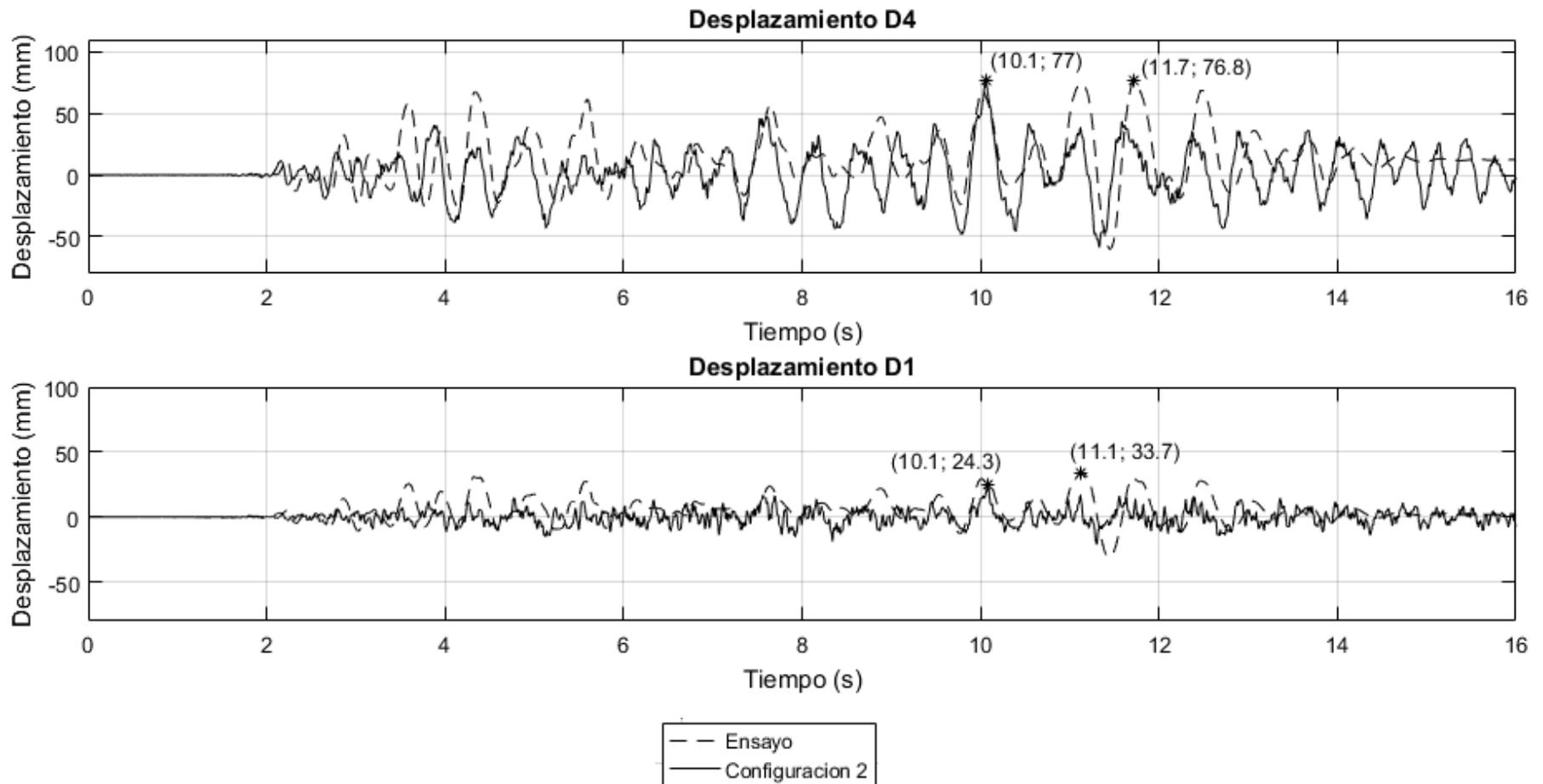


Figure 5.26 Desplazamientos del ensayo al módulo reforzado vs resultados del modelo computacional con la configuración 2 reforzada. Señal del ensayo con amplitud de 60mm Puntos de medición D1 y D4.

A todos los resultados de las fuerzas en las sogas obtenidos del ensayo se les resta la pre-carga que existía en las sogas antes de que iniciasen los ensayos. Esto se realizó para poder comparar las fuerzas del ensayo con las del modelo computacional el cual no cuenta con una pre-carga. La variación de la rigidez equivalente a utilizar en el modelo computacional por el efecto de la pre-carga del modelo ensayado en laboratorio es despreciable.

El efecto de malla generado por parte de las sogas al mantener los bloques unidos y evitar que se desprendan de la estructura no fue incorporado en el modelo computacional por el aumento de la dificultad en el modelado que esto tendría tanto en su construcción como en el tiempo de cómputo.

Se observó durante los ensayos que el patrón de agrietamiento depende de si la estructura tiene refuerzo y de si la fase del ensayo ha tenido alguna fase previa.

Existe un desplazamiento residual alto para fases con amplitudes grandes como el caso de las fases con amplitud de 60mm.

Durante el ensayo se observó trituración de la mampostería en algunas zonas del modelo de vivienda de adobe.

Se observó que algunas sogas penetraban dentro de las grietas formadas en el modelo de vivienda durante el ensayo. Al penetrar la soga en una grieta la fuerza en la soga baja.

En los ensayos de tracción realizados a las sogas de refuerzo se encontró una variabilidad en el módulo de elasticidad y la fuerza máxima que resiste cada soga de hasta el 20% respecto al promedio.

Los techos del segundo piso de los modelos de vivienda ensayados tienen una inclinación. El encimado necesario para lograr la inclinación del techo no fue considerado en el modelo computacional.

Por todas estas consideraciones, se cumple con el objetivo de estimar las fuerzas en las sogas y los desplazamientos en la estructura con el modelo computacional si se obtiene un error en la estimación de las fuerzas menor al 100%, un error en la estimación de los desplazamientos menor al 30%, y unas respuestas en desplazamiento muy similares a lo obtenido en el ensayo las cuales logren capturar la respuesta de la estructura.

## 6. CONCLUSIONES

La comparación entre las respuestas en desplazamiento entre el modelo con la configuración 1 y el ensayo, para el caso no reforzado, brinda la siguiente información: Cuando se utiliza una señal de comando con una amplitud máxima de 15mm el punto de medición D9 del modelo computacional tiene el triple de amplitud máxima que los resultados del ensayo. Entre los segundos 4 y 6 las señales son muy similares. El punto de medición D8 presenta una respuesta del modelo computacional distinta a la obtenida en el ensayo. En amplitud llegan a ser similares pero no ocurren en el mismo instante. Cuando se utiliza una señal de comando con una amplitud máxima de 60mm las señales no se parecen y las amplitudes difieren en más de 300% para los puntos de medición D8 y D9.

La comparación entre las respuestas en desplazamiento entre el modelo con la configuración 1 y el ensayo, para el caso reforzado, brinda la siguiente información: Cuando se utiliza una señal de comando con una amplitud máxima de 15mm la respuesta entre el modelo computacional y el ensayo son similares entre los segundos 4 y 6. La amplitud máxima de la configuración 1 es el doble que la obtenida en el ensayo. Las amplitudes máximas se presentan en instantes cercanos a diferencia del caso no reforzado. Las respuestas en fuerza en las sogas en los puntos de medición F1 y F2 no se parecen y las amplitudes máximas en el modelo computacional son el triple que las obtenidas en el ensayo. Cuando se utiliza una señal de comando con una amplitud máxima de 60mm las respuestas del modelo computacional y el ensayo no se parecen y las amplitudes máximas de la configuración 1 son el doble (para D8) y el triple (para D9) que las encontradas en el ensayo. Las respuestas en fuerza en las sogas no se parecen y las amplitudes máximas de las fuerzas difieren en 800% entre el modelo computacional y el ensayo.

La comparación entre las respuestas en desplazamiento entre el modelo con la configuración 2 y el ensayo, para el caso no reforzado, brinda la siguiente información: Cuando se utiliza una señal de comando con una amplitud máxima de 15mm las respuestas entre el modelo computacional y el ensayo no se parecen pero en algunos instantes son algo similares. La amplitud de desplazamiento máxima del modelo computacional es la mitad de lo obtenido en el ensayo, tanto para D8 como para D9, y no se dan en el mismo instante. Cuando se utiliza una señal de comando con una amplitud máxima de 60mm las respuestas entre el modelo computacional y el ensayo son algo similares. Las amplitudes de desplazamiento máximas difieren en 30% y no se dan en el mismo instante.

La comparación entre las respuestas en desplazamiento entre el modelo con la configuración 2 y el ensayo, para el caso reforzado, brinda la siguiente información: Cuando se utiliza una señal de comando con una amplitud máxima de 15mm las respuestas en desplazamiento entre el modelo computacional y el ensayo no se parecen. Las amplitudes máximas difieren en 14% y no ocurren en instantes cercanos. Las respuestas en fuerza en las sogas no se parecen. La amplitud máxima de las respuestas en fuerza en el punto de medición F1 difiere en 100% y en el punto de medición F2 difiere en 200%. Cuando se utiliza una señal de comando con una amplitud máxima de 60mm las respuestas en desplazamiento entre el modelo computacional y el ensayo son muy similares y en ocasiones iguales. La amplitud máxima de la respuesta en desplazamiento entre el modelo computacional y el ensayo difiere en 19%. Los desplazamientos máximos ocurren en instantes cercanos. Si se descarta los resultados más allá de los 11 segundos debido al efecto de degradación de la estructura y desplazamientos residuales las amplitudes máximas en desplazamiento son iguales y ocurren en el mismo instante de tiempo que corresponde a los 10 segundos. Las respuestas en fuerza en las sogas no se parecen. La amplitud máxima de las respuestas en fuerza en el punto de medición F1

difiere en 100% y en el punto F2 en 40%. Para el punto F1 los resultados son conservadores y para el punto F2 son no conservadores.

Debido a los buenos resultados que se obtuvieron con la configuración 2 reforzada con una señal de comando con una amplitud máxima de 60mm se comparó las respuestas entre el modelo computacional y el ensayo utilizando los puntos de medición D1 y D4. Para este caso se observó una gran similitud entre las respuestas en desplazamientos. En el punto D1 la amplitud máxima de la respuesta entre el modelo computacional y el ensayo difiere en 38% y en el punto D4 difiere en 1%. Los desplazamientos máximos ocurren en instantes cercanos con la misma posibilidad de ocurrir en instantes iguales si se descarta la respuesta más allá de los 11 segundos.

Se concluye que el modelo computacional con una configuración reforzada cuando se utiliza una señal de comando de 60mm se acerca en mayor medida a los resultados obtenidos en el ensayo, en comparación de la utilización de una señal de 15mm o sin refuerzo. Esto debido a que cuando se utiliza una señal con amplitud de 15mm la estructura no se agrieta lo suficiente como para formar los bloques de colapso considerados en el modelo computacional. Además, un reforzamiento de la estructura mantiene los bloques unidos mientras que cuando no existe reforzamiento los bloques presentan desplazamientos relativos mayores en el modelo computacional que dificultan la modelación.

El modelo computacional con la configuración 1 reforzada no logra cumplir con el objetivo de estimar las fuerzas en el refuerzo (error de 830%) y los desplazamientos en la estructura (error de 150%) cuando se utiliza una amplitud de la señal de comando de 60mm. Las respuestas en desplazamiento no se parecen. Esto se debe a que no se incorporó en el modelo computacional una suficiente cantidad de bloques de colapso y debido a que los bloques utilizados son indeformables los resultados finales quedan distorsionados.

El modelo computacional con la configuración 2 reforzada cumple con el objetivo de estimar las fuerzas en el refuerzo con sogas (error de 68%) y los desplazamientos en la estructura (error de 19% para los puntos de medición D8 y D9) (error de 20% para el caso de los puntos de medición D1 y D4). Las respuestas en desplazamiento son similares y se logra capturar el comportamiento de la estructura. Esto debido a que se incorporó una cantidad suficiente de bloques de colapso, se utilizó una señal con amplitud de 60mm capaz de agrietar a la estructura ensayada lo suficiente y un reforzamiento capaz de evitar desplazamientos relativos excesivos entre bloques en el modelo computacional.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Addlink. (06 de 11 de 2018). *Addlink software científico*. Obtenido de <https://www.addlink.es/productos/working-model-2d>
- Aguilar, R., & Blondet, M. (2007). *Seismic protection of earthen buildings*. Bangalore: ISES.
- Andina. (2014). *INEI: Más de 3 millones de viviendas son vulnerables a sismos en Perú*. Diario los andes.
- Arroyo, R., Catalan, P., & Sanchez, S. (2013). *Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México*. Mexico: U. Autonoma de Yucatan.
- Blondet, M., Vargas-Neumann, J., Tarque, N., Soto, J., Sosa, C., & Sarmiento, J. (2016). *Seismic protection of earthen vernacular and historical constructions*. 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. Lovaina: SAHC.
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., & Iwaki, C. (2011). *Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú*. Lima: PUCP.
- Blondet, M., Villa García, G., Vargas, J., Sosa, C., & Soto, J. (2017). *Informe DGI. Desarrollo de metodo de diseño de refuerzo sismico y comprobacion experimental*. Lima.
- Charpis, D., Illampas, R., & Ioannou, I. (2016). *Adobe masonry under monotonic and loading-unloading compression*. Cyprus: Crossmark.
- Costa, A., Silveira, D., & Varum, H. (2012). *Influence of testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks*. Portugal: Elsevier.
- CSI. (17 de 11 de 2018). *CSI SPAIN*. Obtenido de <http://www.csiespana.com/software/2/sap2000>
- CSI manual. (2016). *Sap2000 version 19*. Berkeley.
- Dassault. (06 de 11 de 2018). *Dassault systemes*. Obtenido de <https://academy.3ds.com/en/software/abaqus-student-edition>.
- De Sensi, B. (2003). *La difusion de la arquitectura de la tierra*. Earth Architecture.
- Dowling, D. (2006). *Seismic strengthening of adobe mudbrick houses*. Sydney: University of technology Sydney.
- Ersubasi, F., & Korkmaz, H. (2010). *Shaking table tests on strengthening of masonry structures against earthquake hazard*. Turquia: Natural Hazards and Earth System Sciences.
- Fernandes, M. (2008). *El adobe en el mundo. Seminario de construccion y recuperacion de edificios en adobe*. Almodovar.
- Figueiredo, A., Varum, H., Costa, A., Silveira, D., & Oliveira, C. (2012). *Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall*. Portugal: RILEM.

- Harris, H., & Sabnis, G. (1999). *Structural modeling and experimental techniques*. Philadelphia: CRC Press.
- Hashemi, S., Bakhshi, A., Ghannad, M., Yekrangnia, M., & Soumi, F. (2015). *Predictive Tri-Linear Benchmark Curve for In-Plane Behavior of Adobe Walls*. Teheran: Taylor & Francis.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth Construction. A Comprehensive guide*. Londres: CRATerre.
- Illampas, R., Charmpis, D., & Ioannou, I. (2014). *Finite element simulation of the structural response of adobe masonry buildings subjected to lateral loading*. Cyprus: CrossMark.
- INEI. (2017). *Características de las viviendas particulares censadas*. Lima.
- Jaquin, P., Augarde, C., & Gerrarde, C. (2008). *Chronological description of the spatial development of rammed earth techniques*. Londres: Int. Architect. Herit.
- Jha, A. (2004). *Dynamic testing of structures using scale models*. Quebec: Heritage.
- Lourenço, P. (1996). *Computational strategies for masonry structures*. Porto: Delft University Press.
- Mathworks. (06 de 11 de 2018). *Mathworks*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>.
- Mazzolani, F. (2015). *Protection of historical buildings according to prohitech*. Italia: Springer.
- Onder, G. (2006). *Comparison of elastic and inelastic behavior of historic masonry structures at the low load levels*. Estambul.
- Peña, F., & Manzano, J. (2015). *Dynamical characterization of typical mexican colonial churches*. Mexico City: Springer.
- Quiun, D., San Bartolomé, A., & Zegarra, L. (1996). *Reaconditioning of existing adobe houses to mitigate seismic effects*. Acapulco: Elsevier Science.
- Restrepo, L. (2004). *Seismic Risk of Unreinforced Masonry Buildings*. Milan: UDSP.
- Rodriguez, A., Fonseca, I., Yamin, L., Phillips, C., & Reyes, J. (2003). *Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitacion de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducidaensayados en mesa vibradora*. Bogota: Revista de ingenieria de la universidad de Los Andes.
- RPP. (2 de 06 de 2014). INEI: Casi la mitad de casas en Perú son de barro, piedra y madera. *RPP*, pág. 50.
- San Bartolomé, A., & Quiun, D. (2010). *El terremoto de 2007 en Peru y las normas de albañileria y adobe*. XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. San Juan: ASAAE.
- Sathiparan, N., Mayroca, P., & Meguro, K. (2010). *Seismic study of 1/4 scale unreinforced adobe masonry models and retrofitted with PP-Band meshes*. Tokio: ERS.

- Sosa, C., & Soto, J. (2014). *Reparación de muros de construcciones históricas de tierra mediante el sellado de fisuras y refuerzos estructurales adicionales*. Lima: PUCP.
- Tarque, Camata, Varum, Spacone & Blondet. (2014)(a). *Numerical simulation of an adobe wall under in-plane loading*. Oakland: Earthquake Spectra.
- Tarque, Camata, Spacone, Varum & Blondet. (2014)(b). *Non-linear dynamic analysis of a full scale unreinforced adobe model*. Oakland: Earthquake Spectra.
- Tarque, S. (2011). *Numerical modelling of the seismic behaviour of adobe buildings*. Italia: Università degli Studi di Pavia.
- Torrealva, D., & Vargas, J. (1984). *Estudio experimental de viviendas de adobe en mesa vibradora*. Lima.
- USGS. (2006). *Earthquake hazards program. Historic earthquakes*. Los Angeles.
- Vargas, H. (2017). *Desarrollo de método de diseño de refuerzo sísmico y comprobación experimental*. Lima: PUCP.
- Varum, Tarque, Silveira, Camata, Lobo, Blondet, Figueiredo, Rafi, Oliveira & Costa. (2014). *Structural behaviour and retrofitting of adobe masonry buildings*. Berlin: Springer.
- Yamin, L., Phillips, C., Reyes, J., & Ruiz, D. (2004). *Seismic behavior and rehabilitation alternatives for adobe and rammed earth buildings*. Vancouver: 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- Zegarra, L., San Bartolomé, A., & Quiun, D. (1998). *Manual técnico para el reforzamiento de las viviendas de adobe existentes en la costa y la sierra*. Lima: EPICenter.
- Zegarra, L., San Bartolomé, A., & Quiun, D. (2004). *Effective System for Seismic Reinforcement of Adobe Houses*. Vancouver: Canadian Association for Earthquake Engineering.