

**COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DE UNA ESTRUCTURA EN ADOBE DE UN PISO ANTE
UN MOVIMIENTO VIBRATORIO CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MUROS**

**MANUEL SEBASTIAN RODRIGUEZ CASTILLO
ANDRES MAURICIO JOYA DELGADO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

**COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DE UNA ESTRUCTURA EN ADOBE DE UN PISO ANTE
UN MOVIMIENTO VIBRATORIO CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MUROS**

**MANUEL SEBASTIAN RODRIGUEZ CASTILLO
ANDRES MAURICIO JOYA DELGADO**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director:
RICARDO ALFREDO CRUZ HERNANDEZ
Ingeniero Civil, PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer su apoyo y compañía en las diferentes etapas de la vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en dónde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Agradezco a Dios por darme la vida y fortaleza para cumplir mis metas y sueños. A mi madre Elisa Castillo, por brindarme todo su amor y cariño durante cada día de mi vida, por sus valiosos consejos que me han ayudado siempre a ser una mejor persona, por su apoyo incondicional y creer siempre en mí. Espero que sea el principio de muchas alegrías que quiero regalarles.

A mi Tía Carmen Castillo, mil palabras no bastarían para agradecer su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles. A mis familiares, amigos y profesores, espero que mi triunfo les pueda servir en algún momento de sus vidas.

Manuel Sebastián Rodríguez Castillo

A DIOS, mi familia y especialmente a mi Madre que me ha apoyado en todos los momentos importantes de mi vida. A todos mis maestros, compañeros y amigos que contribuyeron para la materialización de este proyecto. Por último pero no menos importante a Kathe por iluminar mi pensamiento.

Andres Mauricio Joya Delgado

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCION.....	15
1. MARCO TEORICO.....	16
1.1 EL ADOBE COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.....	16
1.2 ESPECIFICACIONES TECNOCONSTRUCTIVAS.....	16
1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ADOBE.....	17
1.4 VIVIENDAS SISMO RESISTENTES DE ADOBE.....	18
1.5 MESA VIBRATORIA.....	18
1.6 FACTORES DE ESCALA.....	19
2. METODOLOGIA.....	22
2.1 SELECCIÓN DEL MODELO DINÁMICO.....	22
2.2 DISEÑO DE LOS MODELOS.....	23
2.3 FABRICACIÓN DE LOS LADRILLOS.....	23
2.4 CIMENTACIÓN DEL MODELO.....	25
2.5 CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS.....	25
2.6 EXPERIMENTO.....	26
2.7 MODELO ANALÍTICO.....	26
3. ANALISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES.....	27
3.1 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.....	27
3.2 MODOS DE FALLA.....	27
3.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	32
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN SAP 2000.....	32
4. CONCLUSIONES.....	37
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
BIBLIOGRAIFIA.....	39
ANEXOS.....	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mesa vibratoria uniaxial de la UIS.....	19
Figura 2. Dimensiones de los modelos.....	24
Figura 3. Curva granulométrica del suelo.....	24
Figura 4. Dimensiones de la base en.....	25
Figura 5. Base del modelo circular.....	25
Figura 6. Modelo circular, convexo con contrafuertes en las esquinas y cuadrado.....	26
Figura 7. Desplazamiento horizontal.....	28
Figura 8. Historial de aceleración horizontal.....	28
Figura 9. Espectro de respuesta de aceleración horizontal.....	29
Figura 10. Fallas presentadas en el modelo circular.....	29
Figura 11. Anclaje muro-cimiento.....	30
Figura 12. Solución óptima para vanos.....	30
Figura 13. Fallas presentadas en el modelo cuadrado.....	31
Figura 14. Ensayo de compresión simple y falla presentada en muretes de adobe a escala 1:10.....	32
Figura 15. Curva esfuerzo-deformación y máxima resistencia a compresión de los muretes de adobe a escala 1:10.....	33
Figura 16. Distribución de esfuerzos principales en el modelo cuadrado.....	34
Figura 17. Distribución de esfuerzos principales en el modelo circular.....	35
Figura 18. Distribución de esfuerzos principales en el modelo convexo.....	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables utilizadas en un modelo dinámico.....	20
Tabla 2. Términos π más convenientes para un modelo estructural dinámico.....	21
Tabla 3. Factores de escala utilizados en modelos dinámicos.....	22
Tabla 4. Factores de escalamiento para un modelo a escala 1:10.....	23
Tabla 5. Principales resultados del experimento.....	27
Tabla 6. Propiedades mecánicas de muretes de adobe a escala 1:10.....	33
Tabla 7. Máximos esfuerzos de flexión y de cortante en el modelo y prototipo de adobe.....	35

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Mezcla húmeda de barro y tamo.....	40
Anexo B. Gavera para moldear los ladrillos de adobe a escala 1:10.....	40
Anexo C. Refuerzo de la placa para la cimentación del modelo.....	40
Anexo D. Construcción de los modelos cuadrado, circular y convexo con contrafuertes.....	41
Anexo E. Dinteles de madera MDF en la parte superior de los vanos.....	42
Anexo F. Instalación de los Instrumentos LVDT para medir desplazamientos.....	42
Anexo G. Fallas presentadas en el modelo circular y de muros convexos.....	43

RESUMEN

TÍTULO: Comparación de la respuesta de una estructura de adobe de un piso ante un movimiento vibratorio con diferentes configuraciones de muros.*

AUTORES: Manuel Sebastián Rodríguez Castillo.**
Andres Mauricio Joya Delgado.

**

PALABRAS CLAVE: Construcción con adobe, modelos a escala reducida, mesa vibratoria, factores de escala, configuración en planta.

DESCRIPCION:

El objetivo de esta investigación es analizar el efecto de la vibración sobre una edificación de adobe no reforzada de un piso, teniendo en cuenta la configuración de muros en planta. Se pretende disponer de una metodología de evaluación estructural mediante el uso de la mesa vibratoria. Para este experimento se construyeron 3 modelos a escala reducida en adobe, variando la geometría en planta (1 cuadrado, 1 circular y 1 convexo con contrafuertes en las esquinas).

Con la mesa vibratoria se pudo introducir una excitación en la base a los modelos a escala reducida y así simular la acción que podría llegar a ocasionar un sismo. Se concluye en este estudio que la configuración de los muros en planta es un factor fundamental en la respuesta de una estructura de adobe de un piso ante un movimiento vibratorio. El mejor comportamiento estructural lo mostró la configuración de muros convexos con contrafuertes en las esquinas, seguido por la circular y la cuadrada.

Luego de haber definido cuál es la configuración de muros más eficiente ante un movimiento vibratorio se debe continuar con investigaciones que definan que tipo de refuerzo deben llevar las estructuras de adobe para así poder establecer un prototipo de vivienda sismoresistente en adobe. Los modelos a escala reducida representan una forma objetiva y efectiva para el analisis de estructuras con la ayuda de la mesa vibratoria.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil.
Director: PhD. Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

ABSTRACT

TITLE: Comparison of the response in an adobe structure of one floor in front of a vibrating movement with different walls configuration. degree project.*.

AUTHORS: Manuel Sebastián Rodríguez Castillo**
Andres Mauricio Joya Delgado

KEYWORDS: Construction in Adobe, small scale model, shaking table, scale factors, configuration of walls.

DESCRIPTION:

The goal of this research is to analyze the effect of vibration on an unreinforced one story adobe building, taking into account the configuration of walls. It is pretended to have a methodology for structural evaluation using the shaking table. For this experiment 3 small-scale models were built on adobe, changing the geometry on the ground (1 square, 1 circle and 1 convex with buttresses at the corners).

With the shaking table there could be introduced a base excitation on the small-scale models and thus simulate the action that a seism could produce. It is concluded in this study that the configuration of the walls in the ground is a key factor in the response of an one story adobe structure facing vibratory motion. The best structural performance was showed by the convex walls with buttresses at the corners configuration, followed by the circular and finally the square one.

After defining what is the most efficient configuration of walls facing a vibratory movement, we should continue the research to define which type of reinforcement should carry adobe structures in order to establish a earthquake resistant prototype in adobe. The small scale models represent an objective and effective way for analysis of structures with the help of the shaking table.

* Work Degree.

** Physics Mechanical Engineering Faculty. Civil School.
Director: PhD. Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

INTRODUCCION

En el siglo XX casi tres millones de personas murieron por la fuerza destructiva de los terremotos; el colapso de las construcciones de mampostería no reforzada es la causa de la gran mayoría de estas muertes (Arnold, 1984). Las casas de adobe construidas en forma precaria sufren daños considerables durante sismos de gran magnitud ya que es un material frágil que necesita de un buen sistema constructivo. El riesgo de colapso se puede reducir con detalles constructivos simples que preserven la integridad de la estructura en el rango inelástico.

El alto costo y la gran contaminación que producen los materiales de construcción industrializados como cemento, acero y ladrillo cocido, han llevado a buscar nuevas alternativas y una de las más atractivas es la construcción con barro; ya que constituye una solución económica, ecológica y sostenible al problema del déficit de vivienda. Cabe resaltar el creciente interés de este tipo de construcción en la arquitectura.

La medida en que se mejora la estructura con nuevos diseños constructivos puede observarse con métodos que sean capaces de predecir la respuesta dinámica y el modo de falla. El análisis no lineal puede aproximar el comportamiento estructural si se conocen las propiedades inelásticas del material; pero en el caso del adobe son difíciles de establecer debido a que no es un material estandarizado. El conocimiento de técnicas que ayuden a evitar el colapso de la estructura debe basarse en pruebas físicas; un método objetivo y práctico en este tipo de análisis es la simulación sísmica con la mesa vibratoria en modelos a escala reducida.

El objetivo principal de esta investigación es determinar la configuración de muros en planta con mejor comportamiento estructural ante un movimiento vibratorio en una edificación de adobe no reforzada de un piso. Los objetivos específicos de la investigación son:

- Simular el efecto de la vibración sobre una edificación con la utilización de modelos a escala reducida y la mesa vibratoria.
- Determinar las dimensiones del modelo a escala reducida que se ajusten a las dimensiones de la mesa vibratoria.
- Comparar el comportamiento estructural de tres configuraciones de muros en planta, cuadrada, circular y convexa con contrafuertes en las esquinas para determinar la de mejor comportamiento ante un movimiento vibratorio.

Para obtener la respuesta estructural del modelo a escala real a partir del modelo a escala reducida se establecen factores de similitud o escalamiento; estos factores se obtienen mediante el análisis dimensional de las variables involucradas en el fenómeno físico. El modelo analítico se hizo con en el programa SAP 2000 para validar las leyes de similitud aplicadas y los modos de falla observados en la prueba física.

1. MARCO TEORICO

1.1 EL ADOBE COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

El adobe es la combinación de barro crudo, arena, grava y tamo o fibra vegetal, como coco, sisal, agave, bambú, aserrín, pasto o paja. Los materiales se extraen localmente, es decir en el lugar de la obra o muy cerca de allí; lo que economiza materiales de construcción y costos de transporte. Los ladrillos de adobe son pequeñas piezas en forma de paralelepípedo elaboradas a mano y secadas al aire libre y se utilizan en la construcción de muros portantes o de mampostería. El mortero utilizado en la pega está compuesto básicamente de barro, arena, cal o cemento.

La construcción con adobe es una técnica muy antigua; hay construcciones que datan del 8000 a 6000 a.C en Turquestán (Rusia); en Egipto hay estructuras de más de 3200 años de antigüedad, por ejemplo la fortaleza de Medinet Habu y las bóvedas del templo mortuorio de Ramsés II en Gourná (Minke 2005). En Colombia la construcción con adobe fue traída por los españoles en la época colonial; se construyeron iglesias, capillas y casas que datan hace más de 400 años, en la actualidad estas estructuras son consideradas monumentos del patrimonio histórico y cultural. Por ejemplo la Capilla Doctrinera de Chíquiza en Boyacá fue construida con adobe; en Bucaramanga Santander la Capilla de los Dolores fue elaborada con una combinación de adobe, tapia pisada y piedra (Rivera, 2012).

El adobe es un material que tiene gran inercia térmica, es decir, se opone a los cambios de temperatura. Actúa como regulador de humedad, puede absorber y desorber el vapor sin perder rigidez y sin expandirse, manteniendo un ambiente más sano. Los bloques son resistentes al fuego aun si contienen tamo, sin embargo, según la norma alemana DIN 4102, es considerado combustible si la densidad del barro es menor que 1700 [kg/m³]. El adobe es un material reciclable que causa un bajo impacto ambiental y trabajándolo en el sitio de la obra gasta menos del 10% de la energía requerida en la construcción con ladrillos cocidos y hormigón armado [1].

El adobe es un material que no está estandarizado debido a que las propiedades físicas y la composición química del suelo, tienen una variación importante de una región a otra; inclusive se puede encontrar una gran variación del suelo en el lugar de la obra. Los bloques de adobe se contraen al secarse por la capacidad aglomerante de la arcilla produciendo grietas de retracción lineal. Es un material frágil con baja resistencia a tensión y por esta razón requiere de un buen sistema constructivo.

1.2 ESPECIFICACIONES TECNOCONSTRUCTIVAS.

La tierra se caracteriza por sus componentes arcilla, limo, arena y grava; la composición recomendada del suelo para la fabricación de ladrillos de adobe debe ser 5-15 % arcilla, 20-30% limo, 60-70% arena, y menos del 5% de grava; la composición óptima es de 14% arcilla, 22% limo, 62% arena y 2% grava [1].

El adobe requiere que los componentes del suelo sean óptimos, por eso es necesario hacer pruebas de campo y/o de laboratorio como el análisis granulométrico. El material aglutinante del adobe es la arcilla, debe contener una cantidad adecuada para evitar las fisuras de retracción lineal que se generan en los ladrillos de barro al secarse, y garantizar la cohesión entre partículas. Los suelos de color negro no son recomendables porque contienen un alto porcentaje de materia orgánica.

Dos pruebas de campo prácticas para determinar el contenido de arcilla presente en el suelo se describen a continuación:

- Ensayo de resistencia seca. Con el suelo elegido se hacen mínimo tres bolitas de barro de aproximadamente 2 [cm] de diámetro. Se dejan secar por lo menos 24 horas. Se aplasta cada bolita entre el dedo pulgar e índice. Si ninguna de las bolitas se rompe, el suelo contiene suficiente arcilla para ser usado en la construcción de adobe. Si alguna de las bolitas pueden ser aplastada, el suelo no es adecuado ya que carece de la cantidad suficiente de arcilla [2].
- Ensayo del rollo. Usando ambas manos hacer un pequeño rollito de barro. Si la longitud sin romperse del rollito producido está entre 5 – 15 [cm] el suelo es adecuado. Si el rollito se rompe con menos de 5 [cm], el suelo no contiene suficiente arcilla. Si la longitud del rollito supera los 15 [cm] el suelo contiene mucha arcilla [2].

Luego de comprobar que el suelo es apto, se excava y se amontona; si el suelo está húmedo se extiende sobre un plástico y se deja secar al sol. El suelo se machaca para moler los conglomerados de tierra con el fin de pulverizar la arcilla y separar los componentes del suelo; la arcilla pulverizada es el material aglutinante en la mezcla de adobe y al entrar en contacto con el agua es moldeable y se endurece al secarse uniendo los componentes de la mezcla. Luego de pulverizar el suelo se tamiza para separar las gravas y los restos vegetales. Se recomienda usar el tamiz #10 para separar las gravas del suelo ya que el porcentaje de gravas en la mezcla de adobe debe ser menor del 5%. El suelo es un material heterogéneo por eso es necesario homogenizarlo, para esto se amontona y es paleado en seco hasta lograr que los diferentes tipos de suelo se conviertan en un conjunto uniforme; una vez homogenizado se extraen las muestras para el análisis granulométrico.

El contenido de agua debe humedecer la mezcla lo suficiente para que pueda ser moldeable y se efectúa el amasado de la mezcla agregándole como aditivo tamo para darle mayor resistencia a los bloques. Se repite el proceso de amasado hasta homogenizar la mezcla lodosa con el tamo y se procede a la etapa del moldeo. El adobe es modelado con una gavera de madera, generalmente compuesta por dos moldes, en la que se comprime el barro. Después de moldear los ladrillos, se recomienda secar los ladrillos a la sombra, en época de verano, cerca de la obra, y en un terreno con fisionomía plana, después de 24 horas se levantan los adobes moldeados verticalmente para que se sequen por las dos caras.

La construcción de muros utilizando ladrillos de adobe se hace utilizando mortero de barro y cemento o cal hidráulica como aditivo. El proceso de elaboración del mortero consta de excavación, pulverización, tamizado y homogenización; luego se mezcla en seco con cal o cemento y se humedece para que tenga una consistencia moldeable para pegar los ladrillos de adobe.

1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ADOBE.

La determinación de las propiedades mecánicas del adobe no es el objetivo principal de esta investigación. Estas propiedades pueden variar dependiendo de la fuente del material y la referencia consultada.

Algunas de las propiedades mecánicas estudiadas del adobe son, el módulo de Young E_a , según el código de Nueva Zelanda [3], este valor se puede calcular como $E_a = 300 * \sigma_c$, donde σ_c es la resistencia a compresión del adobe. La resistencia a la compresión debe ser mínimo de 0.5 [MPa] y puede llegar hasta 5 [MPa], dependiendo del tipo de arcilla (Minke 2005). En suelos de baja resistencia el módulo de elasticidad se puede aumentar a valores entre 600-1500 [MPa], al agregarle aditivos como cal hidráulica o cemento [4]. La relación de Poisson se puede tomar como $\mu = 0.2$ [4]; la densidad estándar del suelo se considera como $\gamma = 1.9$ [Ton/m³] [5].

La resistencia a tensión del adobe no tiene una relación específica con respecto a la resistencia a compresión, sin embargo, el autor H. Varum sugiere que la resistencia a la tracción puede ser tomada como el 20 % de la resistencia a compresión. El código de Nueva Zelanda [3], indica que la resistencia al cortante por abajo

$\tau = 0.08$ [MPa] puede considerarse aceptable; también se aceptan valores superiores si se lleva a cabo pruebas para evaluar la resistencia a compresión del adobe σ_c , en estos casos, la resistencia al cortante puede ser el valor más alto dado por las dos ecuaciones siguientes:

$$\tau = 0.07 \times \sigma_c \quad (1)$$

$$\tau = (70 + 5 \times h)/1000 \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Donde h representa la altura del muro en metros.

1.4 VIVIENDAS SISMO RESISTENTES DE ADOBE.

La actividad sísmica ocurre por el movimiento de las placas tectónicas, o por actividades volcánicas; la zona del ecuador y la zona andina son muy propensas a sufrir sismos. Las estructuras expuestas a movimientos sísmicos, son afectadas por la aceleración horizontal inducida por el movimiento del suelo, provocando el colapso de la estructura y la muerte de sus ocupantes. Es necesario implementar detalles constructivos al sistema estructural para evitar el colapso de las edificaciones. Algunas recomendaciones para la construcción de casas de adobe sismo resistentes:

- La vivienda debe construirse en un terreno plano, ya que al estar en un terreno inclinado es propensa a sufrir deslizamientos de tierra.
- La configuración de muros en planta debe ser compacta; la geometría en planta de muros mejora la rigidez estructural, siendo más rígida la forma circular, que la forma cuadrada y esta a su vez da mejor rigidez que la forma rectangular. Un método simple de comprobarlo se efectuó en una tesis de doctorado de la universidad de Kassel Alemania; la prueba consistía en una masa de 40 [kg] sobre un péndulo de 5.5 [m] de longitud que se utilizó para impactar modelos de viviendas a escala reducida. La forma cuadrada colapso al recibir cuatro golpes y la circular no colapso incluso después de 7 golpes [1]. En Afganistán se construyeron viviendas antisísmicas utilizando muros convexos reforzados con contrafuertes en las esquinas; la estabilidad alcanzada con este diseño es comparable con las plantas circulares [1].
- Las esquinas y juntas de los muros donde se concentran los esfuerzos, deben rigidizarse con contrafuertes para disminuir el movimiento generado por las fuerzas sísmicas en los elementos estructurales.
- Se recomienda que el techo sea soportado por una estructura independiente, de tal manera que los muros de adobe solo resistan su propio peso.
- Los muros deben amarrarse entre sí con una viga de anillo que los una de tal manera que se muevan como un solo conjunto; a su vez estos muros deben estar bien anclados al cimiento.

1.5 MESA VIBRATORIA.

La mesa vibratoria es un sofisticado instrumento de laboratorio que permite simular movimientos vibratorios y está compuesta por una plataforma en la cual se ponen los modelos de prueba, la plataforma se deslizada por un rodamiento y es accionada por un servo-actuador. Este tipo de mesas son utilizadas en ingeniería sísmica desde hace muchos años; su tamaño y capacidad varía dependiendo de su aplicación [6].

Una mesa vibratoria de gran tamaño implica una gran inversión económica, en la construcción, mantenimiento y operación. Una alternativa más económica es la utilización de modelos a escala reducida; que requiere de mesas vibratorias de menor tamaño y capacidad. Por ejemplo, en México, en el instituto de

ingeniería de la UNAM cuentan con una mesa vibratoria de tipo biaxial (horizontal y vertical); con un tamaño de 4x4 [m], soporta modelos con un peso de 20 [Ton], la frecuencia que se puede aplicar varía entre 0.1 – 50 [Hz]; es utilizada en el análisis sísmico de edificaciones a escala reducida [7]. En Colombia, la Universidad Industrial de Santander (UIS), cuenta con una mesa vibratoria de tipo uniaxial en sentido horizontal (ver fig. 1), tiene un tamaño de 1.0 x 0.9 [m], un desplazamiento máximo de 12.5 [cm], la frecuencia que se puede aplicar tiene un rango de 0.1 – 60 [Hz] y soporta modelos de prueba con un peso de 80 [Kg] [6].

1.6 FACTORES DE ESCALA.

Los modelos a escala reducida son utilizados en el estudio de fenómenos físicos de estructuras, porque son más económicos y fáciles de construir que los modelos a escala real. Con los factores de escala es posible determinar el comportamiento del prototipo (modelo a escala real), con base en un modelo a escala reducida.

Los factores de escala se obtienen a partir de productos o números adimensionales. El *Teorema Pi de Buckingham's* se utiliza para obtener números adimensionales conocidos como términos π . El teorema Pi combina variables físicas de interés, ver tabla 1, en una ecuación dimensionalmente homogénea; no siempre las combinaciones adimensionales resultan ser adecuadas, es decir, no todos los productos adimensionales caracterizan las propiedades de un sistema [8]. Los términos más convenientes para un modelo dinámico estructural se muestran en la tabla 2.

Figura 1. Mesa vibratoria uniaxial de la UIS.



La similitud entre el modelo y el prototipo se logra a partir de los factores de escala; los factores de escala se obtienen de los términos π , con la relación $\pi_p = \pi_m$, los subíndices “p” y “m” hacen referencia al prototipo y al modelo respectivamente. Por ejemplo, si tomamos el factor adimensional π_{12} de la tabla 2, tendremos que:

$$\frac{\pi_{p12}}{\pi_{m12}} = \frac{L_p \cdot \left(\frac{E_p}{F_p}\right)^{1/2}}{L_m \cdot \left(\frac{E_m}{F_m}\right)^{1/2}} = 1 \quad (3)$$

Si escribimos la ecuación (3) en función de $S_L = L_p/L_m$ factor de escalamiento longitudinal, donde L_p es la longitud del prototipo y L_m es la longitud del modelo; $S_E = E_p/E_m$ factor de escalamiento del módulo de Young; $S_F = F_p/F_m$ factor de escalamiento de la fuerza, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{S_L \cdot S_E^{1/2}}{S_F^{1/2}} = 1 \quad (4)$$

Las fuerzas en el prototipo, se obtienen a partir de la siguiente relación:

$$S_F = \frac{F_p}{F_m} = S_E \cdot S_L^2 \quad (5)$$

Los modelos dinámicos pueden ser de tres tipos (ver tabla 3):

Tabla 1. Variables utilizadas en un modelo dinámico.

Cantidad	Dimensiones
Longitud [L]	L
Masa [M]	M
Tiempo [T]	T
Fuerza [F]	$M \cdot L/T^2$
Módulo de Young [E]	$M/(T^2 \cdot L)$
Relación de Poisson [ν]	-----
Densidad [ρ]	M/L^3
Deflexión [δ]	-----
Esfuerzo [σ]	L
frecuencia [f]	T^{-1}
Velocidad [V]	L/T
aceleración [a, g]	L/T^2

- Modelo replica real; implica aumento en la inercia y las fuerzas gravitacionales. Tiene grandes restricciones en cuanto a las propiedades del material; especialmente el incremento de la densidad en el material del modelo [8].
- Modelo con simulación artificial de masa; es una alternativa del modelo replica real. En este modelo no es necesario aumentar la densidad del material; el problema se soluciona agregando una sobrecarga al modelo con una placa o masas concentradas. El valor de la masa adicional se calcula con la relación $(g \cdot \rho \cdot L/E)_m = (g \cdot \rho \cdot L/E)_p$ [8].
- Modelo en el que se omiten las fuerzas de gravedad; en este modelo no es necesario aplicar masas adicionales. Los esfuerzos inducidos por las cargas de gravedad son pequeños en comparación con los esfuerzos generados por los movimientos sísmicos [8].

Tabla 2. Términos π más convenientes para un modelo estructural dinámico.

$\pi_1 = \frac{M \cdot a}{E \cdot L^2}$	$\pi_2 = \frac{\rho \cdot g \cdot L}{E}$
$\pi_3 = \frac{\delta}{L}$	$\pi_4 = \frac{\sigma}{E}$
$\pi_5 = \nu$	$\pi_6 = \varepsilon$
$\pi_7 = \frac{\rho \cdot V^2}{E}$	$\pi_8 = \frac{E \cdot L^2}{F}$
$\pi_9 = \frac{T \cdot a^{1/2}}{L^{1/2}}$	$\pi_{10} = \frac{\rho \cdot L^3 \cdot a}{F}$
$\pi_{11} = \frac{a}{g}$	$\pi_{12} = L \cdot \left(\frac{E}{F}\right)^{\frac{1}{2}}$

2. METODOLOGIA

La metodología que se plantea es la construcción de tres modelos de casas de adobe de un piso a escala reducida, variando la configuración de muros en planta para someterlas a una prueba en la mesa vibratoria y de esta forma conocer la de mejor comportamiento. Se aplican factores de escala para que los resultados del modelo a escala reducida se puedan extrapolar a los del prototipo. Los datos obtenidos en la prueba se validan con un modelo analítico generado con el programa SAP 200.

2.1 SELECCIÓN DEL MODELO DINÁMICO.

El modelo en el que se desprecian las fuerzas de gravedad fue seleccionado para este estudio. La ventaja de los modelos sin simulación de fuerzas de gravedad es que no hay necesidad de masas adicionales, sin embargo, la mesa vibratoria debe ser capaz de reproducir señales con aceleraciones y frecuencias altas. En el rango elástico, este tipo de modelo es muy preciso en comparación con el comportamiento del prototipo; las únicas fuerzas olvidadas son las fuerzas de compresión causadas por el peso propio de la estructura. En estructuras de un piso, las fuerzas gravitacionales son muy bajas, especialmente en la parte superior de los muros donde los daños causados por los movimientos sísmicos suelen ser más graves [9]. En la tabla 4 se muestran los factores de escalamiento en un modelo dinámico omitiendo las fuerzas de gravedad a escala 1:10.

Tabla 3. Factores de escala utilizados en modelos dinámicos.

Factor de escalamiento	Dimensión	Modelo replica real	Simulación artificial de masa	Omitiendo fuerzas de gravedad
Longitud [S_L]	L	S_L	S_L	S_L
Tiempo [S_T]	T	$S_L^{1/2}$	$S_L^{1/2}$	S_L
Desplazamiento [S_δ]	L	S_L	S_L	S_L
Módulo de Young [S_E]	M/(T ² . L)	S_E	S_E	1
Fuerza [S_F]	M. L/T ²	$S_E \cdot S_L^2$	$S_E \cdot S_L^2$	S_L^2
Esfuerzo [S_σ]	M/(T ² . L)	S_E	S_E	1
Relación de Poisson [S_ν]	-----	1	1	1
Densidad [S_ρ]	M/L ³	S_E/S_L	$(g \cdot \rho \cdot L/E)_m$ $= (g \cdot \rho \cdot L/E)_p$	1
Deformación unitaria [S_ϵ]	-----	1	1	1
Velocidad [S_V]	L/T	$S_L^{1/2}$	$S_L^{1/2}$	1
Aceleración [S_a]	L/T ²	1	1	S_L^{-1}
Gravedad [S_g]	L/T ²	1	1	-----
Frecuencia [S_ω]	T ⁻¹	$S_L^{-1/2}$	$S_L^{-1/2}$	S_L^{-1}
Energía [S_U]	M. L ² /T ²	$S_E \cdot S_L^3$	$S_E \cdot S_L^3$	S_L^3

2.2 DISEÑO DE LOS MODELOS.

Debido al tamaño de la mesa vibratoria y el peso máximo que puede soportar, el modelo debe ser reducido a escala 1:10. Para mantener el factor de escala del modelo y facilitar su construcción se simplificó el diseño de los prototipos. A esta escala se puede utilizar el mismo material y técnicas de construcción del prototipo. La configuración de muros en planta varía, pero se mantiene constante el área interna del diseño y el peso de los modelos. En la figura 2 se muestran las dimensiones de los modelos a escala reducida.

2.3 FABRICACIÓN DE LOS LADRILLOS.

El suelo utilizado en esta investigación fue extraído en los predios de la UIS; se aplicó el procedimiento descrito en la sección 2.2. La curva granulométrica de la figura 3 corresponde al suelo utilizado en esta investigación y se obtuvo con análisis granulométrico por tamizado, los agregados más finos como limo y arcilla se diferenciaron con el ensayo de sedimentación. La composición del suelo es 13% arcilla, 37% limo y 50% arena. Para mejorar la mezcla se agrega 300 [g] de arena y 30 [g] de grava por cada 1000 [g] de suelo y se mezcla en seco. Con el arreglo la composición del suelo es 10% arcilla, 28% limo, 60% arena y 2% de grava.

Tabla 4. Factores de escalamiento para un modelo a escala 1:10.

Cantidad	Factor de escala
Longitud [L]	$L_p = 10 L_m$
Tiempo [T]	$T_p = 10 T_m$
Fuerza [F]	$F_p = 100 F_m$
Módulo de Young [E]	$E_p = E_m$
Densidad [ρ]	$\rho_p = \rho_m$
Deflexión [δ]	$\delta_p = 10 \delta_m$
Esfuerzo [σ]	$\sigma_p = \sigma_m$
Frecuencia ω	$\omega_p = 0.1 \omega_m$
Velocidad [V]	$V_p = V_m$
aceleración [a]	$a_p = 0.1 a_m$

Figura 2. Dimensiones de los modelos [cm].

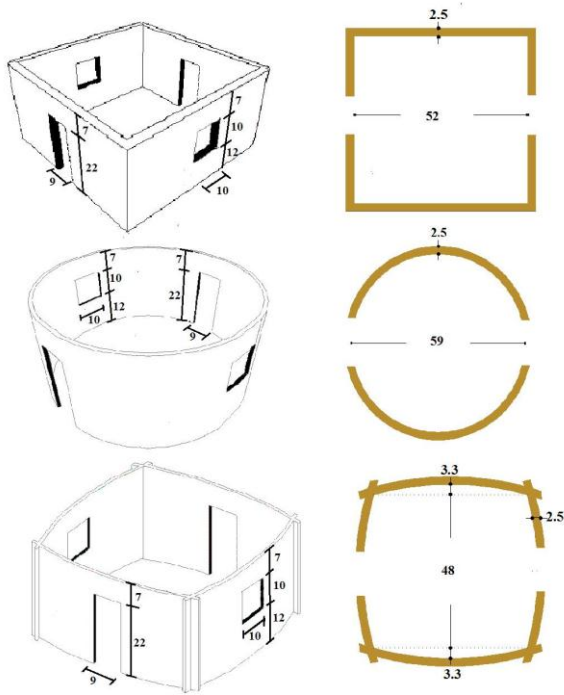
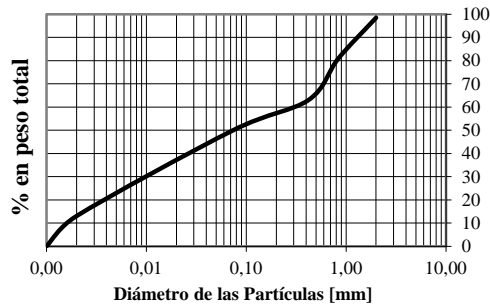


Figura 3. Curva granulométrica del suelo.



Se agrega agua hasta que la mezcla sea moldeable agregando tamo picado en fibras que no sean más largas que las dimensiones de los ladrillos y se homogeniza la mezcla lodosa con el tamo (Anexo A). Una vez preparada la mezcla se moldean los ladrillos con una gavera de madera (Anexo B). Las dimensiones de los ladrillos que componen la estructura de adobe se redujeron a la escala para que el comportamiento dinámico sea similar al del prototipo y se establecieron según recomendaciones generales [10]. Las dimensiones de los ladrillos utilizados en los modelos son de 1 [cm] de ancho, 2.5 [cm] de tizón y 5 [cm] de soga. En total se moldearon 6500 ladrillos para construir los tres modelos.

2.4 CIMENTACIÓN DEL MODELO.

Para asegurar los modelos a la mesa vibratoria se utilizó una lámina de madera MDF de 90 x 90 [cm] con un espesor de 18 [mm]; el peso total de la tabla es de 12 [kg]. La mesa vibratoria tiene una matriz de orificios roscados de 1/2", esta matriz se replicó en la lámina de MDF y se conectó con pernos de acero. Sobre la lámina de MDF se fundió una placa de cemento reforzada con una malla de acero (Anexo c). Sobre la placa de cemento se hizo un sobre cimiento en cemento de 3 [cm] de altura y 3 [cm] de ancho, que soporta la estructura de adobe. En la figura 4 el cuadrado de 90 x 90 [cm] representa la lámina de MDF, la línea en el interior delimita la placa de cemento y el área sombreada representa el sobre cimiento. El peso total de la base incluyendo la lámina de MDF, la placa y el sobre cimiento de cemento es de 50 [kg] (ver fig. 5).

Figura 4. Dimensiones de la base en [cm].

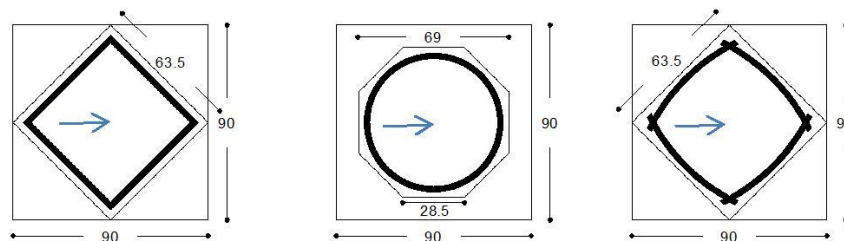


Figura 5. Base del modelo circular.



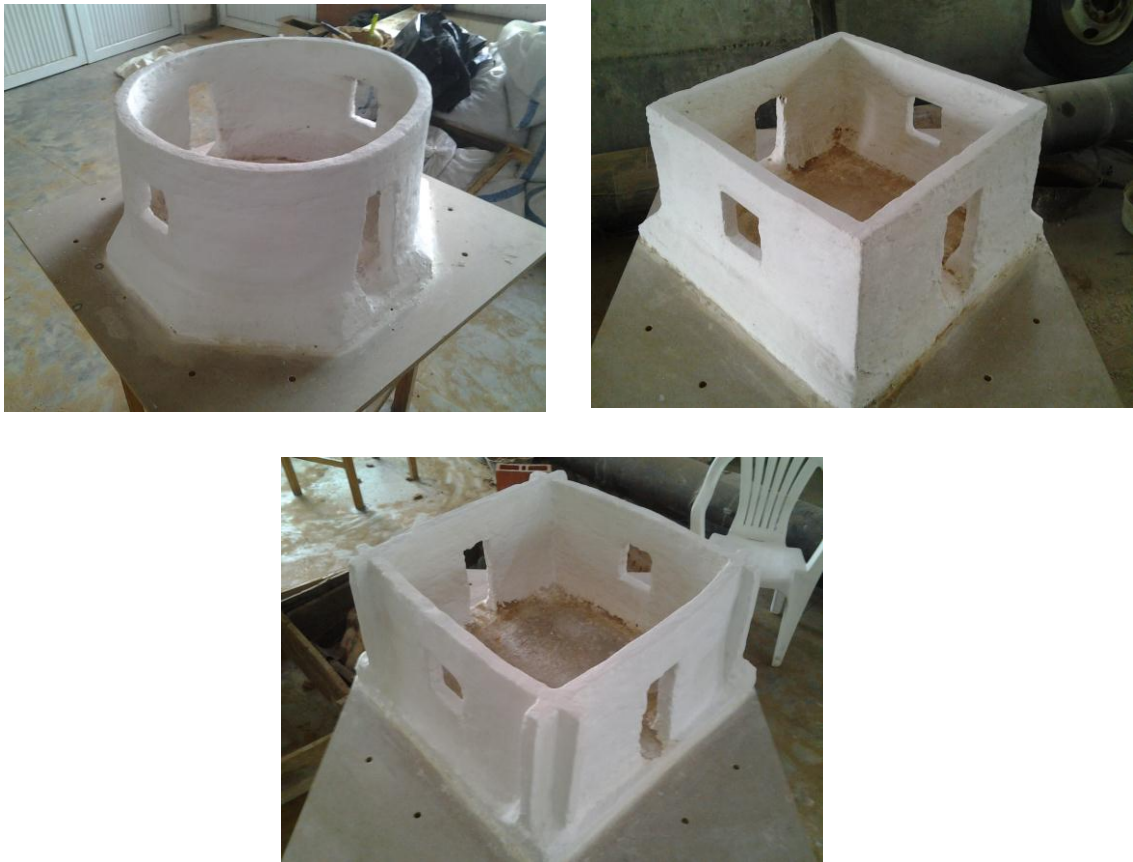
2.5 CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS.

Para la construcción de los muros de adobe se utilizó mortero con una relación volumétrica cal-barro-agua de 1:3:1. El aparejo se hizo por las sogas del ladrillo; la segunda hilada empieza con medio ladrillo para garantizar la traba entre las uniones y se continúa en forma secuencial de tal manera que la tercera hilada empieza con el ladrillo completo (anexo D). En la parte superior de las puertas y ventanas se colocaron dinteles de madera MDF (anexo E). La estructura de adobe pesa 20 [kg], en total cada modelo tiene un peso promedio de 70 [kg] (ver fig. 6). Se hicieron tres muretes de adobe de 25x30 [cm], para determinar la resistencia a compresión del material utilizado.

2.6 EXPERIMENTO.

Para la toma de datos se instalaron dos LVDT para medir desplazamientos y un acelerómetro (anexo F). Se aplica una señal sinusoidal con amplitud constante de 5 [mm] y variando la frecuencia 1 [Hz] cada 30 [s] empezando en 1 [Hz], la señal se aplica en el sentido que indica la figura 4. La frecuencia se aumentó hasta observar las primeras formas de falla. Después se recopiló la información de los sensores y se hizo un registro fotográfico de las fallas presentadas. (Anexo G).

Figura 6. Modelo circular, convexo con contrafuertes en las esquinas y cuadrado.



2.7 MODELO ANALÍTICO.

El modelo analítico se hizo utilizando el programa SAP 2000, se creó un modelo a escala real y reducida para cada diseño. Los modelos se estudiaron por medio de un análisis tridimensional de elementos finitos y dinámico lineal por historial de tiempo [11].

3. ANALISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.

La señal aplicada a los modelos es en sentido horizontal como se describe en la sección 3.6; los LVDT detectaron un decremento en la amplitud de la señal vibratoria como se muestra en la figura 7. La señal obtenida por el acelerómetro describe el historial de tiempo de la aceleración como se muestra en la figura 8. El espectro de respuesta de aceleración horizontal se muestra en la figura 9. La descripción de la prueba se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Principales resultados del experimento.

Frecuencia [Hz]	Aceleración horizontal [cm/s ²]	Amplitud [mm]	Descripción del daño		
			Cuadrado	Circular	Convexo
1	0.5	5	Ninguno	Ninguno	Ninguno
2	1.87	4.67	Ninguno	Ninguno	Ninguno
3	3.9	4.33	Ninguno	Ninguno	Ninguno
4	6.4	4	Ninguno	Ninguno	Ninguno
5	9.17	3.67	Ninguno	Ninguno	Ninguno
6	12	3.33	Ninguno	Ninguno	Ninguno
7	14.67	3	Ninguno	Ninguno	Ninguno
8	17.04	2.67	Fisura horizontal en la unión muro-cimiento.	Ninguno	Ninguno
9	18.79	2.33	Fisura vertical en la parte superior del muro. Fisura horizontal en la unión muro-dintel.	Ninguno	Ninguno
10	20	2	Aumento de las fisuras y se extienden hacia las esquinas de las ventanas y puertas.	Fisura horizontal en la unión muro-cimiento. Fisura vertical en la parte superior del muro.	Ninguno
11	20.17	1.67	-----	Fisura horizontal en la unión muro-dintel. Aumento de las fisuras y se extienden hacia las esquinas de las ventanas y puertas.	Fisura horizontal en la unión muro-cimiento. Fisura vertical en la parte superior del muro.

3.2 MODOS DE FALLA.

- Falla por corte. La primera falla que aparece en los tres modelos es una fisura horizontal en la unión entre el muro y el cimiento. Este tipo de falla se debe al esfuerzo cortante que varía en función de la altura,

siendo más crítico en la base. Las uniones en donde hay cambio de material como el caso de la unión cemento-muro y muro-dinteles son las más vulnerables a este tipo de falla (ver fig. 10).

Algunas recomendaciones para evitar este tipo de falla es anclar el muro al cemento con madera rolliza mínimo de 5 [cm] de diámetro, estos elementos deben situarse cada 30 a 50 [cm], estar bien anclados al cemento y entrar al muro por lo menos 50 [cm] en la vertical (ver fig. 11). En el caso de los dinteles también se recomienda utilizar elementos que entren al muro y aseguren una buena traba entre el dintel y el muro. Minke recomienda utilizar mortero con una buena capacidad aglutinante para la unión entre el cemento y la primera hilada de adobes, y la unión entre muros y dinteles [12].

Figura 7. Desplazamiento horizontal.

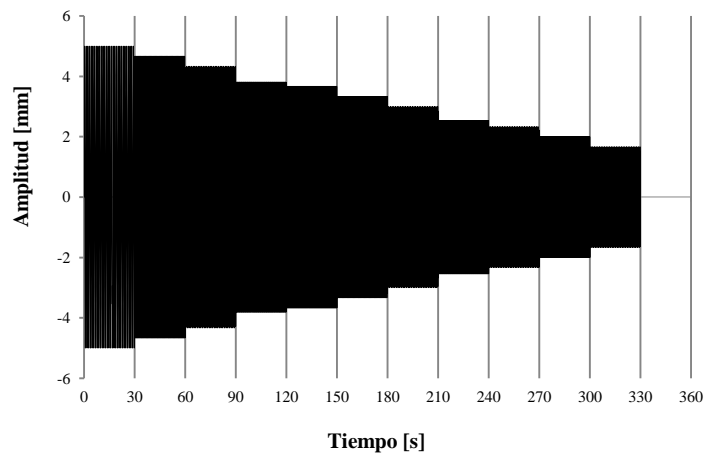


Figura 8. Historial de aceleración horizontal.

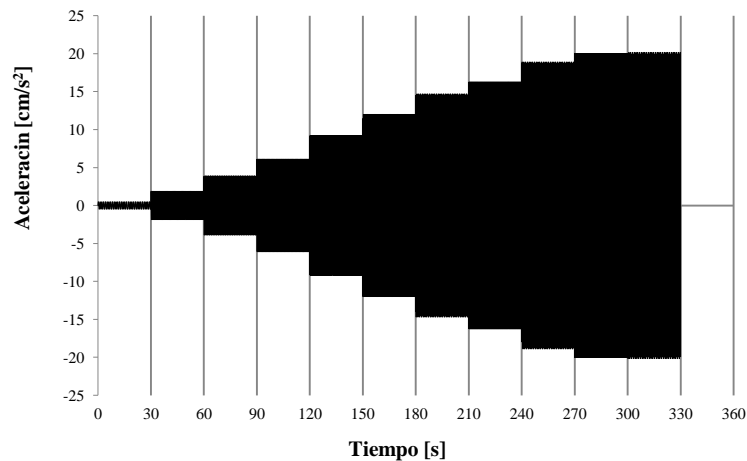
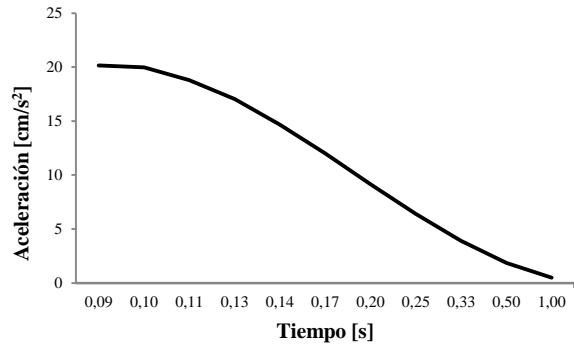


Figura 9. Espectro de respuesta de aceleración horizontal.



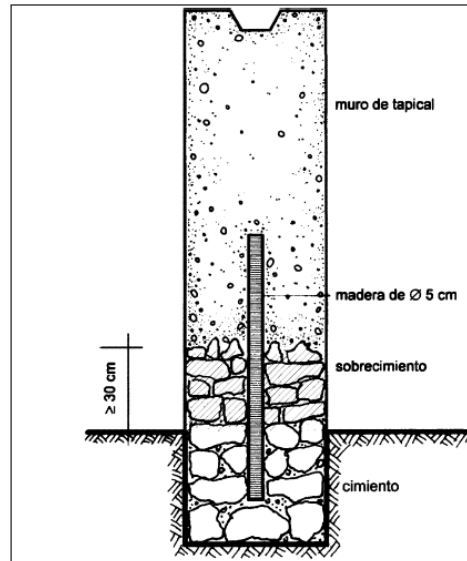
- Falla por flexión perpendicular al plano del muro. Este tipo de falla sucede por falta de refuerzo y confinamiento en los muros; la falla se presenta con grietas verticales en la parte superior del muro con prolongación diagonal hasta las esquinas de los vanos.

Para evitar este tipo de falla se recomienda amarrar los muros con una viga de anillo en la parte superior, este mecanismo hace que los esfuerzos se transmitan de forma uniforme a todos los muros y evita el volcamiento de las secciones fisuradas. Para evitar la prolongación del agrietamiento diagonal hacia las esquinas de los vanos, Minke recomienda prolongar los vanos hasta la viga de anillo como se muestra en la figura 12 [12].

Figura 10. Fallas presentadas en el modelo circular.



Figura 11. Anclaje muro-cimiento



, **Fuente:** “Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra” Gernot Minke.

La figura 13 presenta las fallas observadas en el modelo cuadrado después de ser sometido a la prueba en la mesa vibratoria; las fallas están numeradas en el orden que aparecieron. La falla 1, 2 y 3 son originadas por esfuerzo cortante, aparecen en la parte inferior en la unión muro-cimentación y se prolongan hacia las esquinas de los vanos. La falla 4, 5 y 6 son fallas por flexión perpendicular al plano, aparecen como grietas verticales en la parte superior del muro y se prolongan diagonalmente hacia los vanos uniéndose con las fisuras por corte producidas en los dinteles.

Figura 12. Solución óptima para vanos



Fuente: “Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra” Gernot Minke.

Figura 13. Fallas presentadas en el modelo cuadrado.



3.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

Se construyeron 3 muros con ladrillos de adobe a escala 1:10 y se dejaron secar por un periodo de 10 días, luego los muretes fueron sometidos a un ensayo de compresión simple, tomando registro de las deformaciones verticales con un deformímetro, como se muestra en la figura 14.

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN SAP 2000.

Se hace un análisis por historial de tiempo, para un tiempo de 300 [s], aceleración de 20 [cm/s²], amplitud de 2 [mm] y frecuencia de 10 [Hz], la señal sinusoidal se aplica en la dirección “x”. La condición de apoyo del modelo analítico es de empotramiento en la base de los muros. Las propiedades mecánicas del material utilizadas en el modelo analítico se muestran en la tabla 6.

En la figura 16, 17 y 18 se muestra la distribución de esfuerzos en los tres modelos; se puede observar y validar que la zona más crítica del modelo ante el esfuerzo cortante, es en la base de los muros y en las esquinas de los vanos. En el diagrama de esfuerzos debido a la flexión perpendicular al plano del muro, se puede observar y validar que la mayor concentración de esfuerzos se encuentra en la parte superior del muro.

La tabla 7 presenta los resultados de los esfuerzos y desplazamientos obtenidos en los modelos analíticos de SAP 2000 con las condiciones anteriormente descritas. La precisión obtenida por los LVDT es de 0.1 [mm], por lo tanto no se pueden comparar los desplazamientos obtenidos por el instrumento con los obtenidos con el programa.

Se observa analíticamente que el diseño más rígido es el de muros convexos con contrafuertes en las esquinas, ya que presenta el menor desplazamiento horizontal comparado con los otros modelos. Se comprueba analíticamente que los factores a escala 1:10 del periodo, desplazamiento y esfuerzos se cumplen (ver tabla 4).

Figura 14. Ensayo de compresión simple y falla presentada en muretes de adobe a escala 1:10.



Figura 15. Curva esfuerzo-deformación y máxima resistencia a compresión de los muretes de adobe a escala 1:10.

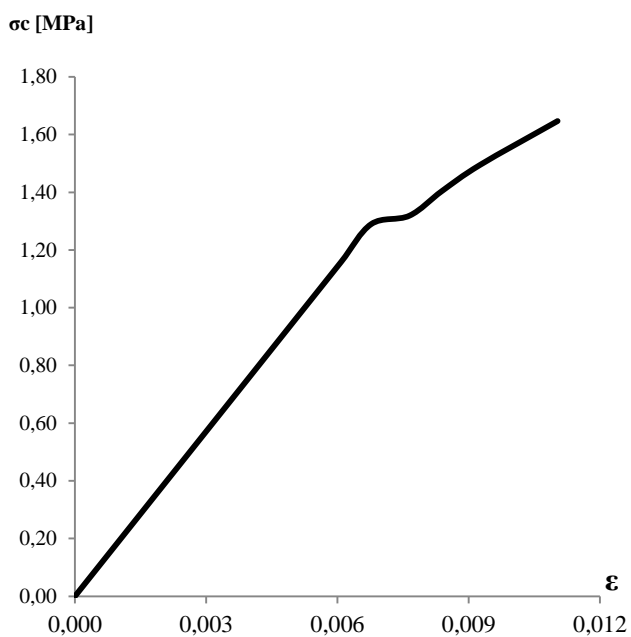


Tabla 6. Propiedades mecánicas de muretes de adobe a escala 1:10.

Parámetro	Unidad	Escala 1:10
Densidad	Ton/m ³	2.2
Módulo de Young	MPa	186.7
Resistencia a compresión	MPa	1.6
Resistencia a tensión	MPa	0.32*
Resistencia al cortante	MPa	0.11*
Relación de Poisson	-----	0.2

* Calculado según sección 2.3.

Figura 16. Distribución de esfuerzos principales en el modelo cuadrado [MPa]. a) y b) muestra la distribución de esfuerzo cortante; c) y d) muestra la distribución de esfuerzo por flexión perpendicular al muro.

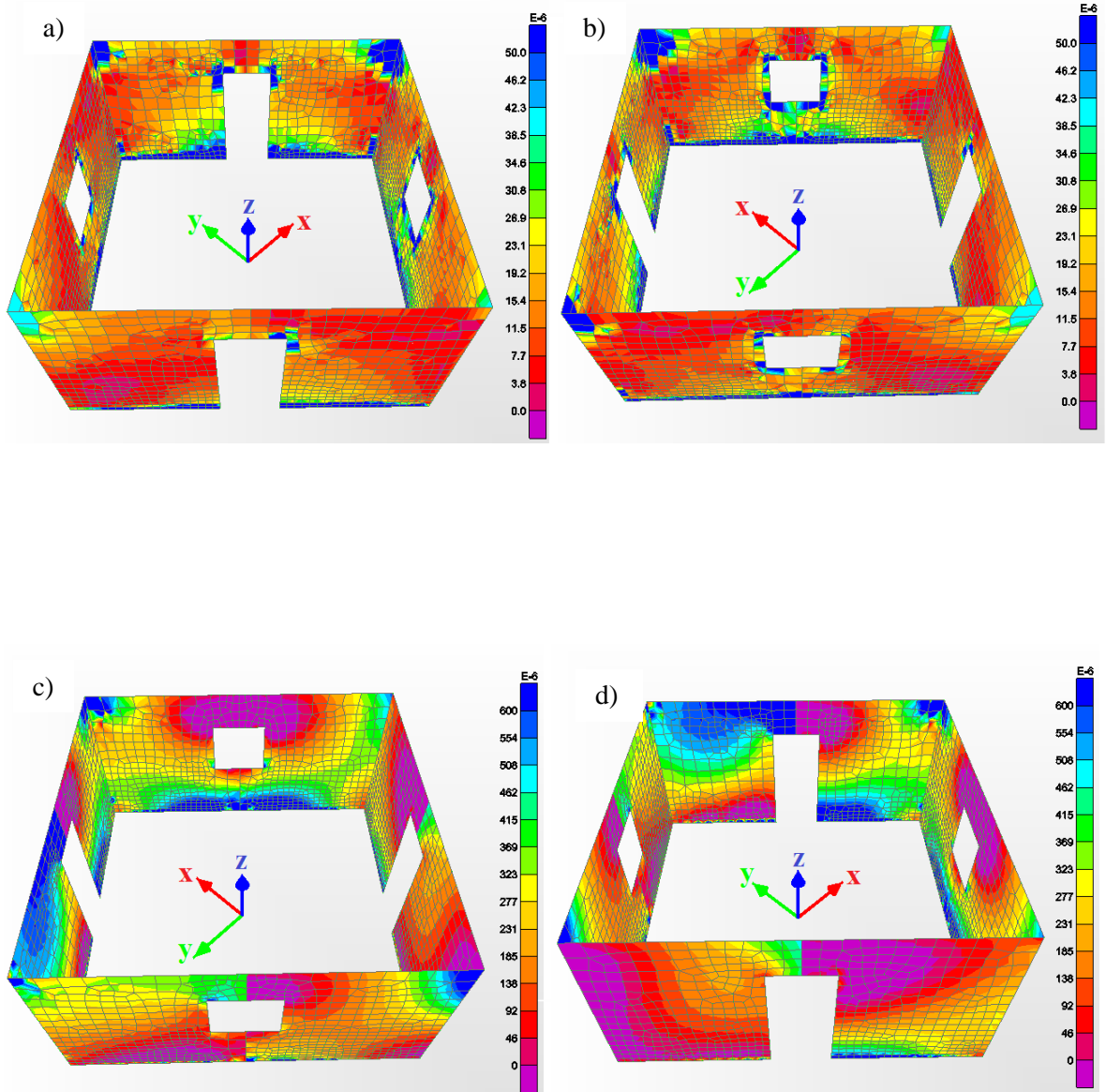


Figura 17. Distribución de esfuerzos principales en el modelo circular [MPa]. a) y b) muestra la distribución de esfuerzo cortante; c) y d) muestra la distribución de esfuerzo por flexión perpendicular al muro.

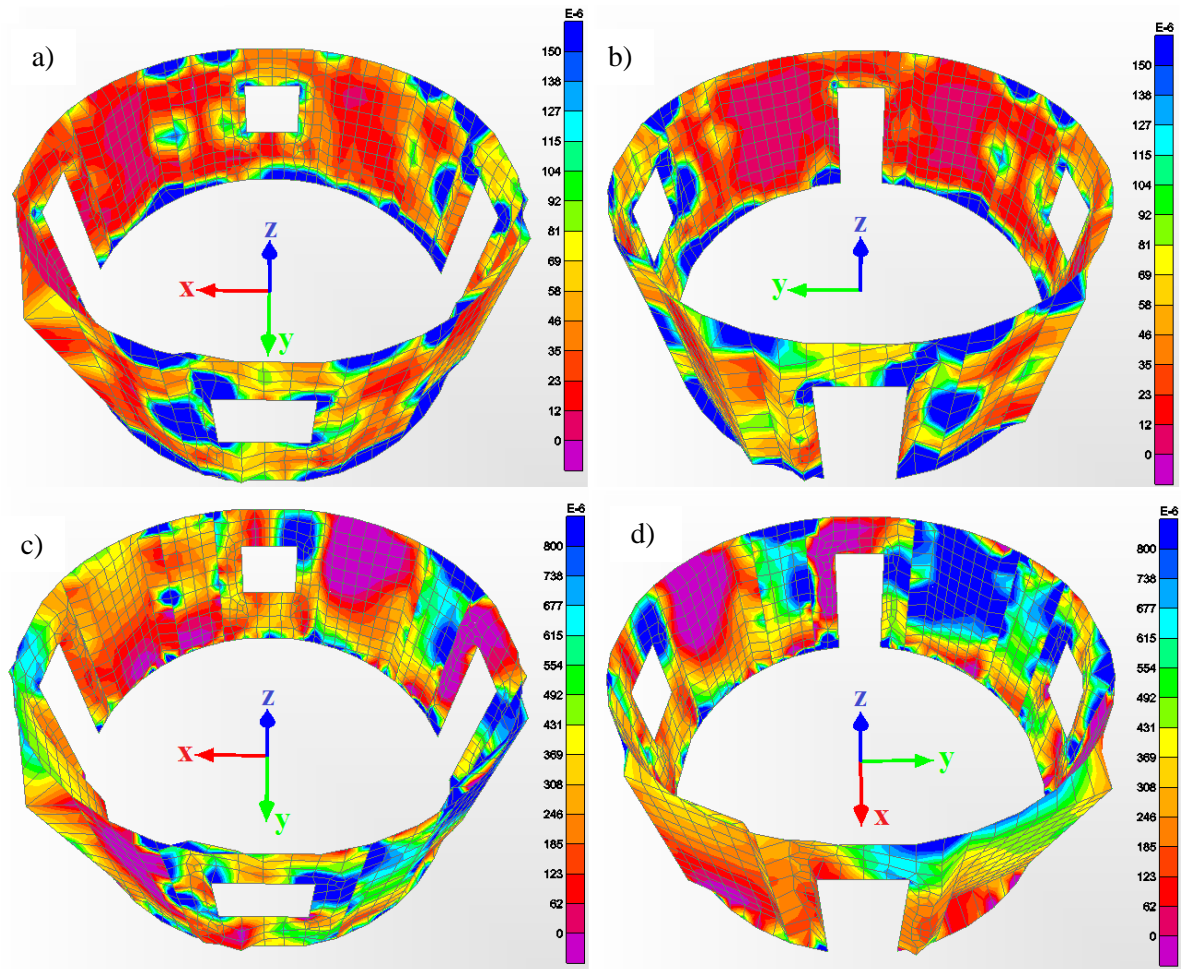
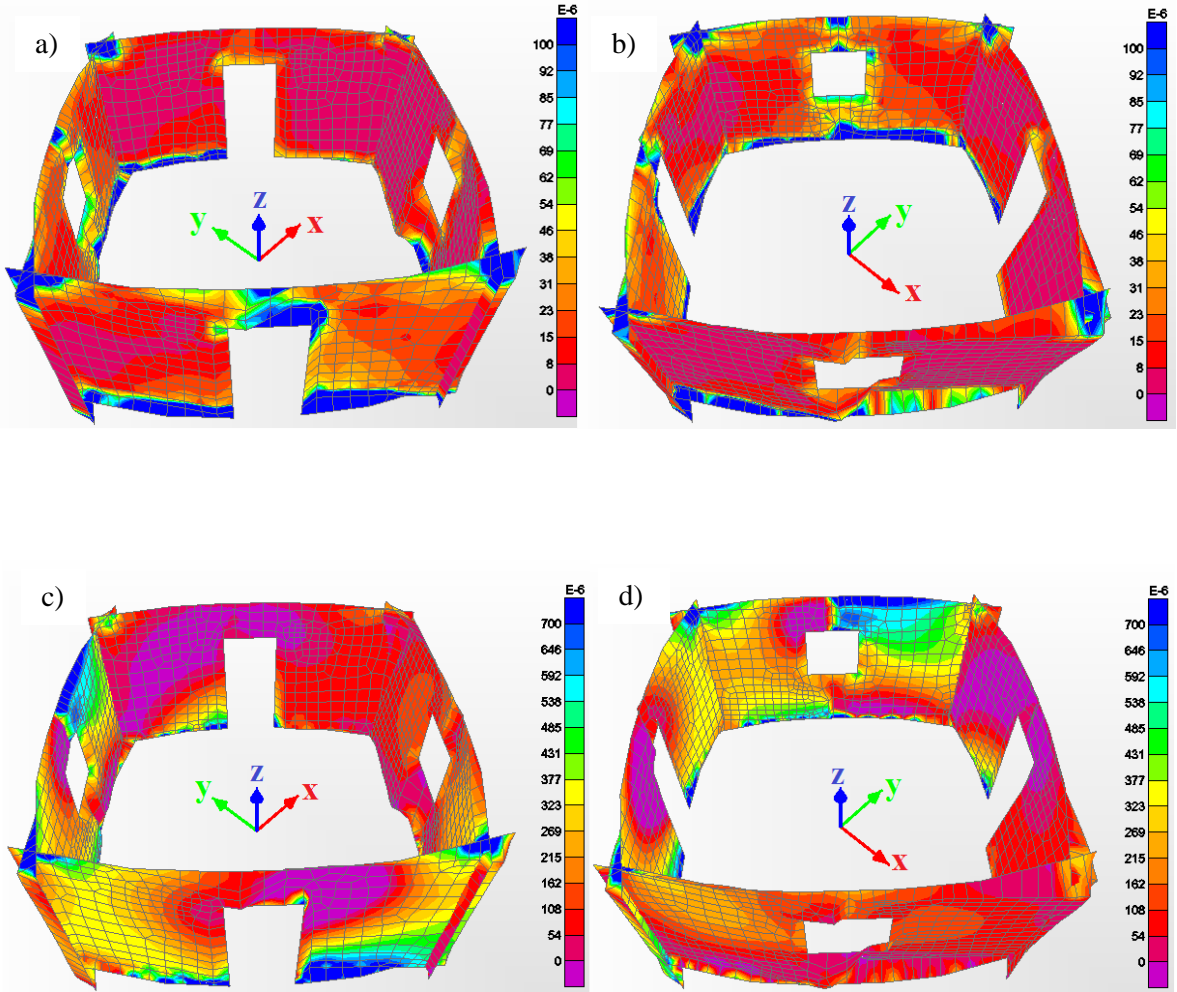


Tabla 7. Máximos esfuerzos de flexión y de cortante en el modelo y prototipo de adobe.

Modelo Escala	Cuadrado		Circular		Convexo	
	1:1	1:10	1:1	1:10	1:1	1:10
Periodo fundamental	0.42	0.042	0.28	0.027	0.38	0.038
Máximo Desplazamiento horizontal. [mm]	0.028	0.003	0.023	0.002	0,011	0.001
Esfuerzo máximo de corte [MPa].	0.003	0.0036	0.002	0.0015	0.002	0.0016
Esfuerzo máximo por flexión perpendicular al plano del muro [MPa].	0.006	0.007	0.008	0.0072	0.007	0.0065

Figura 18. Distribución de esfuerzos principales en el modelo convexo con contrafuertes en las esquinas [MPa]. a) y b) muestra la distribución de esfuerzo cortante; c) y d) muestra la distribución de esfuerzo por flexión perpendicular al muro.



4. CONCLUSIONES

Los modelos se construyeron a escala 1:10 para que se ajustaran al tamaño de la mesa vibratoria y el peso máximo que puede soportar. El orden de falla se presentó de manera similar al modelo analítico y de acuerdo a lo reportado en la bibliografía.

El diseño más desfavorable, fue el modelo cuadrado, seguido por el circular y finalmente el de muros convexos con contrafuertes en las esquinas. La forma de falla que se presentó fue similar en los tres modelos; primero aparecieron fisuras en la unión muro-cimiento y muro-dintel debido al esfuerzo cortante. La segunda forma de falla que se presentó se debe a la flexión perpendicular al plano del muro que ocasiono fisuras verticales en la parte superior de los muros que se prolongan diagonalmente hacia las esquinas de los vanos. En la base de los muros se observó física y analíticamente que los esfuerzos cortantes tienen mayor concentración.

Las formas de falla que se presentaron en los modelos son típicas en estructuras de adobe, según la información obtenida de otros autores. Se validó analíticamente los factores a escala 1:10 para un modelo dinámico omitiendo las fuerzas de gravedad.

Se concluye en esta investigación que la configuración de muros en planta es un detalle simple y un factor fundamental para retrasar el colapso de una estructura de adobe no reforzada de un piso ante la excitación en la base.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Minke, G. "Manual de Construcción en Tierra", segunda edición en castellano, septiembre de 2005, capítulo 2,3 y 4.
- [2] Blondet, M., García, G., Brzev, S. "Construcciones de Adobe Residentes a los Terremotos: Tutor"; Primera edición, abril de 2003, pág. 10.
- [3] Building Association of New Zealand. Engineering. "Design of Earth Buildings", NZS 4297, New Zealand, 1998.
- [4] Silveira, D., Varum, H., Costa, A. "Influence of the Testing Procedures in the Mechanical Characterization of Adobe Bricks", Civil Engineering Department; University of Aveiro; Santiago University Campus, Available online 25 December 2012.
- [5] Gomes, M., Lopes, M., de Brito, J. "Seismic Resistance of Earth Construction in Portugal", Department of Civil Engineering and Architecture, Technical University of Lisbon; Lisbon, Portugal, Available online 30 December 2010.
- [6] Johan, C., Carlos, M. "Modelo y caracterización dinámica de un servo actuador hidráulico", tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, escuela de ingeniería mecánica, Bucaramanga (Santander), Colombia; 2010.
- [7] Chávez, M., Meli, R. "Shaking Table Testing of a Typical Mexican Colonial Temple", master's thesis, Institute of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F, 2005.
- [8] Vides, F. "Metodología para Realizar Modelos de Concreto Reforzado a Escala Reducida", tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, escuela de ingeniería civil, Bucaramanga (Santander), Colombia, 2006.
- [9] Tolles, L., Krawinkler, H. "Seismic Studies on Small Scale Models on Adobe Houses", PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University, October 1990.
- [10] Flores, C., López, O. "Propuesta de Reforzamiento de Muros de Adobe Modificado con Confinamiento de Madera Rolliza", tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, escuela de ingeniería civil, Bucaramanga (Santander), Colombia, 2010.
- [11] SAP 2000. "Manual Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures", CSI Computers & Structures Inc., Version 14, Berkeley, California, USA, April 2009.
- [12] Minke, G. "Manual de Construcción para Viviendas Antisísmicas de Tierra", tercera edición en castellano, Abril 2005.

BIBLIOGRAFIA

- BLONDET, M., GARCÍA, G. y BRZEV, S. Construcciones de Adobe Residentes a los Terremotos: Tutor. 1ed. 2003 California, E.U.: Earthquake Engineering Research Institute, Abril de 2003, pág. 10.
- BUILDING ASSOCIATION OF NEW ZEALAN ENGINEERING. "Design of Earth Buildings", NZS 4297, New Zealand, 1998.
- CAMPO, E. Pasto: Arquitectura- Procesos Constructivos en Tierra. 1ed. Pasto: Fondo Mixto de Cultura de Nariño. Marzo de 2006.
- CHAVARRO PENUELA Johan Reyzel y MARINO LEON, Carlos Andrés. Modelo y caracterización dinámica de un servo actuador hidráulico. Trabajo de grado. Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería, 2010.
- CHÁVEZ, M. and MELI, R. "Shaking Table Testing of a Typical Mexican Colonial Temple", master's thesis, Institute of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F, 2005.
- CSI COMPUTERS & STRUCTURES INC. SAP 2000. Manual Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures. Versión 14. Berkeley, California: April 2009.
- FLORES AGUILAR, Camilo Andrés y LOPEZ HERNANDEZ, Olber Alexander. Propuesta de reforzamiento de muros de adobe modificado con confinamiento de madera rolliza. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil, 2010.
- GOMES, María Idalia, LOPES, Mario. and DE BRITO, Jorge. Seismic Resistance of Earth Construction in Portugal. Engineering Structures. [Online] ELSEVIER, 2013. 2011, N° 33 [cited 17 octubre 2013] p. 932-941 Available from: ELSEVIER: Science Direct.
- MINKE, Gernot. Manual de Construcción en Tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura tradicional. 2ed. Uruguay: Editorial Fin de Siglo, 2005. Capítulos 2,3 y 4.
- MINKE, Gernot. Manual de Construcción para Viviendas Antisísmicas de Tierra. 3ed. Abril 2005.
- SILVEIRA, Dora, VARUM, Humberto and COSTA, Anibal. Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks. Construction and Building Materials [online] 2013, N° 40 [cited: 12 Febrero 2014] p. 719-728. Available from: ELSEVIER: Science Direct
- TOLLES, E. Leroy and KRAWINKLER, Helmut. Seismic Studies on Small Scale Models on Adobe Houses, PhD Thesis. Stanford: Stanford University. Department of Civil and Environmental Engineering, 1990.
- VIDES DE LA HOZ, Félix Joaquin. Metodología para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida. Trabajo de grado. Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil, 2006.

ANEXOS



Anexo A. Mezcla húmeda de barro y tamo.



Anexo B. Gavera para moldear los ladrillos de adobe a escala 1:10.



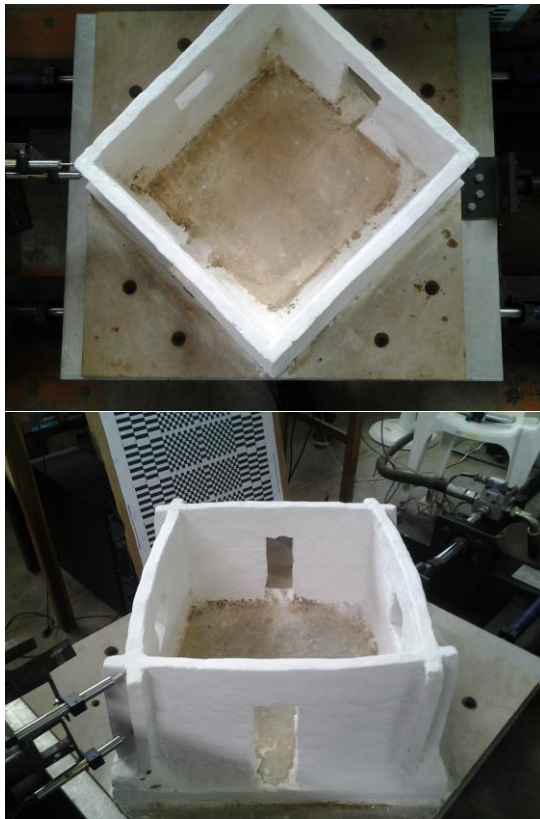
Anexo C. Refuerzo de la placa para la cimentación del modelo.



Anexo D. Construcción de los modelos cuadrado, circular y convexo con contrafuertes en las esquinas.



Anexo E. Dinteles de madera MDF en la parte superior de los vanos.



Anexo F. Instalación de los Instrumentos LVDT para medir desplazamientos.



Anexo G. Fallas presentadas en el modelo circular y de muros convexos con contrafuertes en las esquinas.