



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Materiales Poliméricos

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS TIPO PANEL EN  
APLICACIONES ESTRUCTURALES PARA ZONAS SÍSMICAS

**Tesis que presenta:**

YAMILI EUNICE CHÁVEZ CAUICH

En opción al título de

MAESTRA EN CIENCIAS  
(MATERIALES POLIMÉRICOS)

Mérida, Yucatán, mayo de 2021



### **RECONOCIMIENTO**

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Yamili Eunice Chávez Cauich** titulado **“Comportamiento mecánico de materiales compuestos tipo panel en aplicaciones estructurales para zonas sísmicas”**, fue realizado en la Unidad de Materiales, línea de investigación en Materiales Compuestos y Nanomateriales, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Emmanuel Alejandro Flores Johnson y codirección del Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza, y pertenece al Programa de Posgrado en Materiales Poliméricos de este Centro.

Atentamente



---

Dra. Cecilia Hernández Zepeda  
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 07 de mayo de 2021.

## DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: \_\_\_\_\_



Yamili Eunice Chávez Cauich

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada No. 903393 y por el apoyo brindado para la realización de este trabajo a través del proyecto No. 6718 de la Convocatoria de Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales 2017.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., en su Unidad de Materiales, por permitirme cursar la Maestría en Materiales Poliméricos y hacer uso de sus instalaciones, herramientas y equipo.

Al director de tesis, el Dr. Emmanuel Alejandro Flores Johnson por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, por su guía, comprensión, conocimientos y apoyo durante la realización de éste.

Al codirector de tesis, el Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza por las recomendaciones y consejos para la realización de este trabajo.

Al comité tutorial: el Dr. Pedro Jesús Herrera Franco y a la Dra. Celina Raquel Bernal por sus comentarios, observaciones y críticas para mejorar el trabajo.

Al M.C. Juan Francisco Koh Dzul por el apoyo brindado para la realización de las pruebas experimentales.

A mi madre, Bernarda Cauich Pech, y hermanos: Gezer, Jahaziel y Jorge por su comprensión y apoyo que me han brindado desde siempre.

A Manuel Mena Osorio por ser la persona que me motivó, ayudó, comprendió y amó en todo este tiempo.

A Dios, por sobre todas las cosas, porque sin Él nada sería posible.

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, a Dios, mi Creador y Padre Celestial, quien me ha mostrado de su amor incomparable e inmensurable, y me ha dado fortalezas para continuar sin desfallecer.

A mi mamita, Bernarda, cuyo amor incondicional me sirvió de apoyo, guía y motivación durante todo este tiempo.

A mis hermanos: Gezer, Jahaziel y Jorge, por su comprensión, consejos, cuidados y ayuda sin igual.

Al amor de mi vida, Manuel, por haber estado para ayudarme, motivarme y amarme en todo momento.

De manera especial y con todo mi amor, a mi papá, Jorge Chávez, que bastaron pocos años para que su enseñanza, ejemplo, guía y, sobre todo, su amor, me sirvieran siempre de motivación en todos los aspectos de mi vida.

## CONTENIDO

CONTENIDO .....	vi
LISTADO DE TABLAS .....	ix
LISTADO DE FIGURAS .....	x
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES .....	3
1.1 Sismicidad en México y su impacto .....	3
1.2 El adobe como material de construcción en zonas sísmicas .....	5
1.3 Uso de materiales y paneles aligerados para aplicaciones sísmicas .....	7
1.4 HIPÓTESIS .....	12
1.5 OBJETIVOS .....	12
1.5.1 Objetivo general .....	12
1.5.2 Objetivos específicos .....	12
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	13
2.1 Sismos .....	13
2.1.1 Escalas sísmicas .....	13
2.1.2 Aceleración sísmica .....	16
2.2 Materiales compuestos .....	17
2.3 Concreto espumado y concreto espumado con fibras de refuerzo .....	17
2.4 Paneles aligerados y estructuras tipo sándwich de concreto espumado .....	20
2.5 Simulación computacional por medio del método de los elementos finitos .....	22
2.5.1 Utilización del FEM para predecir comportamientos sísmicos .....	24
2.6 Pruebas experimentales usando una mesa sísmica de vibración .....	26
2.6.1 Mesa vibratoria Shake Table II .....	26
2.7 Parámetros de comparación para estructuras sismorresistentes .....	28

2.8	Modelo a escala .....	29
2.9	Justificación del trabajo .....	31
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		32
3.1	Diseño de un modelo de una vivienda típica.....	32
3.2	Elaboración de los muros U a escala reducida de concreto espumado y probetas para las pruebas mecánicas.....	33
3.2.1	Materiales utilizados .....	33
3.2.2	Preparación del concreto espumado para la obtención de los prototipos a escala y los especímenes para las pruebas mecánicas.....	34
3.3	Realización de las pruebas mecánicas.....	35
3.3.1	Pruebas de compresión del concreto espumado .....	36
3.3.2	Pruebas de tensión del concreto espumado .....	36
3.4	Instrumentación y prueba experimental en la mesa de vibración .....	37
3.5	Simulación numérica del prototipo a escala reducida del muro en U de concreto espumado usando FEM .....	41
3.6	Prueba experimental preliminar en la mesa de vibración para un muro a escala reducida elaborado con ladrillos de barro cocido.....	43
3.6.1	Escalamiento del modelo.....	43
3.6.2	Prueba del prototipo del muro en forma de U de adobe cocido en la mesa sísmica	46
CAPÍTULO 4: RESULTADOS .....		48
4.1	Pruebas de compresión.....	48
4.2	Pruebas de tensión.....	51
4.3	Prueba sísmica en la mesa de vibraciones.....	54
4.4	Prueba sísmica en la mesa de vibraciones del muro escalado de bloques de barro cocido	57
4.5	Simulación numérica del muro en U de concreto espumado. ....	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		66

Recomendaciones.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1 Viviendas afectadas por entidad federativa [6].	3
Tabla 2.1 Escala sismológica de Richter [8].	13
Tabla 2.2 Escala sismológica de Mercalli Modificada [42].	14
Tabla 2.3 Escala de Mercalli y su equivalente en aceleración sísmica [43].	16
Tabla 2.4 Aplicaciones del concreto espumado de acuerdo a su densidad [55].	19
Tabla 2.5 Especificaciones de la Shake Table II [85].	27
Tabla 2.6 Factores de escala geométricos típicos en la modelación de estructuras [92].	30
Tabla 3.1 Nomenclatura de los especímenes utilizados para la prueba.	35
Tabla 3.2 Peso de los muros y peso registrado para la prueba.	40
Tabla 4.1 Resultados de las pruebas de compresión con y sin fibra.	48
Tabla 4.2 Resultados de las pruebas de tensión con y sin fibra.	51
Tabla 4.3 Resultados de las pruebas sísmicas.	54
Tabla 4.4 Resultados de las pruebas de tensión con y sin fibra.	60

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Zonas con actividad sísmica en el estado de Oaxaca en el año 2017 [7].....	4
Figura 1.2 Regionalización sísmica de la República Mexicana [8]. .....	4
Figura 1.3 Daños en viviendas ocasionados por el sismo de Oaxaca en 2017 [11]. .....	6
Figura 1.4 Sistema estructural utilizando paneles sándwich con poliestireno como núcleo [36]. .....	9
Figura 1.5 Prueba de muros de adobe en forma de I sometidas a una carga lateral [39].	10
Figura 1.6 Comportamiento de un compuesto tipo sándwich: a) Compuesto con núcleo de concreto espumado sin refuerzo, b) Compuesto con núcleo de concreto espumado con refuerzo de fibras [40]. .....	10
Figura 1.8 Comportamiento de un compuesto tipo sándwich: a) Compuesto con núcleo de concreto espumado sin refuerzo, b) Compuesto con núcleo de concreto espumado con refuerzo de fibras de henequén [41]. .....	11
Figura 2.1 Pasos del método de elementos finitos (FEM) en Abaqus [77]. .....	24
Figura 2.2 Configuración de los muros en U: a) de los ensayos experimentales y b) las pruebas numéricas mediante simulaciones computacionales [78]. .....	25
Figura 2.3 Simulaciones numéricas mediante simulaciones computacionales FEM de muros en U de concreto espumado donde se observan concentraciones de esfuerzos [79]. .....	26
Figura 2.4 Componentes de la Shake Table II para su correcto funcionamiento [86]......	27
Figura 2.5 Modelo tridimensional utilizado en pruebas sísmicas en la Quanser Shake Table II [87]......	28
Figura 3.1 Dimensiones reales de la vivienda de referencia [94]. .....	32
Figura 3.2 Dimensiones del muro en forma de U: a) dimensiones reales de diseño; b) dimensiones a escala reducida. ....	33
Figura 3.3 Proceso de elaboración de los prototipos a escala y los especímenes para las pruebas mecánicas.....	35
Figura 3.4 Prueba de compresión en la máquina de pruebas universales. ....	36
Figura 3.5 Prueba de tensión en la máquina de pruebas universales. ....	37
Figura 3.6 Anclaje de muro a la base y pesas sobre el muro. ....	38
Figura 3.7 Instrumentación utilizada para las pruebas sísmicas.....	39
Figura 3.8 Gráfica del desplazamiento de la onda senoidal de 4 Hz y amplitud de 20 mm. ....	41

Figura 3.9 Mallado y configuración del modelo 3D utilizado en las simulaciones numéricas.....	42
Figura 3.10 Diseño del muro de adobe a escala real: a) vista frontal; b) vista en planta. .	43
Figura 3.11 Diseño del muro de adobe a escala reducida: a) vista frontal; b) vista en planta.....	44
Figura 3.12 Dimensiones del ladrillo real (a) y el ladrillo escalado (b).....	44
Figura 3.13 Distribución de ladrillos en el muro escalado. ....	45
Figura 3.14 Elaboración del prototipo de muro en U de adobe cocido. ....	45
Figura 3.15 Configuración de la prueba del muro de ladrillos en la mesa sísmica. ....	47
Figura 4.1 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de compresión de concreto espumado sin fibra para densidad de 900 kg/m <sup>3</sup> .....	49
Figura 4.2 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de compresión de concreto espumado con fibra para densidad de 900 kg/m <sup>3</sup> .....	49
Figura 4.3 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de compresión de concreto espumado sin fibra para densidad de 1200 kg/m <sup>3</sup> .....	50
Figura 4.4 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de compresión de concreto espumado con fibra para densidad de 1200 kg/m <sup>3</sup> .....	50
Figura 4.5 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de tensión de concreto espumado sin fibra para densidad de 900 kg/m <sup>3</sup> . ....	52
Figura 4.6 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de tensión de concreto espumado con fibra para densidad de 900 kg/m <sup>3</sup> . ....	52
Figura 4.7 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de tensión de concreto espumado sin fibra para densidad de 1200 kg/m <sup>3</sup> . ....	53
Figura 4.8 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de tensión de concreto espumado con fibra para densidad de 1200 kg/m <sup>3</sup> . ....	53
Figura 4.9 Imágenes de los videos de las pruebas sísmicas del muro con una densidad de 1200 kg/m <sup>3</sup> .....	55
Figura 4.10 Fallas observadas durante la prueba sísmica de la muestra MCF900 #2.....	55
Figura 4.11 Gráficas desplazamiento-tiempo registradas por la mesa sísmica y por el LVDT en el ala izquierda.....	56
Figura 4.12 Gráfica aceleración-tiempo registradas por el acelerómetro en el ala derecha.....	57
Figura 4.13 a) Aceleración y b) desplazamiento a escala del sismo El Centro realizado por la mesa sísmica. ....	58

Figura 4.14 a) Aceleración y b) desplazamiento que sufrió el prototipo a escala del muro de adobe cocido durante el sismo El Centro en la mesa sísmica.....	59
Figura 4.15 Muro de bloques de ladrillos de barro después de la prueba en mesa sísmica. ....	59
Figura 4.16 Visualización de la distribución de esfuerzos de Von Mises en el muro de concreto espumado fibrorreforzado de 900 kg/m <sup>3</sup> . Las flechas rojas indican zonas de concentración de esfuerzos. ....	61
Figura 4.17 Visualización de los desplazamientos en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m <sup>3</sup> a un tiempo t = 1.85 s.....	62
Figura 4.18 Visualización de la distribución de esfuerzos de Von Mises en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m <sup>3</sup> a un tiempo t = 1.85 s.....	63
Figura 4.19 Visualización de la deformación plástica (PEEQ) en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m <sup>3</sup> a un tiempo t = 1.85 s. ....	64
Figura 4.20 Visualización de la deformación plástica (PEEQ) en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m <sup>3</sup> a un tiempo t = 3 s. ....	64

## RESUMEN

Existen lugares dentro del territorio nacional tales como Oaxaca y Chiapas en los que, por la falta de recursos económicos, las viviendas se construyen con ladrillos de adobe sin elementos estructurales, de tal manera que los eventos naturales tales como los sismos pueden causar grandes daños. Esto puede derivar en pérdidas materiales y de vidas. Una forma de evitar daños en las viviendas durante un sismo es utilizar elementos estructurales de baja densidad para reducir el peso muerto y de esta forma reducir las fuerzas inerciales sobre la estructura. En este trabajo, basándose en el diseño de una casa tradicional de Oaxaca se realizó el escalamiento de un muro tipo U el cual se fabricó por medio de un panel prefabricado aligerado de concreto espumado fibrorreforzado para ser estudiado bajo cargas sísmicas senoidales. El muro escalado se colocó en una mesa de vibración sísmica y se le aplicaron cargas sísmicas, y se midieron los máximos desplazamientos y aceleraciones en el muro. Una parte importante de este trabajo fue la calibración y verificación del correcto funcionamiento de la mesa sísmica y los sensores de medición. Adicional a los muros tipos U, se fabricaron especímenes de concreto espumado de 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup> de densidad con fibrorrefuerzo de fibras de henequén y sin el fibrorrefuerzo, para obtener sus propiedades mecánicas (pruebas de compresión y tensión). Se realizaron simulaciones numéricas usando el método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés) para estudiar el comportamiento sísmico del muro tipo U utilizando una onda senoidal como carga sísmica y se analizaron el esfuerzo y la deformación de la estructura para densidades en el rango de 700 a 1200 kg/m<sup>3</sup> de densidad.

Las pruebas de compresión y tensión demostraron que las fibras incrementan la resistencia a la tensión del concreto espumado, lo cual se vio reflejado en las pruebas sísmicas ya que el fibrorrefuerzo mejoró el comportamiento mecánico de los muros al incrementar el tiempo de colapso y el tipo de grietas observadas durante la prueba en comparación con el muro sin fibrorrefuerzo. Las simulaciones mostraron concentraciones de esfuerzos en las esquinas de los muros lo cual se vio incrementado con el incremento de la densidad del material. Se puede concluir que un muro de concreto espumado fibrorreforzado de baja densidad podría ser una buena opción para sustituir ciertos elementos de construcción en viviendas en zonas sísmicas y los resultados aquí presentados pueden ser la base para estudios más profundos en este tipo de materiales compuestos aligerados.

## ABSTRACT

There are places in Mexico such as Oaxaca and Chiapas where, due to the lack of economic resources, the houses are built using adobe bricks without structural elements. For these reasons, natural events such as earthquakes can cause great damage, which can lead to economic losses and deaths. One way to avoid damage to homes during an earthquake is to use low-density structural elements to reduce the weight of the structure and in the way, to reduce inertial forces on the structure. In this work, based on the design of a traditional Oaxacan house, a scaled U-shaped wall was manufactured using lightweight fiber-reinforced foamed concrete, and its performance under cyclic seismic loads was studied. The scaled wall was placed on a seismic vibration table and its maximum displacement and accelerations were measured. An important part of this work was the calibration and verification of the proper functioning of the seismic table and measuring sensors. Foamed concrete specimens with and without henequen fiber-reinforcement and with a density of 900 and 1200 kg/m<sup>3</sup> were manufactured, and their mechanical compression and tension properties were measured. Numerical simulations using the Finite Element Method (FEM) were performed to investigate the behavior of the U-shaped wall under cyclic seismic loads and the stress and deformation of the structure, for densities in the range of 700 to 1200 kg/m<sup>3</sup>, were analyzed.

Compression and tension tests showed that the fibers increase the strength of the foamed concrete, which was observed in the seismic tests since the fiber reinforcement improved the mechanical behavior of the walls by increasing the time of collapse and the types of cracks observed during the seismic test, when compared to the walls without fiber reinforcement. The simulations showed stress concentration at the corners of the walls, which increased with the increase in density. It can be concluded that a fiber-reinforced foamed concrete wall could be a good option for replacing certain building elements in homes in seismic areas and the results presented here may be used for further studies on these types of lightweight composite materials.

## INTRODUCCIÓN

Las viviendas utilizadas o construidas por el hombre han sufrido avances tecnológicos a lo largo de la historia, pasando de las cavernas hasta llegar en la actualidad, a las construcciones modulares y prefabricadas. Así como los sistemas de vivienda han evolucionado, los materiales, utilizados para tal fin, también han tenido un avance tecnológico; sin embargo, aunque hoy en día se pueden ver edificios con materiales de alta tecnología, la construcción de las viviendas en su mayoría, en el México actual, continúan realizándose con los mismos procedimientos constructivos y los mismos materiales (a base de concreto y acero, y de mampostería en cualquiera de sus modalidades: confinada o reforzada, principalmente) [1].

La mampostería representa el tipo de construcción con mayor uso en nuestro país, debido a que ofrece la ventaja de ser económica y permite la autoconstrucción de las viviendas. El término mampostería ha de entenderse como la unión de piezas mediante un mortero aglutinante. En México, es muy común observar viviendas de mampostería reforzada, utilizando bloques de concreto hidráulico vibrocomprimido con huecos y sistemas de vigas y columnas reforzadas con acero; sin embargo, existen lugares dentro del territorio nacional tales como Oaxaca y Chiapas en los que, por falta de recursos económicos y de conocimientos, las viviendas se han construido con técnicas y materiales tradicionales como el barro vertido, el bajareque, la tierra apisonada y el adobe, siendo el adobe el material y el sistema constructivo de mampostería sin confinamiento que ha prevalecido hasta hoy día [2].

La construcción de adobe, si bien, presenta cualidades ecológicas y facilidad en su ejecución [3], es vulnerable a los efectos de fenómenos naturales tales como los terremotos. Ante movimientos telúricos, las construcciones de adobe, sufren daño estructural severo o llegan a colapsar, lo cual puede resultar en pérdidas humanas y materiales. Su deficiencia ante acciones sísmicas se debe al elevado peso de la estructura, a su baja resistencia y a su comportamiento frágil [4].

Es por ello que surge la necesidad de realizar el estudio de un material liviano que pueda ayudar a solventar los requerimientos de resistencia sísmica en una vivienda. El desarrollo de materiales compuestos livianos de concreto espumado fibrorreforzado podría ser la respuesta. Para avanzar en el conocimiento del uso de estos materiales y su aplicación en

zonas sísmicas, en este trabajo se estudiará el desempeño de un muro escalado en forma de U, elaborado con concreto espumado reforzado con fibras de henequén con una densidad de 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup>, en condiciones de cargas sísmicas aplicando movimientos oscilatorios mediante una mesa sísmica y realizando simulaciones computacionales usando el método de elementos finitos.

## CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES

### 1.1 Sismicidad en México y su impacto

De acuerdo al Sistema Sismológico Nacional (SSN), México se encuentra ubicado en el contexto de cinco placas tectónicas: Caribe, Pacífico, Norteamérica, Rivera y Cocos. Estas últimas dos placas se encuentran en subducción (se sumergen) debajo de la placa de Norteamérica. Rivera se sumerge bajo Jalisco y Colima, mientras que Cocos lo hace debajo de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Al sur de Chiapas y en Centroamérica, Cocos continua, pero ahora subduciendo debajo de la placa del Caribe [5].

El 7 de septiembre del 2017 un sismo de magnitud 8.2, con epicentro en Pijijiapan, Chiapas, azotó el sur del país resultando sumamente afectados los estados de Chiapas y Oaxaca. Ese mismo año, el 19 de septiembre, un sismo de magnitud 7.1 sacudió al centro del país con epicentro en los límites de Morelos y Puebla, y sus efectos se hicieron presentes en siete entidades: Ciudad de México, Estado de México, Guerrero, Puebla, Morelos, Tlaxcala y Veracruz [5].

La Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) [6] levantó un censo en donde se registraron 58 mil 366 viviendas con daños parciales o totales en Chiapas; mientras que en Oaxaca se reportaron 63 mil 335 casos de viviendas con daños.

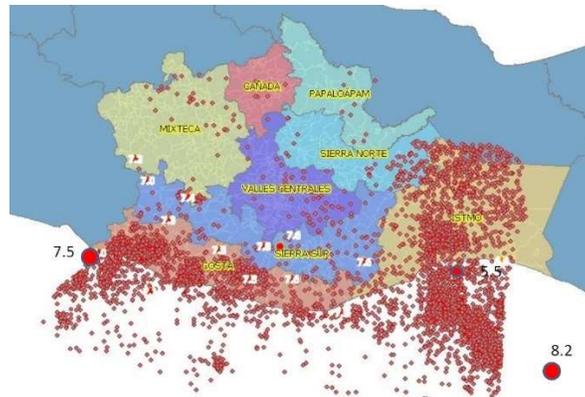
La Tabla 1.1 [6] muestra el número de viviendas dañadas en los estados con mayor afectación por los sismos de septiembre del 2017. Se puede observar que el Estado con el mayor número de daños fue Oaxaca.

*Tabla 1.1 Viviendas afectadas por entidad federativa [6].*

Entidad	Viviendas	
	Con daños parciales	Daño total
Estado de México	6,059	2,468
Ciudad de México	5,765	2,273
Morelos	15,352	1,323
Puebla	27,812	3,214
Oaxaca	63,336	21,823
Chiapas	59,397	18,058

Tlaxcala	34	0
Guerrero	2,976	1,451
Veracruz	nd	0

En la Figura 1.1 [7], se observa la ubicación de los sismos que se manifestaron en el estado de Oaxaca en el año 2017, incluyendo los sismos de septiembre, así mismo se observan los municipios con mayor incidencia sísmica.



*Figura 1.1 Zonas con actividad sísmica en el estado de Oaxaca en el año 2017 [7].*

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano [8] el país se encuentra dividido en 4 zonas sísmicas (Figura 1.2), siendo los estados de Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco con mayor sismicidad en la República Mexicana.



*Figura 1.2 Regionalización sísmica de la República Mexicana [8].*

Zona A: es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

Zonas B y C: son zonas intermedias, donde no se registran sismos tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.

Zona D: es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

## **1.2 El adobe como material de construcción en zonas sísmicas**

La construcción de viviendas en el sur y sureste mexicano en zonas rurales se sigue realizando con adobe. En un principio se realizaba por ser el único sistema estructural factible para la región; sin embargo, actualmente se continúa utilizando por la pobreza que impera en la región. El adobe se ha caracterizado como un material con nula capacidad a tensión y flexión, con una adherencia entre las piezas limitada por el mortero de pega (generalmente lodo con cal), y con una contracción por secado muy alta debida a la humedad propia del material (contiene aproximadamente 40% de arcilla) [9]. Estudios realizados por Vera y Miranda y analizados por González y colaboradores [10] reportaron la existencia de una gran dispersión en las propiedades mecánicas del material: su resistencia a la compresión ( $f_m$ ) varía de 0.18 MPa a 0.76 MPa, el módulo elástico ( $E_m$ ) varía de 76 MPa a 4943 MPa, y la resistencia a corte ( $G_m$ ) varía de 0.04 MPa a 0.09 MPa. El adobe es hidrófilo, tiende a absorber la humedad atmosférica, perdiendo su resistencia con el tiempo, ya que la humedad reblandece las piezas y hace que se pierda la adherencia entre los componentes del sistema. El sistema estructural en conjunto tiene dificultades de vinculación entre los elementos de cimentación y cubierta con los muros transversales y longitudinales [9].

La experiencia confirma la vulnerabilidad de este tipo de edificaciones ante cargas sísmicas y es posible observar fallas recurrentes que a continuación se enlistan:

- La mala calidad del material se muestra en las diferencias de resistencia mecánica entre las piezas.
- El agrietamiento en las esquinas que redunda en la separación de los muros en las direcciones ortogonales.
- La falta de elementos de confinamiento en puertas y ventanas, que produce fisuras en las esquinas de éstas.

- Colapso de elementos construidos en voladizo sin correcto anclaje.
- Agrietamiento diagonal por falta de elementos transversales que brinden ductilidad al sistema.
- Agrietamientos longitudinales debidos a la falta de adherencia entre las piezas y poca resistencia a tensión del material.
- Falta de conectividad en los sistemas de cubierta y cimentación respecto a los muros.
- Asentamientos diferenciales debidos al peso de la construcción y subdiseño de la cimentación.
- Humedades excesivas con pérdida de resistencia de muros por la falta de protección al intemperismo.
- Diseño inadecuado de diafragma de cubierta que genera empujes laterales a los muros longitudinales y presiones puntuales en la zona de apoyo de las armaduras o vigas de madera.
- Falta de mantenimiento y protección que redundan en una pérdida generalizada de resistencia a todo tipo de esfuerzos, incluso al peso propio.
- Errores de estructuración, carencia de proyecto estructural y nula supervisión técnica (debido a que más del 80% son autoconstrucciones).

Se ha observado que las estructuras de adobe y de mampostería sin refuerzo son más vulnerables ante las acciones sísmicas en comparación con otros tipos de estructuras como se puede observar en la Figura 1.3.



*Figura 1.3 Daños en viviendas ocasionados por el sismo de Oaxaca en 2017 [11].*

Se han realizado investigaciones con propuestas para incrementar la resistencia a los sismos de estos sistemas constructivos, así como investigaciones dirigidas a reparar el sistema después de haber estado sometido a acciones sísmicas. Entre ellos se encuentran

la elaboración de un mortero a base de barro, cal, paja y arena que incremente la adherencia entre las piezas de los muros y la resistencia a corte de los muros [12] y [4]; la colocación de vigas de madera de confinamiento para unir los muros con la cubierta para incrementar la integridad estructural [13] y [14]; la colocación de acero reforzado en juntas horizontales como tensores para mejorar la resistencia a tensión y ductilidad del muro [15]; la utilización de tensores longitudinales para unir los muros longitudinales con los muros transversales, así como las armaduras de la cubierta [16] y [17]; el encamisado de muros con malla electrosoldada de calibre 10 [12], [4], [13], [17], [18] y calibre 8 y ferrocemento [19]; modificación de techos sustituyendo las techumbres de teja de barro por materiales más ligeros como láminas galvanizadas o de fibrocemento corrugado [20] y [21]; la utilización de refuerzos con fibras de caña de azúcar [4] y [22], refuerzos de malla de acero soldadas [23], refuerzos de malla ortogonal de cuerdas de nylon [24] y otros tipos de refuerzos. Sin embargo, aun cuando se mejora la ductilidad de la estructura, las bajas propiedades de resistencia del adobe se hacen visibles.

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismos [25] el diseño sismorresistente de una estructura está ligada a varios factores, como, el tipo de suelo, la escala y características del sismo que pretende resistir, el material utilizado, la regularidad del diseño, la carga muerta de la estructura, entre otras. En un suelo blando, una estructura con una carga muerta muy grande puede traducirse en un comportamiento frágil al momento de someterse a la aceleración del suelo. Por esta razón, en este trabajo se pretende la sustitución del adobe, material común utilizado en la construcción de viviendas en Oaxaca, por paneles prefabricados de concreto espumado aligerado fibrorreforzado, lo cual se traduce en una carga muerta menor.

### **1.3 Uso de materiales y paneles aligerados para aplicaciones sísmicas**

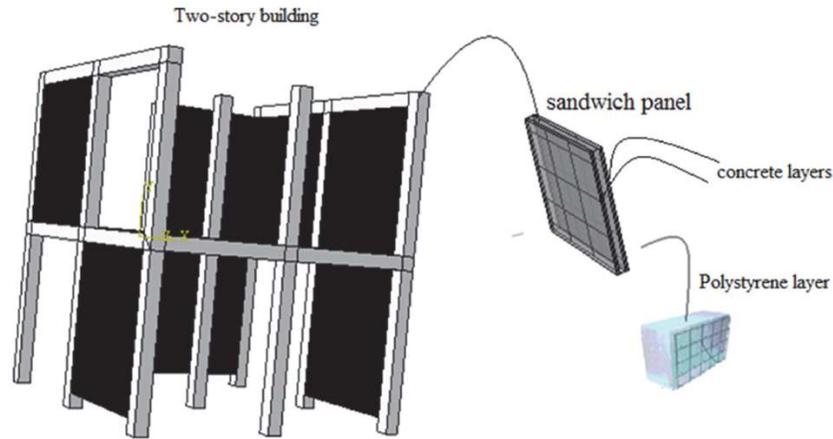
Como se mencionó anteriormente, debido a que el adobe y el sistema constructivo de mampostería no reforzada ofrecen ventajas ecológicas, se han desarrollado técnicas para reforzar dichas estructuras, tales como el confinamiento de muros [26], el reacondicionamiento de muros mediante materiales compuestos de polímero reforzado con fibras de carbono [27] y fibras de vidrio [28], reacondicionamiento con barras de acero [29], la reparación local de paredes con láminas de polímero reforzado con fibra de carbono [30], la reparación externa mediante mortero reforzado [31], entre otros. Sin embargo, muchas

de estas técnicas no son utilizadas comúnmente en zonas rurales, de bajos recursos económicos y/o remotas.

Una alternativa para mejorar el desempeño sísmico de las casas de mampostería no reforzada, en las regiones en las que la actividad sísmica es constante, es el uso de materiales de construcción livianos para reconstruir o reemplazar ciertas estructuras de la vivienda. Las acciones sísmicas inducen fuerzas de inercia que son proporcionales a la masa del edificio, y por lo tanto, pesos más bajos en las estructuras propiciarían un mejor comportamiento sísmico del edificio en las mismas condiciones estructurales [32]. Domínguez-Santos y colaboradores [32] estudiaron el comportamiento sísmico de estructuras de marcos rellenos con bloques de concreto estructural y bloques de concreto con aditivos de madera con una densidad de  $\sim 2250 \text{ kg/m}^3$ . Descubrieron que los marcos contruidos con bloques de concreto con aditivos de madera de menor densidad mostraban un mejor comportamiento sísmico en comparación con los contruidos con bloques de concreto estructural. Tomaževič y Gams [33] [34] estudiaron la respuesta sísmica de edificios de mampostería confinada de concreto celular en autoclave (AAC, por sus siglas en inglés) mediante pruebas en una mesa vibratoria unidireccional en una de escala de 1:4. Los bloques ligeros de AAC tenían una densidad de  $\sim 500 \text{ kg/m}^3$ . Descubrieron que los edificios aligerados prototipo exhibían un comportamiento sísmico adecuado cuando se construían como sistemas de mampostería confinados. Dunn y colaboradores [35] estudiaron el comportamiento sísmico de un muro de concreto celular ligero reforzado. Encontraron que el sistema de muros de paneles prefabricados de concreto celular ligero propuesto, probablemente proporcionaría una resistencia adecuada para edificios residenciales de poca altura en regiones de baja a moderada sismicidad.

También se han realizado investigaciones del comportamiento de paneles tipo sándwich con caras de concreto y con núcleo de poliestireno usados como muros y marcos. Jafari y Badarloo [36] demostraron, mediante simulaciones computacionales, que el uso de paneles tipo sándwich en lugar de ladrillos convencionales aumenta la resistencia del edificio contra una carga sísmica al tiempo que se disminuye el desplazamiento y la aceleración de la estructura, debido a que el peso de los muros disminuyó. El aumento del módulo de Young de la capa de concreto mejoró el comportamiento sísmico del panel. En su estudio, los componentes del sistema eran paneles sándwich compuestos por dos mallas de acero soldadas en los dos lados y una capa aislante de poliestireno en el medio, en la cual las dos capas de malla estaban unidas a través de alambres diagonales que construían una

mallas espaciales. Después de la instalación en el lugar de ejecución, estos paneles se rociaron con concreto en los lados y finalmente se produjo una estructura unida de concreto armado (Figura 1.4).



*Figura 1.4 Sistema estructural utilizando paneles sándwich con poliestireno como núcleo [36].*

Rezafair [37] estudió el comportamiento de una estructura de 3 niveles con paneles tipo sándwich de concreto y poliestireno y observó que, si bien se mejora la ductilidad de la estructura, la rigidez del sistema no permite un buen comportamiento en sismos de alta frecuencia. Palermo y colaboradores [38] realizaron pruebas en una mesa sísmica de paneles de concreto reforzado en un sistema estructural de 3 niveles en la escala real, y realizaron la validación de un modelo usando el método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés) en el que se concluyó que los paneles de concreto reforzado tienen mejor comportamiento sísmico. Blondet y colaboradores [39] realizaron un proyecto en el cual el objetivo fue encontrar materiales industriales adecuados que pudieran usarse para reforzar las casas de adobe, como alternativas a la malla de caña interna y las técnicas de refuerzo sísmico de malla de alambre externa. El proyecto consistió en la prueba de paredes de adobe en forma de I sometidas a una carga lateral cíclica (Figura 1.5). Se concluyó que el refuerzo interno puede ser efectivo para evitar el colapso de las estructuras de adobe.

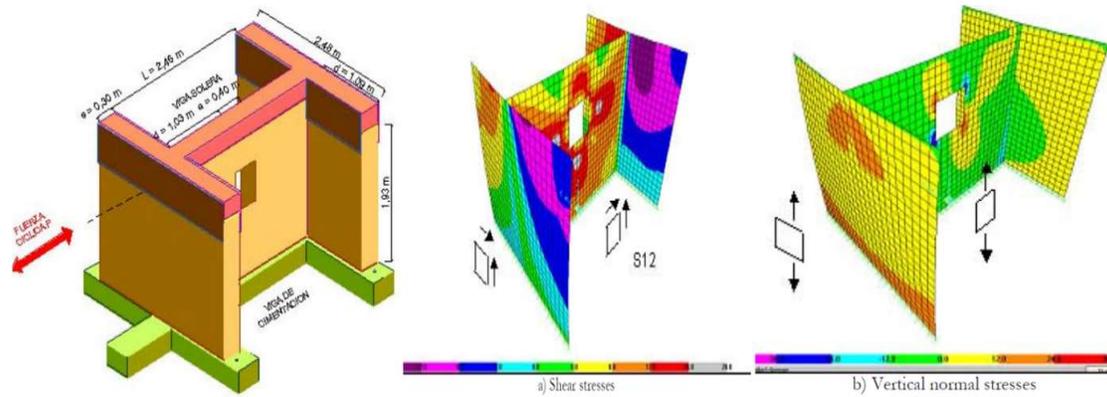


Figura 1.5 Prueba de muros de adobe en forma de I sometidas a una carga lateral [39].

Flores Johnson y Li [40] desarrollaron 2 tipos de paneles tipo sándwich de láminas de acero y núcleo de concreto espumado, uno sin refuerzo de fibra y otro reforzado con fibras de alcohol polivinilo. Reportaron que el refuerzo con fibra mejora la respuesta estructural de los paneles (Figura 1.6).

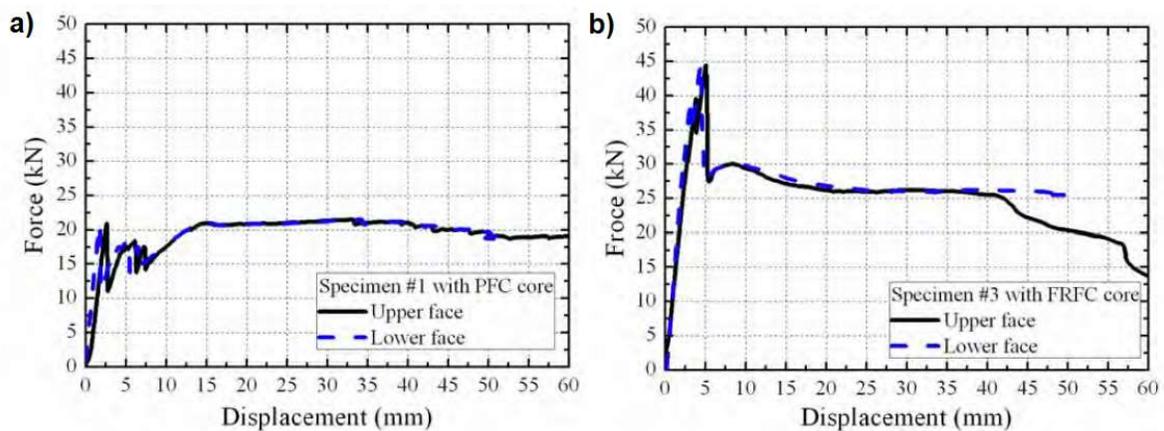


Figura 1.6 Comportamiento de un compuesto tipo sándwich: a) Compuesto con núcleo de concreto espumado sin refuerzo, b) Compuesto con núcleo de concreto espumado con refuerzo de fibras [40].

Castillo-Lara [41] desarrolló paneles tipo sándwich de láminas de acero y núcleo de concreto espumado utilizando como refuerzo una fibra de henequén corta (con tratamiento y sin tratamiento) y con porcentajes volumétricos de 0.5%, 1% y 1.5%. Se concluyó que la fibra de henequén (al 1%) y con tratamiento mejora el comportamiento mecánico del panel (Figura 1.7).

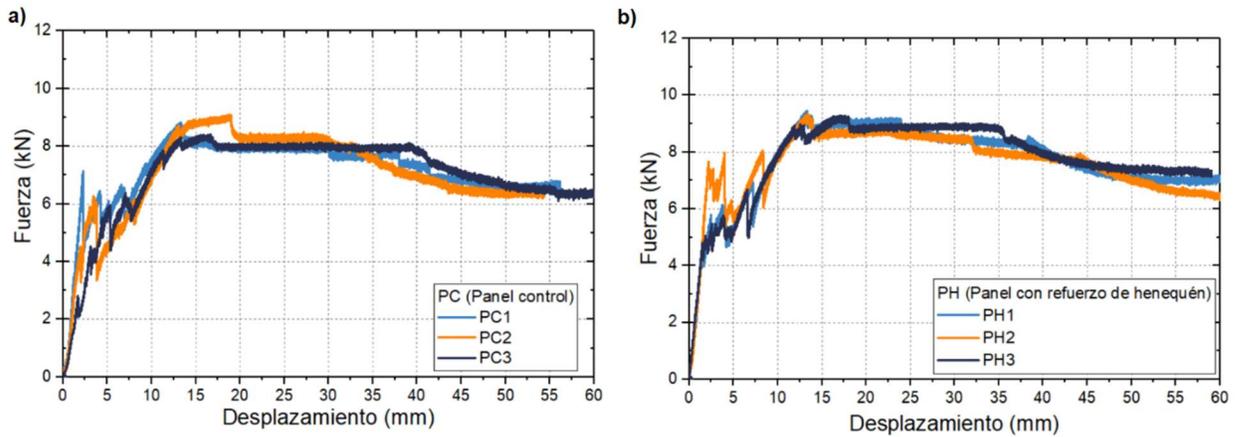


Figura 1.7 Comportamiento de un compuesto tipo sándwich: a) Compuesto con núcleo de concreto espumado sin refuerzo, b) Compuesto con núcleo de concreto espumado con refuerzo de fibras de henequén [41]. (La versión a color de esta figura se puede consultar en la versión electrónica de la referencia [41]).

Si bien, el uso de un material compuesto tipo sándwich mejora el comportamiento de una estructura ante cargas sísmicas, el uso de concreto espumado como núcleo de este material compuesto, debido a su ligereza, es un punto de partida para ser estudiado como sustituto de los muros de adobe, y con la incorporación de fibras en su matriz, mejorar el desempeño mecánico de un muro.

## **1.4 HIPÓTESIS**

El utilizar un material compuesto de concreto espumado fibrorreforzado con una densidad menor a  $1000 \text{ kg/cm}^3$  para reemplazar materiales más pesados en la construcción de estructuras en zonas sísmicas, reducirá el comportamiento frágil y permitirá un aumento en la tenacidad de la estructura durante una carga sísmica, esto debido a la ligereza del nuevo material y el efecto del fibrorrefuerzo.

## **1.5 OBJETIVOS**

### ***1.5.1 Objetivo general***

Estudiar y analizar el desempeño de un muro, en una edificación tipo vivienda, elaborado de concreto espumado con y sin refuerzo de fibras de henequén bajo cargas cíclicas.

### ***1.5.2 Objetivos específicos***

- Elaboración de un prototipo de un muro a escala con dimensiones y materiales similares a los de una vivienda típica de Oaxaca.
- Validación experimental del prototipo de un muro a escala en mesa sísmica.
- Diseño de un modelo estructural de un muro tipo U usando paneles prefabricados de concreto espumado fibrorreforzado con densidades de  $900$  y  $1200 \text{ kg/m}^3$ .
- Validación experimental del desempeño del prototipo del muro tipo U en la mesa sísmica.
- Caracterización mecánica a compresión y tensión del concreto espumado con y sin refuerzo de fibras de henequén con densidades de  $900$  y  $1200 \text{ kg/m}^3$ .
- Simulación computacional usando el método de los elementos finitos del desempeño del muro tipo U sometido a ondas sísmicas con movimientos de tipo oscilatorio variando la densidad del muro.

## CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO

### 2.1 Sismos

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano [8] los sismos, temblores y terremotos son términos usuales para referirse a los movimientos de la corteza terrestre, sin embargo, técnicamente hablando, el nombre de sismo es más utilizado (terremoto se refiere a sismos de grandes magnitudes). Los sismos se originan en el interior de la tierra y se propagan por ella en todas direcciones en forma de ondas.

Al generarse un sismo las ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones provocan el movimiento del suelo tanto en forma horizontal como vertical. En los lugares cercanos al epicentro, la componente vertical del movimiento es mayor que las horizontales y se dice que el movimiento es *trepidatorio*; por el otro lado, las ondas sísmicas al ir viajando se atenúan y al llegar a un suelo blando, como el de la ciudad de México, las componentes horizontales se amplifican y se dice que el movimiento es *oscilatorio*.

#### 2.1.1 Escalas sísmicas

Para cuantificar o medir el tamaño de un temblor se utilizan las escalas de *intensidad* y *magnitud*. La *escala de Intensidad o de Mercalli* está asociada a un lugar determinado y se asigna en función a los daños o efectos causados al hombre y a sus construcciones. La *escala de Magnitud o Richter* está relacionada con la energía que se libera durante un temblor y se obtiene en forma numérica a partir de los registros obtenidos con los sismógrafos. Esta escala es la manera más conocida y más ampliamente utilizada para clasificar los sismos. Estas escalas se encuentran descritas en las Tablas 2.1 [8] y 2.2 [42], respectivamente. Las Intensidades Mercalli Modificadas se representan con números romanos, existiendo una tabla común recogida desde el USGS y el SHOA.

Tabla 2.1 Escala sismológica de Richter [8].

Escala	Magnitud	Percepción
2.0-3.0	Micro Magnitud	No son perceptibles.
3.0-3.9	Menor Magnitud	Perceptibles con poco movimiento y sin daño.
4.0-4.9	Ligera Magnitud	Perceptibles con movimiento de objetos y rara vez produce daño.

5.0-5.9	Moderada Magnitud	Puede causar daños mayores en construcciones débiles o mal construidas.
6.0-6.9	Fuerte Magnitud	Pueden ser destructivos.
7.0-7.9	Mayor Magnitud	Pueden ser destructivos en zonas extensas.
8.0-9.9	Gran Magnitud	Catastróficos, provocando destrucción total en zonas cercanas al epicentro.
10 o +	Magnitud Épica	Jamás registrado, puede generar una extinción local.

*Tabla 2.2 Escala sismológica de Mercalli Modificada [42].*

<b>Escala</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Percepción</b>
Grado I.	Intensidad no perceptible	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
Grado II.	Débil Intensidad	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente las ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
Grado III.	Débil Intensidad	Se percibe en los interiores de los edificios y casas. Sin embargo, muchas personas no distinguen claramente que la naturaleza del fenómeno es sísmica, por su semejanza con la vibración producida por el paso de un vehículo liviano.
Grado IV.	Ligera Intensidad	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. Muchas personas lo notan en el interior de los edificios aún durante el día. En el exterior, la percepción no es tan general.
Grado V.	Moderada Intensidad	La mayoría de las personas lo percibe aún en el exterior. En los interiores, durante la noche, muchas despiertan. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y aún pueden derramarse.
Grado VI.	Intensidad fuerte	Lo perciben todas las personas. Se quiebran los vidrios de las ventanas. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se producen grietas en algunos estucos.
Grado VII.	Intensidad muy fuerte	Los objetos colgantes se estremecen. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal

		construidas o mal proyectadas. Sufren daños menores (grietas) las estructuras corrientes de albañilería bien construidas. Se dañan los muebles. Caen trozos de estucos, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos.
Grado VIII.	Severa Intensidad	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aún el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. En estructuras de albañilería bien proyectadas y construidas sólo se producen daños leves. Caen murallas de albañilería. Caen chimeneas en casa e industrias; caen igualmente monumentos, columnas, torres y estanques elevados. Las casas de madera se desplazan y aún se salen totalmente de sus bases. Aparecen grietas en el suelo húmedo, especialmente en la superficie de las pendientes escarpadas.
Grado IX.	Violenta Intensidad	Se produce pánico general. Las estructuras de albañilería mal proyectadas o mal construidas se destruyen. Las estructuras de albañilería bien construidas se dañan y a veces se derrumban totalmente. Las estructuras de albañilería bien proyectadas y bien construidas se dañan seriamente. Los cimientos se dañan. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Sufren daños considerables los depósitos de agua, gas, etc. Se quiebran las tuberías (cañerías) subterráneas. Aparecen grietas aún en suelos secos. En las regiones aluviales, pequeñas cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.
Grado X.	Extrema Intensidad	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. Se destruyen los cimientos de las estructuras de madera. Algunas estructuras de madera bien construidas, incluso puentes, se destruyen. Se producen daños en represas, diques y malecones. Se producen grandes desplazamientos del terreno en los taludes.

Grado XI.	Extrema Intensidad.	Muy pocas estructuras de albañilerías quedan en pie. Las tuberías (cañerías subterráneas) quedan totalmente fuera de servicio
Grado XII.	Extrema Intensidad	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

Ambas escalas ayudan a determinar el grado de afectación que produciría un sismo de acuerdo a su magnitud o intensidad y con ello establecer un límite que puede soportar un diseño estructural durante un sismo.

### **2.1.2 Aceleración sísmica**

Para conocer la intensidad con la que se presentan las ondas sísmicas se utiliza el parámetro de aceleración sísmica. La aceleración relaciona los cambios de la velocidad con el tiempo en el que se producen, es decir, mide qué tan rápidos son los cambios de velocidad:

- Una aceleración grande significa que la velocidad cambia rápidamente.
- Una aceleración pequeña significa que la velocidad cambia lentamente.
- Una aceleración cero significa que la velocidad no cambia.

La aceleración dice cómo cambia la velocidad y no cómo es la velocidad. Por lo tanto, un objeto en movimiento puede tener una velocidad grande y una aceleración pequeña (o cero) y viceversa.

La aceleración sísmica es el parámetro que se utiliza para la medición de sismos, es decir, consiste en la medición de las aceleraciones que sufre la superficie del suelo. Esta escala no mide la energía total liberada durante el sismo, por lo que no es una escala de magnitud, sino que es una escala de intensidad. En la Tabla 2.3 [43] se puede observar la equivalencia entre la escala de Mercalli y la aceleración sísmica.

*Tabla 2.3 Escala de Mercalli y su equivalente en aceleración sísmica [43].*

<b>Escala de Mercalli</b>	<b>Aceleración sísmica (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Percepción del temblor</b>	<b>Potencial de daño</b>
I	< 0.0017	No apreciable	Ninguno

II-III	0.0017 – 0.014	Muy leve	Ninguno
IV	0.014 – 0.039	Leve	Ninguno
V	0.039 – 0.092	Moderado	Muy leve
VI	0.092 – 0.18	Fuerte	Leve
VII	0.18 – 0.34	Muy fuerte	Moderado
VIII	0.34 – 0.65	Severo	Moderado a fuerte
IX	0.65 – 1.24	Violento	Fuerte
Mayor a X	> 1.24	Extremo	Muy fuerte

## 2.2 Materiales compuestos

Un material compuesto es aquel formado por dos o más materiales distintos sin que se produzca una reacción química entre ellos. En todo material compuesto se distinguen dos componentes: (a) la matriz y (b) el refuerzo [44]:

- a) La matriz es el componente que se presenta en fase continua, actuando como ligante. Los materiales que pueden cumplir este papel son principalmente metales, cerámicos o polímeros.
- b) El refuerzo, en fase discontinua, es el elemento resistente. En función de la forma que posea el refuerzo, el material compuesto puede ser:
  - Compuesto reforzado por partículas
  - Compuesto reforzado con fibras
  - Compuesto estructural

Un material compuesto estructural está formado tanto por materiales compuestos como por materiales homogéneos y sus propiedades no sólo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los elementos estructurales. Los compuestos estructurales se clasifican en: compuestos laminares, estructuras tipo sándwich y estructuras no-laminares [45].

## 2.3 Concreto espumado y concreto espumado con fibras de refuerzo

De acuerdo con el estándar ACI 523.3R-93 [46], el concreto celular se define como un producto ligero a base de cemento Portland, cemento con arena sílica, cemento puzolánico, pastas de sílica o pastas que contienen una mezcla de estos ingredientes. El concreto celular tiene una estructura celular, lograda mediante químicos formadores de gas o

agentes de espuma. El concreto espumado es un tipo de concreto celular y es un material liviano que contiene aire estable o celdas de aire uniformemente distribuidas a través de la mezcla en un volumen mayor del 20%. Las celdas de aire se añaden a la mezcla como espuma estable preformada o a través de un aditivo dentro de la mezcla. [47]. La presencia de burbujas de aire en el concreto espumado le añade características únicas como absorción acústica, bajo peso propio, resistencia al fuego, aislamiento térmico, alta porosidad y fluidez [48] [49]. Con la correcta dosificación de la espuma, la densidad del concreto puede variar entre  $400 \text{ kg/m}^3$  y  $1600 \text{ kg/m}^3$  [47].

El concreto espumado se puede clasificar, según su forma de preparación, en el método de pre-espumado o en el método de mezclado de espuma. El método de pre-espumado consiste en la elaboración por separado de la mezcla líquida de concreto (pasta de cemento o mortero) y de una solución acuosa preformada de forma estable (agente espumante con agua) para su posterior mezcla [50]; en este proceso de mezcla, el mortero de cemento se acumula alrededor de las burbujas de espuma y, cuando la espuma se comienza a degenerar, el mortero ya tiene la fuerza suficiente para mantener su forma alrededor de los huecos. El método de mezclado de espuma consiste en la combinación directa del agente espumante y todos los elementos para la formación del concreto; durante el proceso de mezclado se va formando la estructura celular del concreto. Es importante destacar que, para la preparación del concreto espumado, se recomienda utilizar la técnica de la pre-espuma, puesto que se requieren menores cantidades de agente espumante, se tiene una mejor relación entre la cantidad de agente espumante utilizado y el contenido de aire en la mezcla y se puede obtener tamaños de celda más pequeños [47].

El concreto espumado es un material ligero, de bajo costo y fácil de fabricar, con excelentes características como aislamiento térmico, aislamiento acústico, resistencia al fuego, resistencia a la corrosión y absorción de impactos [51] [52]. Sin embargo, la resistencia a la compresión del concreto espumado varía de acuerdo con su densidad. Para el concreto espumado con densidades secas entre  $500$  y  $1000 \text{ kg/m}^3$ , la resistencia a la compresión aumenta al disminuir los diámetros de las celdas, los cuales se hacen más pequeños a medida que aumenta la densidad y disminuye la cantidad de espuma; debido a esto, la cantidad de espuma agregada a la mezcla controla la resistencia a la compresión. Para densidades mayores a  $1000 \text{ kg/m}^3$ , es la composición y las proporciones del mortero lo que determina la resistencia a la compresión, debido a que, al haber menos cantidad de espuma, las celdas de aire se encuentran más separadas como para influir en la resistencia

a la compresión [53]. De acuerdo con Othuman Mydin [54], la densidad del concreto espumado determina las diferentes aplicaciones. En la Tabla 2.4 se presenta un resumen de las aplicaciones del concreto espumado realizado por Mohd y Mohammed [55]. El concreto espumado podría ser usado como material de construcción debido a su baja densidad [48].

*Tabla 2.4 Aplicaciones del concreto espumado de acuerdo a su densidad [55].*

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Aplicación
300-600	Reemplazo de suelo existente, estabilización de suelo, cimentación de balsa.
500-600	Estabilizar una rehabilitación geotécnica redundante y asentamiento de suelos. Construcción vial.
600-800	Ampliamente utilizado en el relleno de huecos, como alternativa de relleno granular. Algunas de estas aplicaciones incluyen el llenado de viejas tuberías de alcantarillado, pozos, sótanos y subterráneos.
800-900	Principalmente en la producción de bloques y otros elementos de construcción que no soportan carga, como barandillas de balcones, mamparas, parapetos, etc.
1100-1400	Prefabricación y paredes empotradas ya sea con o sin carga y soleras de piso.
1100-1500	Aplicaciones de vivienda.
1600-1800	Recomendado para losas y otros elementos de construcción de carga donde se requiere mayor resistencia.

El uso de fibras en materiales a base de cemento fue inicialmente, para reducir el agrietamiento por contracción plástica del concreto. El concreto con fibras es apropiado para superficies grandes que tiendan a fracturarse precisamente por su longitud como por ejemplo muros, losas, pavimentos y pisos industriales. La adición de fibras de diversos tipos al concreto espumado, puede mejorar las propiedades mecánicas en el estado plástico al controlar el agrietamiento por contracción plástica [56]. Las fibras que pueden añadirse como refuerzo en un material compuesto son tanto las fibras sintéticas como las fibras naturales que permiten un aumento en la resistencia a la tensión y en la ductilidad del material [57]. Las investigaciones hechas por Zollo y Hays [58] indican que la capacidad de

refuerzo de la fibra transforma el comportamiento elastoplástico quebradizo de frágil a dúctil en el concreto espumado.

Se han realizado estudios del uso de fibras sintéticas como refuerzo del concreto espumado y se ha observado que éstas mejoran la ductilidad [59], así como la resistencia a la compresión y a la tensión [40]. Las fibras también mejoran el desempeño a flexión e incrementan los valores del módulo elástico [47]. Atoyebi y colaboradores [60] realizaron un estudio evaluando la resistencia a la tensión del concreto espumado reforzado con fibras de acero de neumáticos de desecho a diferentes proporciones, y encontraron que a proporciones muy altas la resistencia a la tensión disminuye debido a que las fibras provocan irregularidades en el concreto. Ellos concluyeron que el refuerzo debe ser en la proporción adecuada para mejorar la tensión del concreto espumado.

Una alternativa ecológica es la utilización de fibras naturales que permitan la sustitución de las fibras sintéticas o metálicas [61]. Othuman y colaboradores [62] investigaron el comportamiento del concreto espumado reforzado con fibras de coco, y encontraron que estas aumentaron la tenacidad del material mostrando un menor número de desarrollo de grietas y grietas menos anchas; se encontró que las fibras de coco ayudaron a mejorar el comportamiento bajo cargas estáticas de compresión, carga lateral, flexión e impacto y se determinó que su capacidad de deformación está en relación a la longitud y porcentaje de la fibra utilizada [63]. En México, las fibras naturales más utilizadas son las fibras de henequén que se producen en Yucatán las cuales son muy similares en su composición química y en sus propiedades mecánicas a las fibras de sisal [41]. Frazao y colaboradores [64] determinaron que las fibras de sisal mejoran aumentan la resistencia a tensión y flexión de las caras de materiales compuestos tipo sándwich. Castillo [41] utilizó fibras de henequén en concreto espumado y encontró que con el 1% de volumen de fibra se mejoró el desempeño en compresión y tensión.

#### **2.4 Paneles aligerados y estructuras tipo sándwich de concreto espumado**

En las últimas décadas se ha hecho más frecuente el uso de paneles aligerados de concreto espumado para elementos constructivos prefabricados en construcciones modulares debido a la reducción en tiempo, la mano de obra en el sitio y al alto control de calidad [65], así como al aumento de la relación resistencia / peso alcanzado [66]. El número de investigaciones en relación a las propiedades mecánicas de estos materiales ha aumentado para lograr un diseño seguro de sus aplicaciones en la industria de la construcción [67].

De acuerdo con Crisafulli [68] los paneles que están ligeramente reforzados pueden proporcionar suficiente resistencia a la fuerza lateral en edificios de poca altura. La inspección después de terremotos severos ha proporcionado suficiente evidencia para demostrar que los edificios de paneles prefabricados, que han sido diseñados para resistir los terremotos, experimentan un mejor comportamiento ante cargas sísmicas en comparación con los edificios de ladrillos los cuales sufren graves daños; en los edificios con paneles generalmente solo las juntas entre los paneles desarrollan grietas. Varios modelos en la escala real de edificios con paneles, probados bajo cargas sísmicas simuladas, han confirmado estos hallazgos [69].

Dunn [70] realizó el estudio de un sistema de construcción mediante muros de paneles aligerados como un sustituto de la construcción de mampostería de carga no reforzada en edificios residenciales de baja altura, realizando pruebas físicas y simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos. Se concluyó que los muros de concreto celular ligero reforzado generan una respuesta dúctil y predecible. Xu y colaboradores [71] realizaron el estudio del rendimiento sísmico de muros de corte compuestos por caras de acero conformado en frío y núcleo de concreto espumado de alta resistencia. Ellos encontraron que el núcleo de concreto espumado de alta resistencia cambió el modo de falla frágil a dúctil, aumentando la capacidad de disipación de la energía y al aumentar la densidad se encontró un mejor comportamiento.

Othuman y Wang [72] investigaron el desempeño a compresión de materiales compuestos tipo sándwich con núcleo de concreto espumado y láminas de acero. El uso en conjunto de estos materiales permitió que el panel resistiera una alta proporción de su carga máxima a deformaciones crecientes. Además, llegaron a la conclusión de que este material puede ser utilizado en construcciones pequeñas. Othuman [73] encontró que el núcleo de concreto espumado pudo proporcionar suficiente soporte para evitar que la lámina de acero se doble hacia adentro debido a que la falla del muro compuesto fue provocada por el pandeo local hacia afuera de las láminas de acero. En la investigación de Flores-Johnson y Li [40] se desarrollaron dos tipos de paneles tipo sándwich con caras de láminas de acero y núcleo de concreto espumado, uno sin refuerzo de fibra y otro reforzado con fibras de polivinil alcohol. Ellos reportaron que el refuerzo con fibra aumenta la capacidad máxima de carga de los paneles en casi el doble antes de la falla del compuesto. Fernando y colaboradores investigaron acerca del comportamiento mecánico de paneles tipo sándwich de caras de láminas de fibrocemento y núcleo de concreto espumado con un 50% de poliestireno

expandido, y encontraron que estos presentaron un buen comportamiento a compresión y a flexión. Se destacó que el concreto espumado por sí solo tendría suficiente resistencia a la compresión.

## **2.5 Simulación computacional por medio del método de los elementos finitos**

La caracterización experimental de los materiales resulta muchas veces costosa, puesto que se tienen que ensayar varias muestras. Eso implica una mayor utilización de recursos (materiales, equipo de pruebas, personal operativo, tiempo), y por ello, es de gran utilidad el uso de las nuevas tecnologías computacionales que permiten implementar procesos de simulación para poder realizar estimaciones del comportamiento del material bajo ciertas circunstancias, evitando así la realización de numerosos ensayos y permitiendo el ahorro en recursos.

El análisis por el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) es un método para predecir cómo reaccionará un material o componente ante las fuerzas, la vibración, el calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real. El análisis por el método de elementos finitos muestra si un material se romperá, desgastará o funcionará como se espera. En este método, se descompone un objeto real en un gran número (cientos o incluso miles) de elementos finitos. Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento. Luego, una computadora suma todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento del objeto simulado. El análisis FEM predice el comportamiento de los productos afectados por una variedad de efectos físicos, entre los que se incluyen [74]:

- Esfuerzo mecánico.
- Vibración mecánica.
- Fatiga.
- Movimiento.
- Entre otros.

El principal concepto del FEM es la división de un medio continuo en un número finito de elementos cuyo comportamiento queda determinado atribuyendo una serie de parámetros a un cierto número de puntos significativos, denominados nodos. Dichos puntos se sitúan en los puntos de conexión de los elementos colindantes. Las distintas variables (esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, etc.) se resuelven de forma aproximada. La solución de

las variables para el resto de los puntos se obtiene por interpolación de los resultados en los nodos mediante funciones de forma o interpolación. La principal ventaja de este método es que transforma un problema en ecuaciones diferenciales de gran complejidad analítica en un problema matricial que proporciona resultados para los nodos y posteriormente interpolando se obtienen valores aproximados para el resto del dominio [75]. El objetivo del procedimiento es transformar las ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones lineales [76]. En general este proceso puede dividirse en tres etapas [75]:

1. Pre-proceso: En el que se genera/define la geometría, las propiedades de los materiales son asignados a dichas geometrías, se especifican interacciones entre las geometrías, las cargas, los materiales y se establecen las condiciones de frontera para generar un mallado con los nodos a analizar.

2. Cálculo: Se genera un sistema de ecuaciones, cuya complejidad es inversamente proporcional al tamaño de la malla a partir de los datos establecidos en el pre-proceso. Dicho sistema se resuelve mediante algoritmos de resolución primaria (que se obtiene resolviendo los valores de grados de libertad nodal como desplazamientos y rotaciones) para posteriormente obtener resultados derivados, como esfuerzos y deformaciones.

3. Post-proceso: Haciendo uso de las funciones de forma se extiende la solución nodal del cálculo a los elementos. Una vez acabado este proceso, mediante el uso de las interfaces gráficas los resultados pueden visualizarse y manipularse

En la Figura 2.1 [77] se muestra a manera de resumen las etapas y los pasos que se realizan en el FEM en Abaqus.

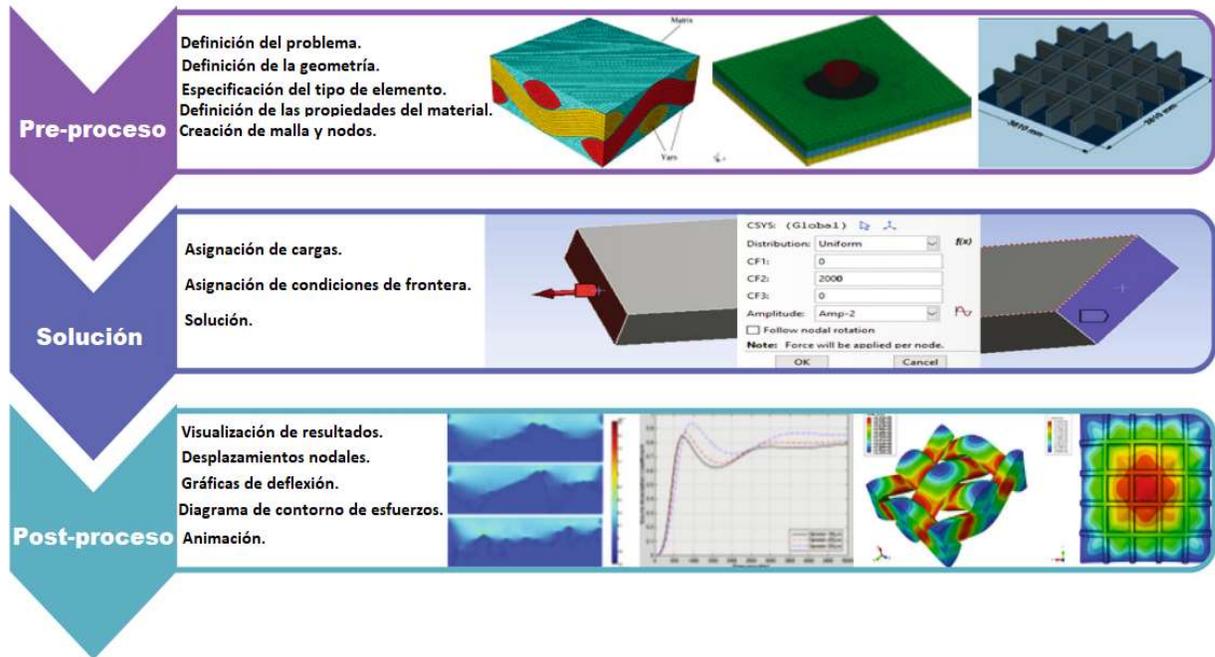


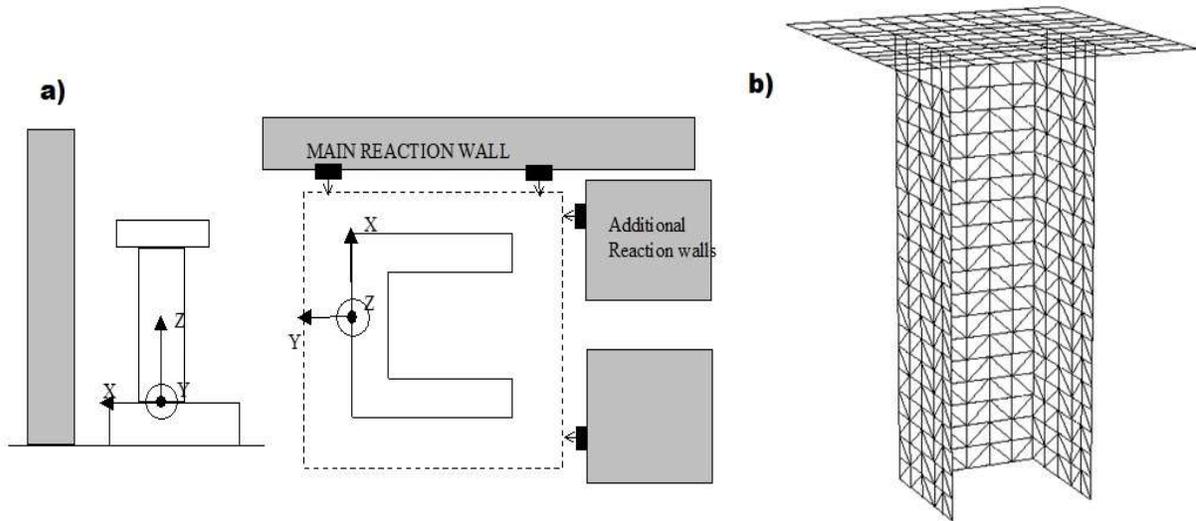
Figura 2.1 Pasos del método de elementos finitos (FEM) en Abaqus [77].

Abaqus es un programa de simulación basado en el método de los elementos finitos, que puede resolver problemas que incluyen análisis lineales y no lineales. En su análisis existen dos enfoques de solución: para resolver problemas cuasi-estáticos lineales con un enfoque implícito (Abaqus/Standard) y el enfoque explícito (Abaqus/Explicit) que se usa para resolver problemas dinámicos no lineales [41].

### 2.5.1 Utilización del FEM para predecir comportamientos sísmicos

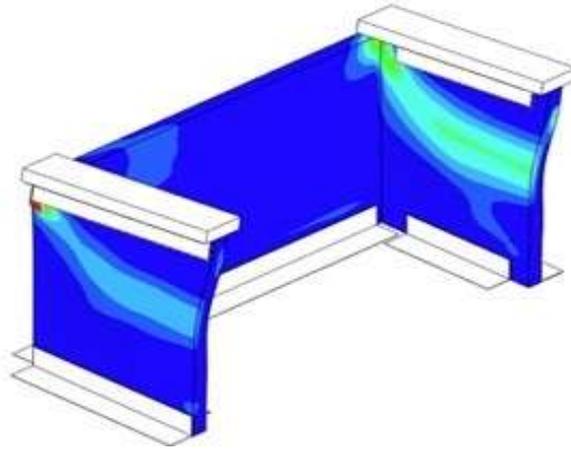
Ile y Reynouard [78] realizaron una investigación experimental y numérica sobre el comportamiento de muros en forma de U hechos de concreto reforzado a escala real en flexión y cortante, y sometidos a cargas cíclicas uniaxiales y biaxiales laterales (Figura 2.2). Para simular el comportamiento de este espécimen se utilizó una formulación de elementos finitos de capa delgada multicapa 3D, que incorpora un modelo de concreto con capacidad de “smeared cracking” que representa el comportamiento frágil discontinuo en el concreto. La comparación entre resultados numéricos y experimentales mostró que el modelo fue capaz de predecir con una precisión aceptable las características más importantes de la respuesta local y global medida. Su principal ventaja con respecto a los modelos macro reside en el hecho de que las propiedades mecánicas de cada elemento constitutivo del

muro se basan en el comportamiento local real de los materiales, por lo que la interacción entre fuerza axial, flexión y cortante se toma directamente en cuenta.



*Figura 2.2 Configuración de los muros en U: a) de los ensayos experimentales y b) las pruebas numéricas mediante simulaciones computacionales [78].*

Flores-Johnson y colaboradores [79] realizaron una investigación sobre el comportamiento de muros tipo U hechos de concreto espumado fibrorreforzado con fibras de henequén, sometidos a cargas cíclicas dinámicas usando una mesa sísmica de un solo eje para las pruebas experimentales y usando FEM para las simulaciones numéricas. Los resultados numéricos (Figura 2.3) mostraron que el diseño de la pared en forma de U es crucial para reducir la concentración de esfuerzos que pueden conducir a la formación de deformaciones plásticas, grietas y fallas posteriores.



*Figura 2.3 Simulaciones numéricas mediante simulaciones computacionales FEM de muros en U de concreto espumado donde se observan concentraciones de esfuerzos [79].*

## **2.6 Pruebas experimentales usando una mesa sísmica de vibración**

Una mesa vibratoria es una plataforma móvil que simula los movimientos de un sismo en un modelo estructural [80]. Las mesas vibratorias pueden ser clasificadas según el tamaño, el tipo de actuador que genera el movimiento o los grados de libertad [81]. Los ensayos en la mesa vibratoria generalmente involucran modelos a escala reducida. Sin embargo, en los últimos años se han llevado a cabo ensayos de estructuras en escala real usando mesas vibratorias como las disponibles en el E-Defense en Japón o en la Universidad de San Diego en Estados Unidos. Estas mesas permiten simular movimientos hasta en seis grados de libertad [82].

Se han realizado varios estudios del comportamiento sísmico usando una mesa sísmica de diversas estructuras, como marcos, edificios, puentes, etc., usando diferentes materiales como adobe, concreto reforzado, acero, entre otros.

### **2.6.1 Mesa vibratoria Shake Table II**

La mesa vibratoria que se utilizará para realizar las pruebas experimentales en este proyecto es la Quanser Shake Table II [83], la cual es un simulador de terremoto de eje único de arquitectura abierta de tamaño medio, ideal para enseñar dinámica estructural, aislamiento de vibraciones, control de retroalimentación y otros temas de control relacionados con terremotos, ingeniería aeroespacial y mecánica.

Con esta mesa se puede estudiar el comportamiento de las estructuras bajo cargas sísmicas, simulando ondas senoidales con un rango de frecuencias que va de 1 a 10 Hz y sismos reales. [84].

En la Tabla 2.4 [85] se muestran las características de la mesa, las cuales fueron de importancia para la realización del prototipo, puesto que fueron determinantes para su escalamiento y fabricación. En la Figura 2.4 [86] se presenta la configuración de la conexión de los diferentes componentes de la mesa sísmica.

*Tabla 2.5 Especificaciones de la Shake Table II [85].*

Especificación	Valor
Sobrecarga de diseño a $2.5 \text{ cm/s}^2$	75.8 N
Aceleración máxima	$2.5 \text{ cm/s}^2$
Rango de frecuencia	0-20 Hz
Velocidad máxima	664.9 mm/s
Dimensiones de la plataforma de la mesa	45.72 cm x 45.72 cm
Desplazamiento	$\pm 7.62 \text{ cm}$
Peso de la mesa	267.5 N



*Figura 2.4 Componentes de la Shake Table II para su correcto funcionamiento [86].*

Algunos ejemplos de la utilización de la Shake Table II son los experimentos a pequeña escala y su comparación con predicciones analíticas [83] realizado por el Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST) desarrollado por la Universidad de Costa Rica en el cual se construyó un modelo tridimensional de aluminio (Figura 2.4) y

se probó en la Quanser Shake Table II y se determinó la rigidez y el amortiguamiento del modelo, así como las aceleraciones como función del tiempo y el desplazamiento de la planta superior. Los resultados obtenidos experimentalmente se compararon con los obtenidos analíticamente mediante el programa SAP2000.



*Figura 2.5 Modelo tridimensional utilizado en pruebas sísmicas en la Quanser Shake Table II [83].*

## **2.7 Parámetros de comparación para estructuras sismorresistentes**

Para que una estructura sea considerada resistente a sismos es necesario que cumpla con los criterios de diseño estructural determinados por los reglamentos y las normas establecidas, que deberán estar en constante revisión para mejorar el diseño sismorresistente [87].

Algunos de estos parámetros a considerar (en la simulación experimental) son la rigidez, la aceleración, los desplazamientos máximos y las deformaciones:

Rigidez. Capacidad de los elementos en las estructuras para soportar los esfuerzos a los que se someterá sin deformarse, manteniendo sus uniones. Las estructuras rígidas se dice que son indeformables; las estructuras no rígidas no. Ante movimientos sísmicos las estructuras requieren tener cierta flexibilidad [88].

Aceleración: Es el cambio de la velocidad que sufre la tierra ante un sismo y que es transmitido a una estructura.

Desplazamientos. Al generarse un movimiento en la tierra producido por un sismo las edificaciones pasan bruscamente del estado de reposo a sufrir un movimiento vibratorio, que le genera movimientos en todas las direcciones, siendo las componentes horizontales las más críticas. Las edificaciones de un piso vibran de un solo modo y la masa se desplaza a cada lado de la vertical [89].

Deformaciones: Al desplazarse el piso de la estructura hacia un lado, por inercia la masa tiende a quedarse en su sitio y el resto de la estructura se deforma [89].

## **2.8 Modelo a escala**

En la experimentación, debido al costo y/o a la dificultad de realizar modelos a escala real, es necesario utilizar modelos reducidos por un factor de escala. Dichos modelos deben ser probados y analizados mediante leyes de similitud que dependen de las características físicas, mecánicas y geométricas del modelo.

De acuerdo con Janney y colaboradores [90] un modelo estructural es definido como “cualquier representación física de una estructura o una porción de una estructura. Comúnmente, el modelo será construido a una escala reducida”.

Los modelos de estructuras se pueden clasificar conforme al objetivo de la evaluación experimental a la que se someten éstas. Utilizando este criterio, los modelos se pueden clasificar en elásticos, indirectos, directos, de resistencia, de efecto eólico, dinámicos, entre otros. Los modelos elásticos se utilizan en aquellos casos de geometría proporcional a la del prototipo pero que no necesariamente son del mismo material por lo que las pruebas sólo se llevan a cabo en un rango elástico. Los modelos indirectos son similares a los elásticos y en éstos se busca obtener diagramas de influencia, es decir, las cargas y/o geometría del modelo no corresponden de manera proporcional a la del prototipo, pero mediante superposición se obtienen los resultados deseados. Los modelos directos o de réplica real son similares al prototipo en todos los aspectos. Los modelos de resistencia están constituidos por materiales que satisfacen las condiciones de similitud al llevarlos a la falla. Los modelos de efecto eólico y dinámicos son aquellos que se utilizan para someterlos a estos tipos de carga, mediante estudios de efectos de vibración o cargas

dinámicas sobre estructuras para modelos dinámicos, los cuales pueden ser probados sobre una mesa sísmica para el estudio de los efectos de cargas sísmicas, y, mediante estudios de efectos aeroelásticos para modelos de efecto eólico, los cuales pueden ser probados en un túnel de viento [91].

La correcta selección del factor de escala geométrico es importante, ya que utilizar modelos pequeños requerirá cargas bajas pero su inconveniente radica en la dificultad de su fabricación e instrumentación. Así mismo, un modelo de mayor escala requerirá equipos que proporcionen mayor carga. La Tabla 2.6 [91] muestra los diferentes factores de escala usados para distintos tipos de estructuras

*Tabla 2.6 Factores de escala geométricos típicos en la modelación de estructuras [91].*

Tipo de estructura	Modelo elástico	Modelo de resistencia
Cubiertas en cascarones	1:200 a 1:50	1:30 a 1:10
Puentes	1:25	1:20 a 1:4
Revestimiento de reactores	1:100 a 1:30	1:20 a 1:4
Placas	1:25	1:10 a 1:4
Presas	1:400	1:75
Efectos del viento	1:300 a 1:50	No aplicable

## **2.9 Justificación del trabajo**

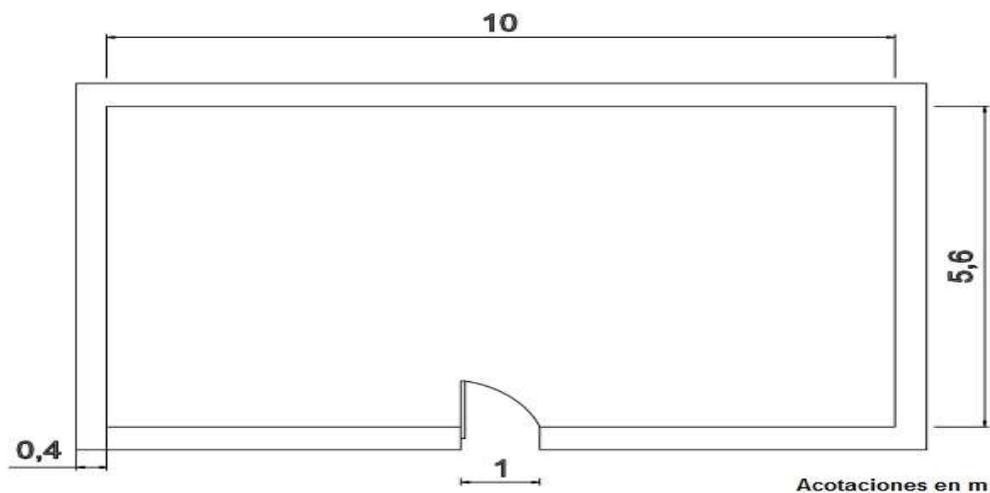
En lugares con pobreza o pocos recursos para la construcción de viviendas, se utilizan materiales de muy mala calidad y no se sigue un procedimiento de construcción que garantice que la vivienda resistirá a los diferentes fenómenos naturales que se presenten, como los sismos. Por eso es necesario crear alternativas de construcción que sean factibles tanto económica como estructuralmente.

La construcción de viviendas ha ido evolucionando muy lentamente, muchos procesos constructivos ya son obsoletos porque no resisten el impacto de la naturaleza; sin embargo, se siguen utilizando por la facilidad de adquisición de los materiales. En un sismo, estos materiales fallan de una manera drástica, por lo que muchas veces se tienen pérdidas humanas y materiales; la razón principal es que las construcciones tienen la característica de fallar de manera frágil debido al peso de los elementos constructivos y las características intrínsecas de los materiales utilizados. Una forma de mejorar ese problema es utilizando paneles aligerados de concreto espumado fibrorreforzado ya que, debido a su ligereza, se aumentaría la resistencia de los materiales a tensión, provocando que sean más dúctiles, lo que conlleva en una mejora en el comportamiento estructural bajo cargas sísmicas. El concreto espumado tiene una densidad más baja que la del concreto convencional, haciéndolo más fácil de transportar y al reforzarlo con fibra de henequén, se promueve la integración con materiales naturales.

## CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.1 Diseño de un modelo de una vivienda típica

Las dimensiones de una vivienda en la zona de estudio, es decir en las zonas rurales del estado de Oaxaca, son muy variadas [92]. Se decidió tomar un diseño de una vivienda de 10.0m de largo x 5.6m de ancho y una altura de 3.0m, existente en la población de San Jerónimo de Zegache, Oaxaca [93] (Figura 3.1). A partir de esto, se diseñó un muro tipo U con el que se pretende representar una sección de un muro de la vivienda (Figura 3.2).



*Figura 3.1 Dimensiones reales de la vivienda de referencia [93].*

De acuerdo con los criterios fundamentales para el diseño sismorresistente [94] en el que la geometría de una estructura debe ser regular se optó por diseñar el muro tipo U con las dimensiones de 4 m de longitud y 2.4 m de altura y espesor de 15 cm, con muros a la izquierda y derecha de la misma altura y espesor, y con una de longitud de 1.8 m como se muestra en la Figura 3.2a. De acuerdo a la Tabla 2.6 [91], el muro podría ser considerado una placa consistente en la unión de los bloques, por lo se utilizó una escala geométrica de 1:7.5 para la fabricación de los prototipos de prueba; las dimensiones del muro a escala se muestran en la Figura 3.2b. Para la fabricación de los prototipos a escala, se elaboraron moldes a base de madera triplay con un espesor de 18 mm, unidos mediante tornillos y ménsulas como se muestra en la Sección 3.2.2.

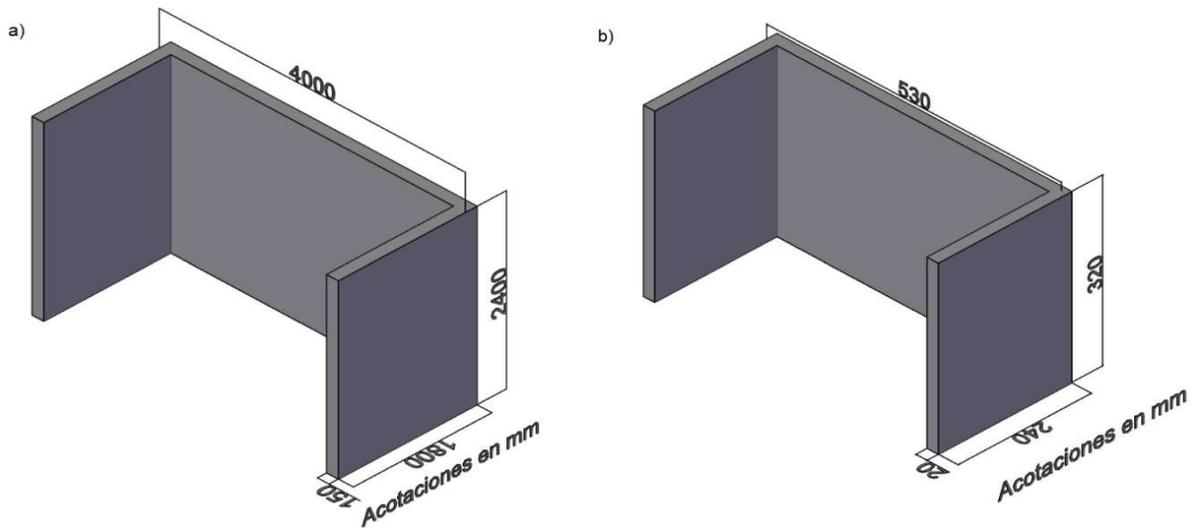


Figura 3.2 Dimensiones del muro en forma de U: a) dimensiones reales de diseño; b) dimensiones a escala reducida.

### 3.2 Elaboración de los muros U a escala reducida de concreto espumado y probetas para las pruebas mecánicas

Para la elaboración de la mezcla de concreto espumado se consideró que la densidad húmeda es  $100 \text{ kg/m}^3$  mayor que la densidad seca y que la espuma ocupa el 6% del volumen total de la mezcla. Se elaboraron muestras con una densidad seca de 900 y  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Las cantidades de material se determinaron de acuerdo con el volumen de concreto espumado requerido, la densidad seca, la densidad de la fibra y su porcentaje de ocupación en la mezcla; se consideró una relación de agua/cemento de 0.70 y una relación de arena/cemento de 0.50.

#### 3.2.1 Materiales utilizados

Se utilizó cemento gris tipo Portland CPC 30R de la marca CEMEX, el cual cumple con la norma NMX-C-414-ONNCCE. El agregado pétreo fue suministrado por la empresa PREDECO. Se utilizó agua potable de la región y el agente espumante sintético de la marca EABASSOC fue utilizado para la generación de espuma.

El material de refuerzo fueron fibras de henequén (*Agave fourcroydes*) que se obtuvo mediante productores locales del municipio de Baca, Yucatán. Las fibras se amarraron en manojos para ser cortados en longitudes de 4 mm.

Para la generación de la espuma, se utilizó una máquina espumadora de la marca Propump Engineering, conectada a un compresor de aire, con una presión de 110 psi. La densidad de la espuma fue de  $50 \pm 2.5 \text{ kg/m}^3$ .

### ***3.2.2 Preparación del concreto espumado para la obtención de los prototipos a escala y los especímenes para las pruebas mecánicas***

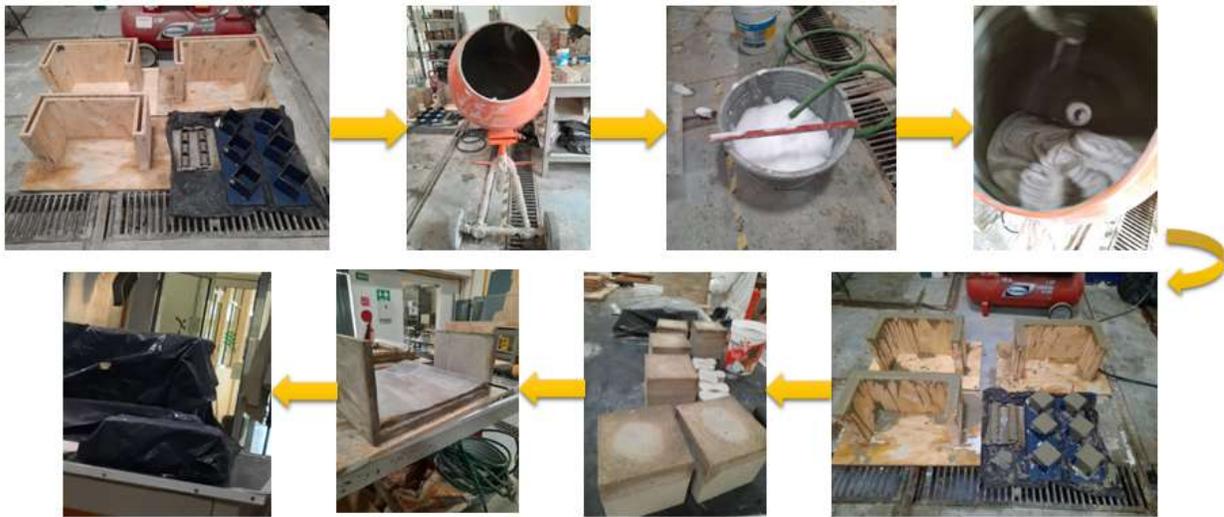
Con ayuda de una báscula de la marca Ohaus modelo EB6, con una capacidad de 6 kg., los materiales a utilizar fueron cuantificados. El cemento y la arena fueron añadidos en la revolvedora y se mezclaron por 3 minutos, se vertió el agua y nuevamente se revolvió por 3 minutos. Se realizó una inspección manual para corroborar que la mezcla no tuviera grumos. Ya mezclado se calculó su densidad.

Una vez generada la espuma con la densidad deseada, ésta se le añadió a la mezcla y los materiales fueron nuevamente mezclados para que la espuma se incorporara a ésta; después del mezclado se calculó la densidad del concreto espumado. Para el concreto espumado reforzado, las fibras de henequén se agregaron después de haber agregado la espuma para que se tuviera una mezcla homogénea; también se calculaba la densidad posterior al mezclado.

Para las pruebas mecánicas, se utilizaron moldes metálicos a los cuales se les aplicaba desmoldante para que la mezcla no se adhiriera a los moldes. La mezcla fue vertida en 3 capas en los moldes y se daban ligeros golpecitos para que la mezcla se acomodara uniformemente y conservara su estructura celular. Los moldes se enrasaron y se dejaron fraguar por 24 horas. Una vez fraguadas las muestras, estas se desmoldaron, pesaron y etiquetaron para continuar con el proceso de curado, almacenándolas en bolsas de plástico durante 28 días. En la Tabla 3.1 se muestra la nomenclatura de las mezclas elaboradas en este trabajo. En la Figura 3.3 se observa el proceso de elaboración de las muestras.

*Tabla 3.1 Nomenclatura de los especímenes utilizados para la prueba.*

Mezcla	Nomenclatura
Concreto espumado sin refuerzo de fibra con una densidad de 900 kg/m <sup>3</sup>	MSF900
Concreto espumado con refuerzo de fibra con una densidad de 900 kg/m <sup>3</sup>	MCF900
Concreto espumado sin refuerzo de fibra con una densidad de 1200 kg/m <sup>3</sup>	MSF1200
Concreto espumado con refuerzo de fibra con una densidad de 1200 kg/m <sup>3</sup>	MCF1200



*Figura 3.3 Proceso de elaboración de los prototipos a escala y los especímenes para las pruebas mecánicas.*

### **3.3 Realización de las pruebas mecánicas**

Las pruebas mecánicas se realizaron utilizando una máquina de pruebas universales de la marca SHIMADZU modelo AG-1, con una celda de carga de 100 kN para las pruebas de compresión y de 20 kN para las pruebas de tensión.

### **3.3.1 Pruebas de compresión del concreto espumado**

Las pruebas de compresión fueron realizadas a especímenes en forma de cubos de 100 mm de lado, siguiendo la norma BS EN 12390. La prueba se realizó con una velocidad de desplazamiento constante de 2.4 mm/min. La prueba de compresión se muestra en la Figura 3.4.



*Figura 3.4 Prueba de compresión en la máquina de pruebas universales.*

### **3.3.2 Pruebas de tensión del concreto espumado**

Las pruebas de tensión fueron realizadas en especímenes en forma de hueso con una longitud de 76.2 mm y un área de sección transversal de 25.4 x 25.4 mm, de acuerdo a la norma ASTM C307-03; la prueba fue realizada a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min hasta el rompimiento de las probetas. La prueba de tensión se muestra en la Figura 3.5.



*Figura 3.5 Prueba de tensión en la máquina de pruebas universales.*

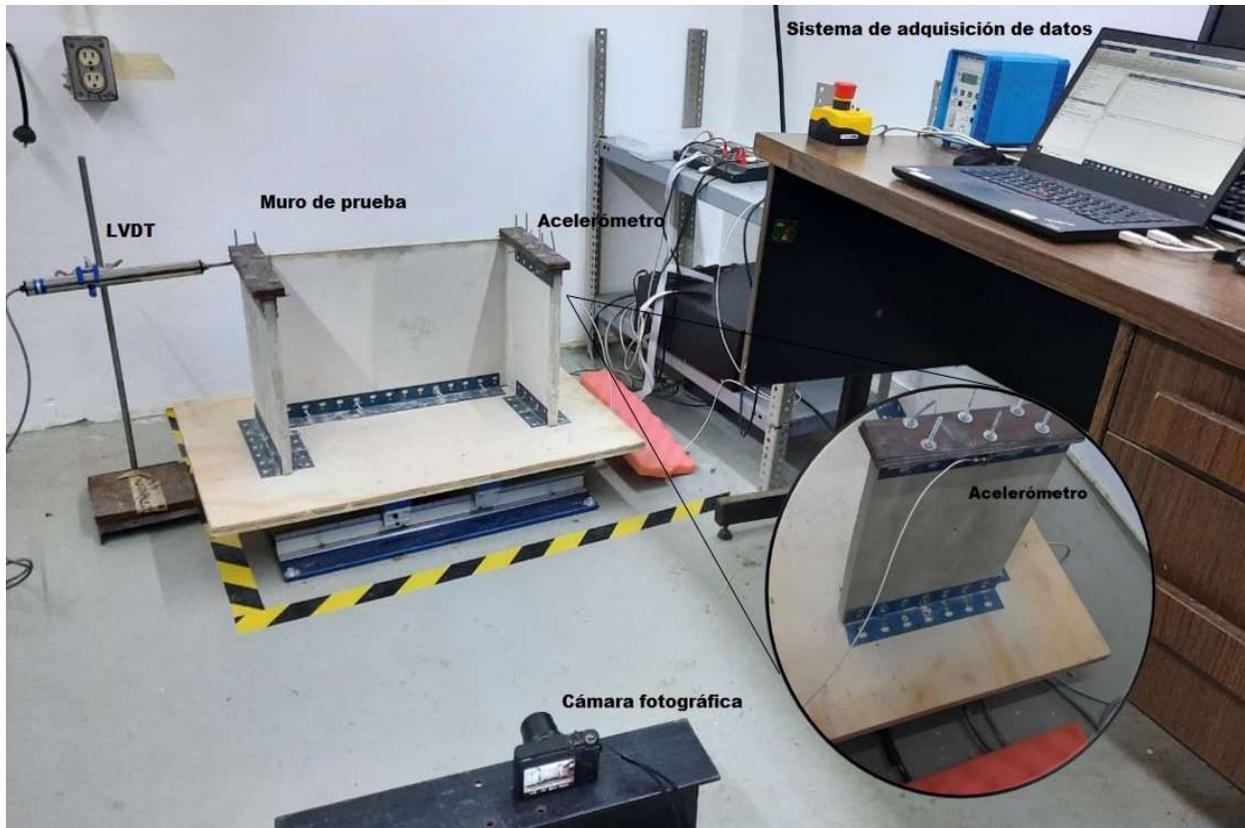
#### **3.4 Instrumentación y prueba experimental en la mesa de vibración**

Los muros en forma de U a escala reducida de concreto espumado se sometieron a una carga cíclica dinámica utilizando una mesa vibratoria de un solo eje Quanser Shake Table II (Quanser Consulting Inc.), para lo cual fue necesario anclarlos a una base de madera para después ser anclados a la mesa vibratoria. Para anclar los muros en U en una base de madera de triplay, cuyas dimensiones fueron de 800 x 500 x 18 mm, fue necesario utilizar perfiles ranurados de acero tipo L de 1" y tornillos. Para obtener un comportamiento real del muro, fue necesario agregar pesas en las paredes izquierda y derecha del muro para simular el peso del techo de la vivienda (peso muerto). Las pesas se obtuvieron mediante la unión de placas de acero y se conectaron en las esquinas del muro mediante perfiles ranurados de acero en forma de L de 1" y se sujetaron al muro por medio de tornillos; cada pesa tuvo una masa de 1.4 kg. En la Figura 3.6 se observa la forma en la que se ancló el muro a la base y las pesas al muro.



*Figura 3.6 Anclaje de muro a la base y pesas sobre el muro.*

Para la medición de los desplazamientos en la parte superior de la pared izquierda del muro, se utilizó un sensor de desplazamiento “Linear Variable Differential Transformer” (LVDT) con un rango de muestreo de hasta 80 Hz, el cual se conectó a una tarjeta de adquisición de datos Micro-Measurements MM01 MultiDAQ. Para la medición de las aceleraciones en la parte superior de la pared derecha del muro, se utilizó un acelerómetro uniaxial modelo 8640A10 de la marca Kistler, con un límite de aceleración máxima de  $\pm 98.1 \text{ m/s}^2$ . Asimismo, se utilizó una cámara de video Sony Cyber-Shot DSC-RX 100 IV, con capacidad de grabación de 120 fotogramas por segundo. La configuración de la instrumentación de la prueba en la mesa de vibración se observa en la Figura 3.7.



*Figura 3.7 Instrumentación utilizada para las pruebas sísmicas.*

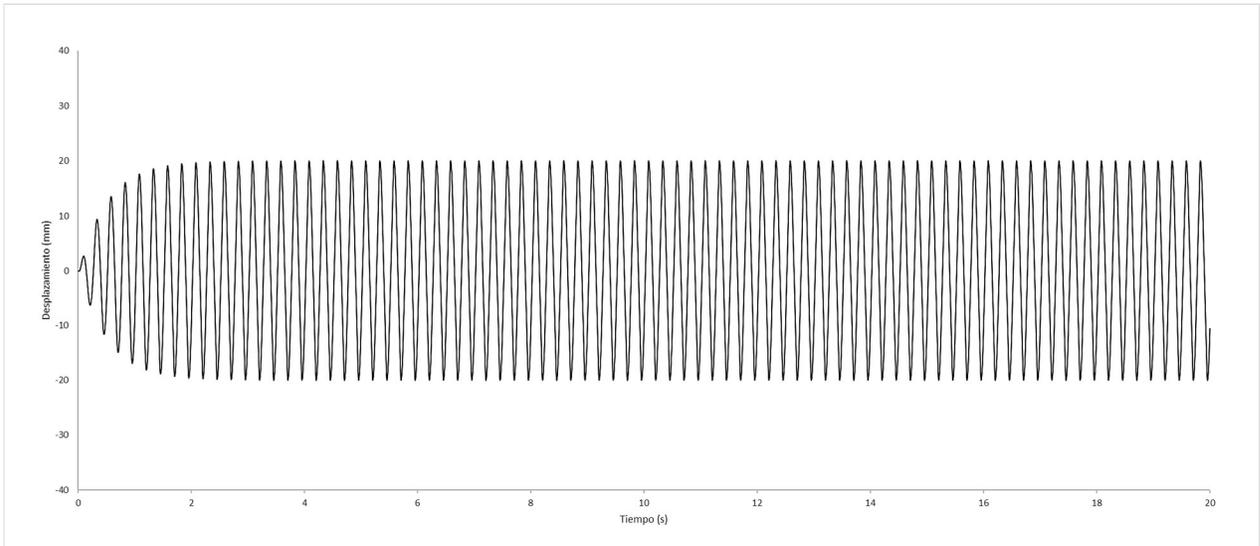
Para realizar las pruebas sísmicas fue necesario calibrar la mesa sísmica y configurar las condiciones de prueba. Una de las condiciones importantes es el peso que soportará la mesa para que la mesa sísmica pueda realizar el correcto escalamiento de las magnitudes; este peso es el peso total del sistema base-muro, el cual se registra en el software MATLAB que controla la mesa, e incluye el peso de muro de concreto espumado, la base de madera, las pesas simuladoras del peso del techo, los perfiles ranurados de acero tipo L de 1" y tornillos. La medición del peso se realizó mediante una báscula de plataforma Torrey, modelo EQB-100-W, con capacidad de hasta 100 kg.

En la Tabla 3.1 se muestran los pesos promedios de los muros y los pesos promedios registrados en MATLAB para configurar la prueba.

*Tabla 3.2 Peso de los muros y peso registrado para la prueba.*

Muro	Peso del muro de concreto espumado. (kg)	Peso total del sistema base-muro registrado en MATLAB. (kg)
MCF 1200	6.52	14.26
	6.52	14.26
	6.48	14.26
Promedio	6.51	14.26
MSF 1200	6.72	14.44
	6.62	14.32
	6.60	14.4
Promedio	6.65	14.39
MCF 900	4.1	11.8
	4.46	12.22
	5.19	12.98
Promedio	4.58	12.33
MSF 900	5.74	13.26
	5.34	13.14
	4.44	12.24
Promedio	5.17	12.88

Para la realización de la prueba experimental se utilizó el software Shake Table Control en el cual se probó una onda senoidal, cuyos parámetros fueron: una frecuencia de 4 Hz y un desplazamiento de 20 mm, el cual se observa en la Figura 3.8. Mediante esta prueba se pudo estudiar, por un lado, el comportamiento del muro midiendo sus desplazamientos y aceleraciones en la parte superior de las paredes; y por otro, el efecto del fibrorrefuerzo en el tiempo de falla o colapso de la estructura.



*Figura 3.8 Gráfica del desplazamiento de la onda senoidal de 4 Hz y amplitud de 20 mm.*

### **3.5 Simulación numérica del prototipo a escala reducida del muro en U de concreto espumado usando FEM**

Las simulaciones numéricas con FEM del prototipo a escala reducida del muro en U de concreto espumado se realizaron mediante el software de FEM Abaqus/Explicit (Versión 2016). Las simulaciones realizadas sirvieron como herramienta para observar la concentración de esfuerzos localizada y la deformación plástica en el muro que pueden conducir a la aparición de grietas y posibles fallas de este cuando es sometido a cargas cíclicas dinámicas.

La geometría del modelo 3D utilizado en la simulación se basó en la geometría del prototipo a escala utilizado para las pruebas experimentales: un muro en forma de U, base de madera, ángulos y pesas de acero. La base de madera, los ángulos y las pesas de acero se modelaron como cuerpos rígidos. Los ángulos de acero se unieron a la base, así como las pesas de acero se unieron al muro usando la opción Tie Constraint (completamente unidos).

La configuración del modelo utilizado en las simulaciones numéricas se muestra en la Figura 3.9.

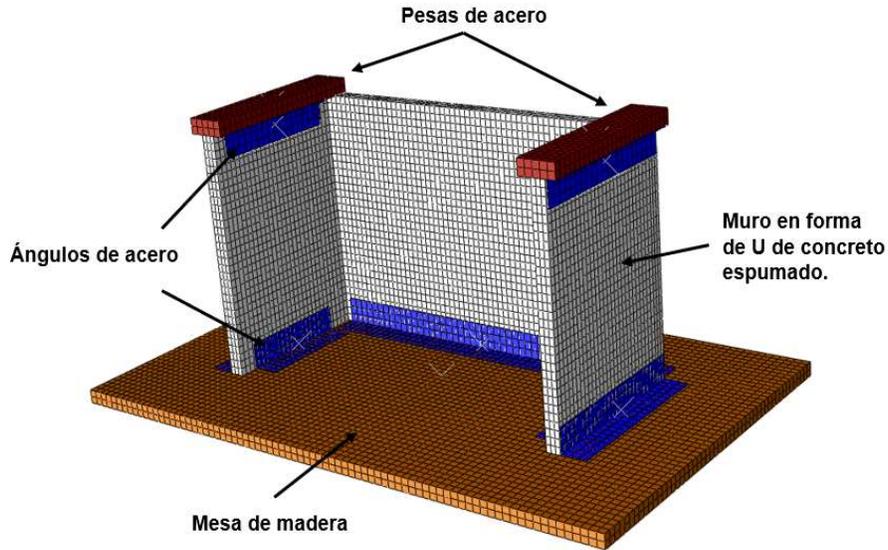


Figura 3.9 Mallado y configuración del modelo 3D utilizado en las simulaciones numéricas.

Las piezas de acero y la base de madera se modelaron utilizando densidades de 7800 y 500 kg/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Se realizaron simulaciones numéricas variando la densidad del concreto espumado (700, 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup>). Para el comportamiento elástico se usó un modelo elástico isotrópico y una relación de Poisson de  $\nu = 0.05$ . Los valores utilizados para el módulo elástico según la densidad se encuentran detallados en la Sección 4.4.

Para el comportamiento plástico en todos los casos se utilizó el modelo de material de “Crushable Foam” (disponible en el software para el modelado de espumas) con los siguientes parámetros: relación de esfuerzo a cedencia de compresión (Compression Yield Stress Ratio)  $k = 0.1$  y la relación de esfuerzo hidrostático a fluencia  $k_t = 1$ , los cuales son valores recomendados en el manual de Abaqus y en la literatura [95]. En la sección de endurecimiento por deformación (Strain Hardening) se ingresaron algunos valores tabulares, diferentes para cada densidad, del comportamiento plástico de la gráfica esfuerzo-deformación que se obtuvo en la literatura [95]. Esto es importante para que la simulación del comportamiento del concreto espumado sea correcto. No fue implementado algún criterio de falla, para simular la falla del material, debido a la falta de parámetros de fractura.

Las fuerzas a las que se sometió el modelo fue la carga de gravedad como un campo de aceleración vertical ( $-9.806 \text{ m/s}^2$ ) a todo el modelo y la carga cíclica dinámica de la mesa vibratoria la cual se ingresó en forma tabular. La carga está descrita por la curva del historial

de tiempo de desplazamiento de la Figura 3.8 aplicada a la base de madera como una condición de límite de desplazamiento prescrita. El tiempo total de la carga dinámica simulada fue de 3 s.

La malla fue compuesta por elementos tipo ladrillo de 8 nodos (C3D8R) con una formulación de integración reducida. Se utilizó un tamaño de elemento global de 10 mm. Para el muro en forma de U se utilizó un tamaño de elemento medio de 7 mm, resultando en 3 elementos de espesor total lo que arroja un total de 11520 elementos. Se verificó que este tamaño de malla daba resultados con convergencia.

### 3.6 Prueba experimental preliminar en la mesa de vibración para un muro a escala reducida elaborado con ladrillos de barro cocido

Esta sección muestra lo que se llevó a cabo como experimentación preliminar, para desarrollar el escalamiento y la configuración de la instrumentación para ser usada en la prueba de los muros de concreto espumado.

Se decidió realizar el prototipo de un sólo muro tipo U de una vivienda considerada de 6 m de ancho con alas de 1.0 m a cada lado, como se observa en la Figura 3.10.

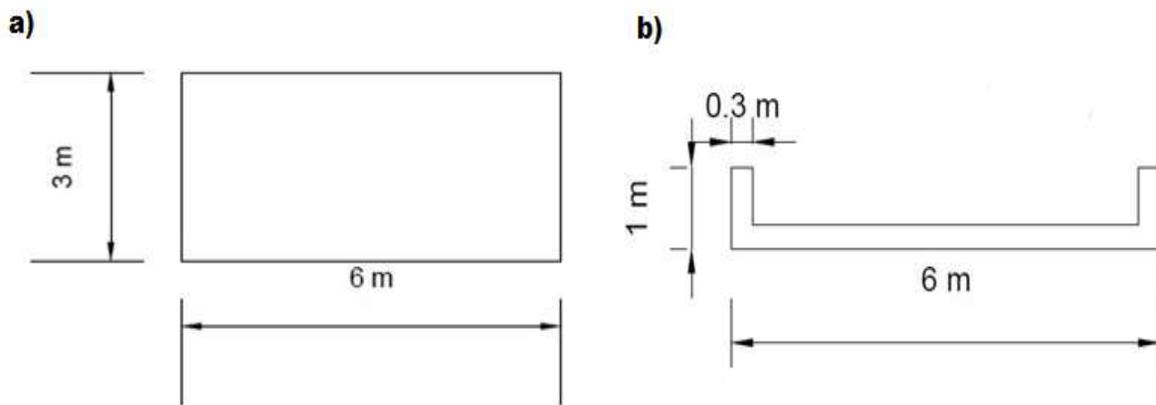


Figura 3.10 Diseño del muro de adobe a escala real: a) vista frontal; b) vista en planta.

#### 3.6.1 Escalamiento del modelo

Para realizar el escalamiento del muro, se contempló el peso permitido por la mesa sísmica, así como el espacio para que el muro sea probado. De acuerdo a la Tabla 2.6 [91], el muro podría ser considerado una placa consistente en la unión de los bloques, se utilizó una

escala de 1:7.5; con esta escala, las dimensiones del muro son las mostradas en la Figura 3.11.

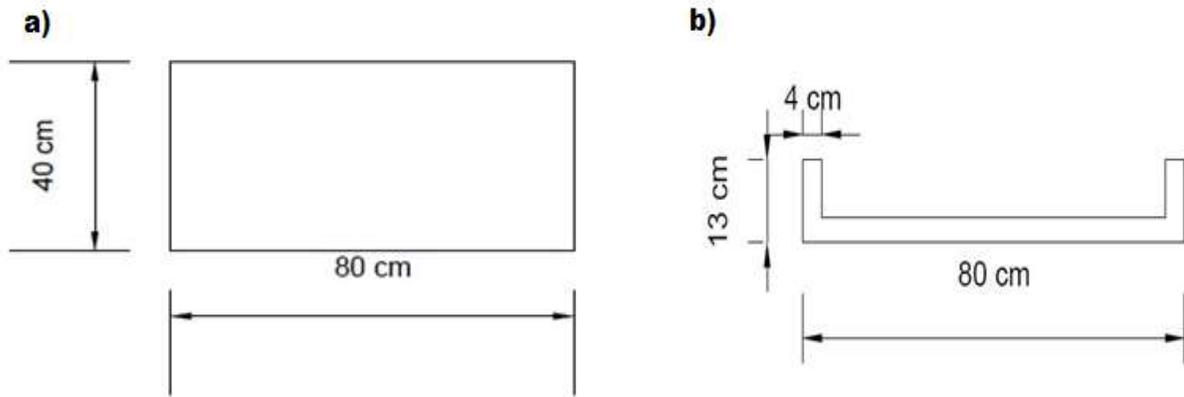


Figura 3.11 Diseño del muro de adobe a escala reducida: a) vista frontal; b) vista en planta.

Para el escalamiento de los ladrillos que conforman el muro se decidió una medida que pudiera facilitar la obtención de los mismos. Las dimensiones de los ladrillos de adobe utilizados en la construcción de las viviendas son variables [96] y [97], así que consideró que las dimensiones de los ladrillos fueran de 45 cm x 30 cm x 12 cm, aplicando la escala geométrica de 1:7.5. Las dimensiones escaladas fueron de 6 cm x 4 cm x 1.6 cm como se presenta en la Figura 3.12.

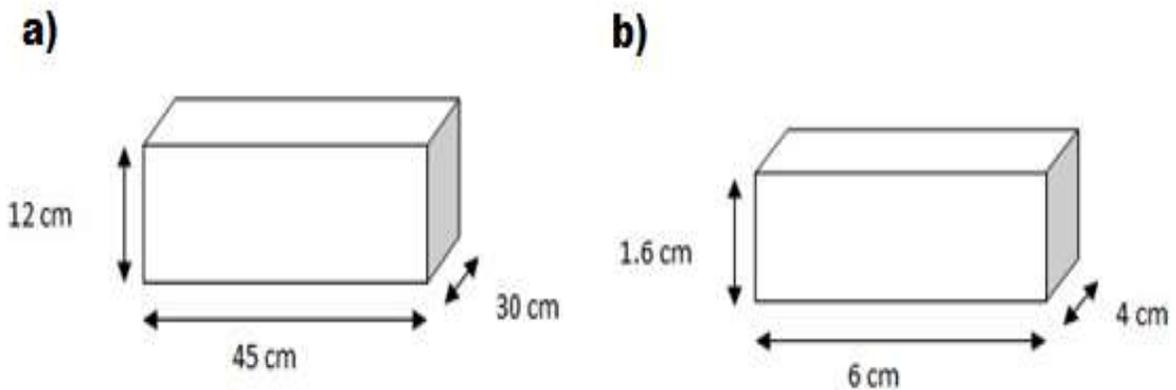


Figura 3.12 Dimensiones del ladrillo real (a) y el ladrillo escalado (b).

En la Figura 3.13 se presenta la vista frontal del muro escalado y la cantidad de filas con ladrillos de adobe cocido, en donde se considera el espesor del mortero de unión de 2 mm.

## Muro con bloques

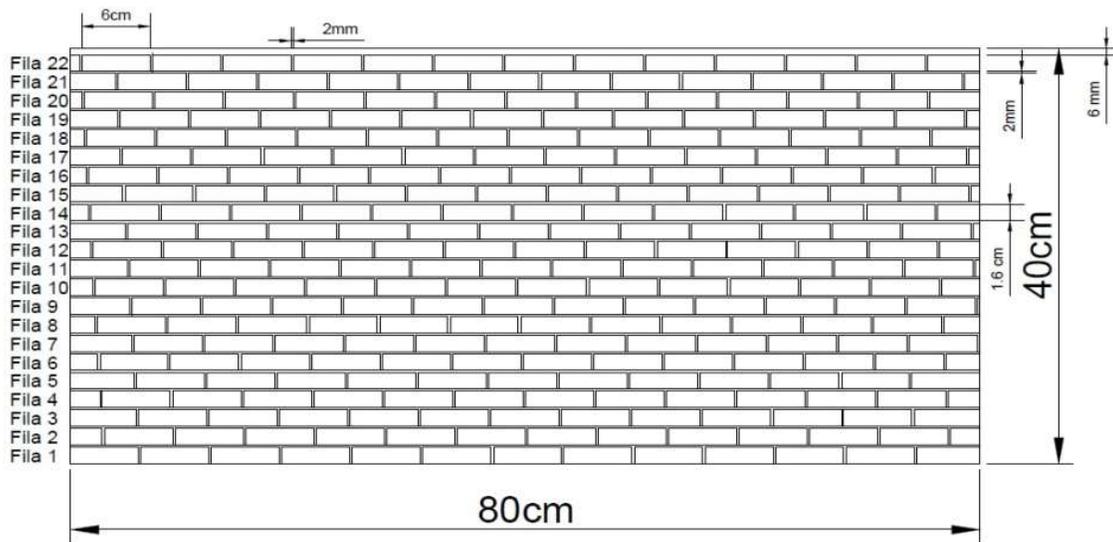


Figura 3.13 Distribución de ladrillos en el muro escalado.

Las proporciones utilizadas para el mortero de unión entre ladrillos fueron 1:3:3 (cemento: arena: agua). Se elaboró un muro de 25 cm x 4 cm x 13 cm con una cimentación de mortero con espesor de 1.8 cm anclado mediante 3 tornillos a una base de madera (que simula el suelo) de 40 cm x 20 cm como se muestra en la Figura 3.14.

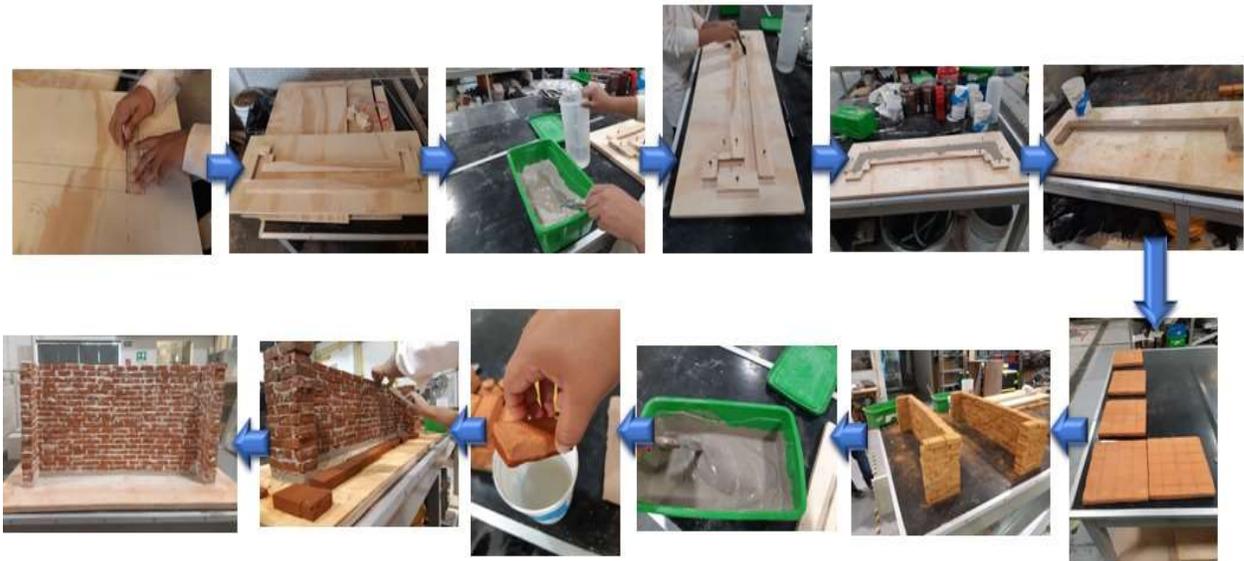


Figura 3.14 Elaboración del prototipo de muro en U de adobe cocido.

### **3.6.2 Prueba del prototipo del muro en forma de U de adobe cocido en la mesa sísmica**

Para verificar el comportamiento del prototipo del muro se procedió a realizar la prueba experimental en la mesa sísmica, mediante un sismo precargado en el equipo de prueba, el cual fue el sismo de El Centro (California, 8 de mayo de 1940). En la Figura 3.17 se observa la configuración del sistema de prueba. A continuación, se describe dicha configuración:

- a. Se utilizó un soporte universal para sostener el LVDT.
- b. El LVDT, Con un rango de desplazamiento de 100 mm, sujetado por el soporte universal, fue colocado a una altura próxima a la altura total de muro, se colocó acorde a la distancia en la que la mesa se desplazaría.
- c. El acelerómetro de un solo eje, con un rango de  $\pm 98 \text{ m/s}^2$ , fue colocado en la parte superior de la estructura, fijado a ella mediante tornillos.
- d. El prototipo fue fijado a la mesa sísmica mediante tornillos y tuercas en la base.
- e. La mesa sísmica fue debidamente calibrada antes de iniciar la prueba.
- f. Equipo de transformación de datos de la mesa sísmica a datos computacionales.
- g. Cámara de video con capacidad de grabación de 120 fotogramas por segundo.
- h. Sistema de adquisición de datos.



*Figura 3.15 Configuración de la prueba del muro de ladrillos en la mesa sísmica.*

La masa total promedio de la estructura (base de madera, cimentación de mortero y muro de ladrillos escalados) fue de 28.66 kg, peso que fue registrado en la mesa sísmica para que realizara el correcto escalamiento de los datos del sismo.

## CAPÍTULO 4 : RESULTADOS

### 4.1 Pruebas de compresión

Los resultados de la prueba a compresión del concreto espumado se presentan en la Tabla 4.1, en la cual se reportan los valores promedio de las propiedades de los especímenes, tales como la densidad seca ( $\text{kg/m}^3$ ), la resistencia máxima a la compresión (MPa), el módulo de elasticidad (MPa) y la deformación a la cedencia (mm/mm). Se puede observar en la Tabla 4.1 que para las probetas con una densidad de  $900 \text{ kg/m}^3$  con fibra, la resistencia aumentó 20.8% en comparación con las que no tenían fibra, mientras que los resultados para las probetas con una densidad de  $1200 \text{ kg/m}^3$  con fibra, la resistencia a la compresión aumentó en un 13.5% en comparación con las que no tenían fibra. Esto indica que la incorporación de fibras en la matriz mejora la resistencia a la compresión del concreto espumado. Se puede observar también que el beneficio de la incorporación de las fibras en la resistencia a la compresión disminuye conforme aumenta la densidad. Se sabe que la resistencia a la compresión se ve afectada de una manera compleja tanto por el volumen de aire en el concreto espumado debido a la cantidad de espuma añadida, es decir por la densidad y el volumen de la fibra añadida a la mezcla [98].

*Tabla 4.1 Resultados de las pruebas de compresión con y sin fibra.*

Mezcla	Densidad seca ( $\text{kg/m}^3$ )	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deformación a la cedencia (mm/mm)
MSF 900	$860.42 \pm 4.38$	$2.50 \pm 0.34$	$411.44 \pm 46.94$	$0.010 \pm 0.002$
MCF 900	$927.00 \pm 5.63$	$3.02 \pm 0.28$	$347.70 \pm 65.95$	$0.012 \pm 0.001$
MSF 1200	$1183.71 \pm 7.73$	$6.43 \pm 0.55$	$579.80 \pm 87.81$	$0.020 \pm 0.002$
MCF 1200	$1206.63 \pm 2.07$	$7.30 \pm 0.61$	$673.50 \pm 71.30$	$0.018 \pm 0.004$

En las Figuras 4.1 y 4.2 se presenta la curva esfuerzo-deformación de la prueba de compresión de las muestras con una densidad de  $900 \text{ kg/m}^3$ , sin fibra (MSF) y reforzadas con la fibra de henequén (MCF), respectivamente. Se observa un incremento en el esfuerzo máximo que resisten las muestras de concreto espumado con fibra (Tabla 4.1). Las probetas fueron probadas hasta una deformación de 0.85 por lo que es posible ver la zona de densificación del concreto espumado, en la cual la muestra se ha comprimido a tal punto que las celdas del material celular empiezan a interactuar unas con otras y el esfuerzo a

compresión empieza a incrementarse rápidamente con el incremento de la deformación, es decir, los espacios vacíos generados por la espuma son ocupados y la muestra empieza a comportarse como un material sólido [99].

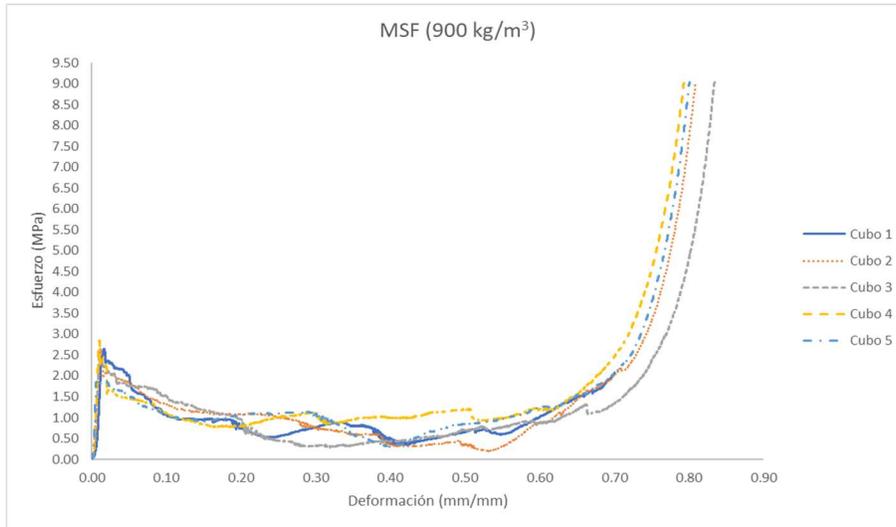


Figura 4.1 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de compresión de concreto espumado sin fibra para densidad de 900 kg/m<sup>3</sup>.

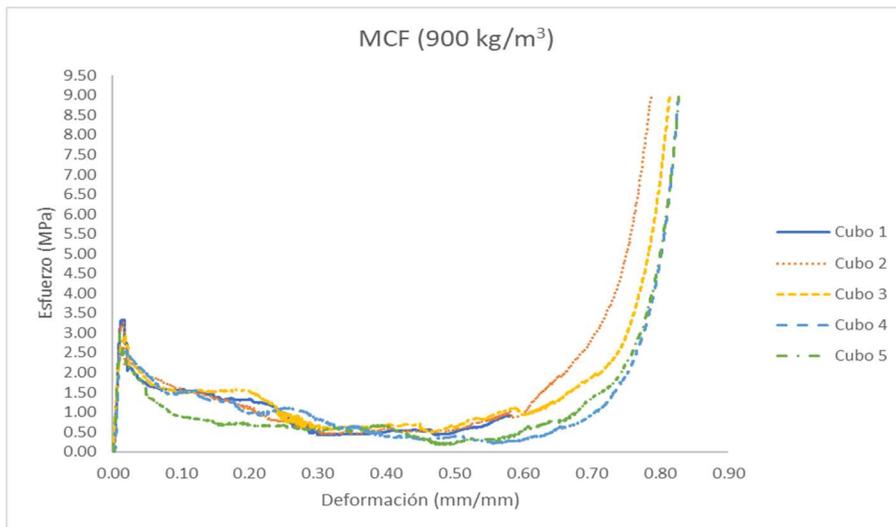


Figura 4.2 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de compresión de concreto espumado con fibra para densidad de 900 kg/m<sup>3</sup>.

En las Figuras 4.3 y 4.4 se presenta la curva esfuerzo-deformación de la prueba de compresión de las muestras de densidad promedio de  $1200 \text{ kg/m}^3$ , sin fibra (MSF) y reforzadas con la fibra de henequén (MCF), respectivamente. Se observa un incremento en el esfuerzo máximo que resisten las muestras debido al incremento de la densidad en comparación con las muestras de  $900 \text{ kg/m}^3$ .

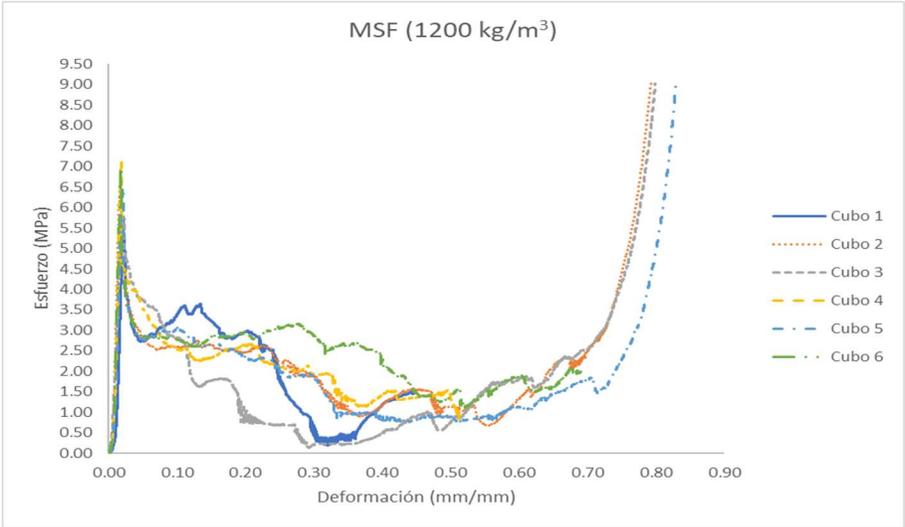


Figura 4.3 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de compresión de concreto espumado sin fibra para densidad de  $1200 \text{ kg/m}^3$ .

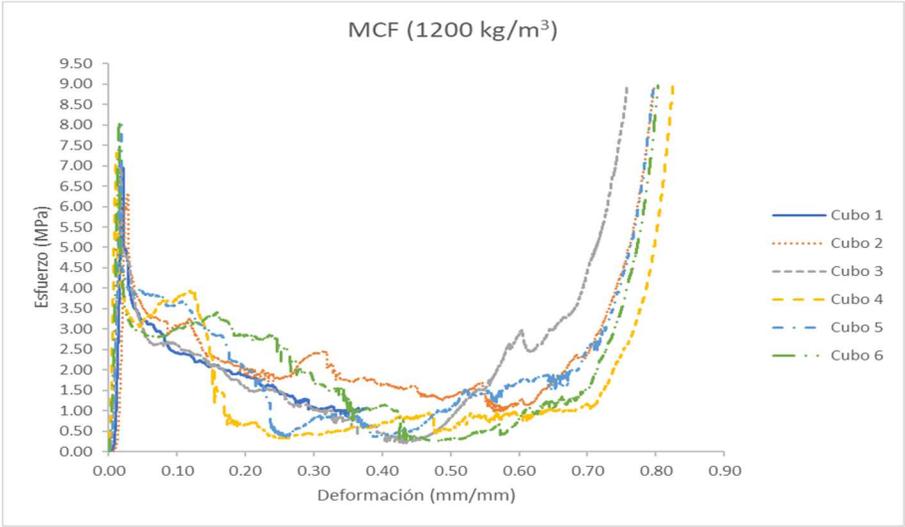


Figura 4.4 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de compresión de concreto espumado con fibra para densidad de  $1200 \text{ kg/m}^3$ .

## 4.2 Pruebas de tensión

Los resultados de la prueba a compresión del concreto espumado se presentan en la Tabla 4.2, en la cual se reportan los valores promedio de la resistencia máxima a la tensión (MPa) y la deformación a la cedencia (mm/mm). Se puede observar en la Tabla 4.1 que para las probetas con una densidad de 900 kg/m<sup>3</sup> con fibra, la resistencia a la tensión aumentó un 77.8% en comparación con las que no tenían fibra. En contraste, los resultados para las probetas con una densidad de 1200 kg/m<sup>3</sup> con fibra, la resistencia a la tensión únicamente aumentó en un 7.7% en comparación con las que no tenían fibra. Esto indica que la incorporación de fibras en la matriz mejora la resistencia a la tensión del concreto espumado, sin embargo, el beneficio se ve disminuido cuando la densidad del concreto espumado aumenta, lo cual confirma las observaciones hechas en la sección anterior.

*Tabla 4.2 Resultados de las pruebas de tensión con y sin fibra.*

Mezcla	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación a la cedencia (mm/mm)
MSF 900	0.36 ± 0.03	0.012 ± 0.004
MCF 900	0.64 ± 0.07	0.016 ± 0.004
MSF 1200	1.04 ± 0.14	0.019 ± 0.008
MCF 1200	1.12 ± 0.19	0.024 ± 0.007

En las Figuras 4.5 y 4.6 se presentan las curvas de esfuerzo-deformación para la prueba de tensión para las muestras de 900 kg/m<sup>3</sup> sin fibra (MSF) y con fibra (MCF), respectivamente. Se observa un mejor comportamiento en cuanto a la resistencia a la tensión que sufrieron las probetas con fibra.

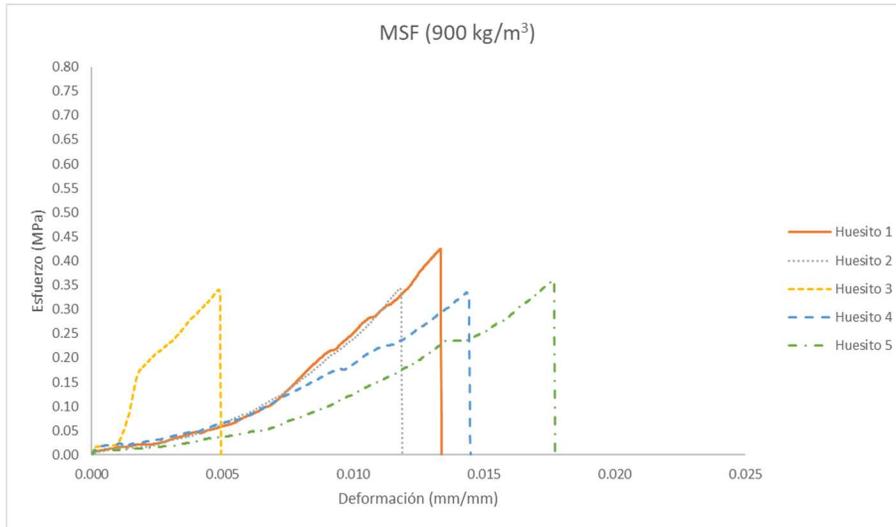


Figura 4.5 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de tensión de concreto espumado sin fibra para densidad de 900 kg/m<sup>3</sup>.

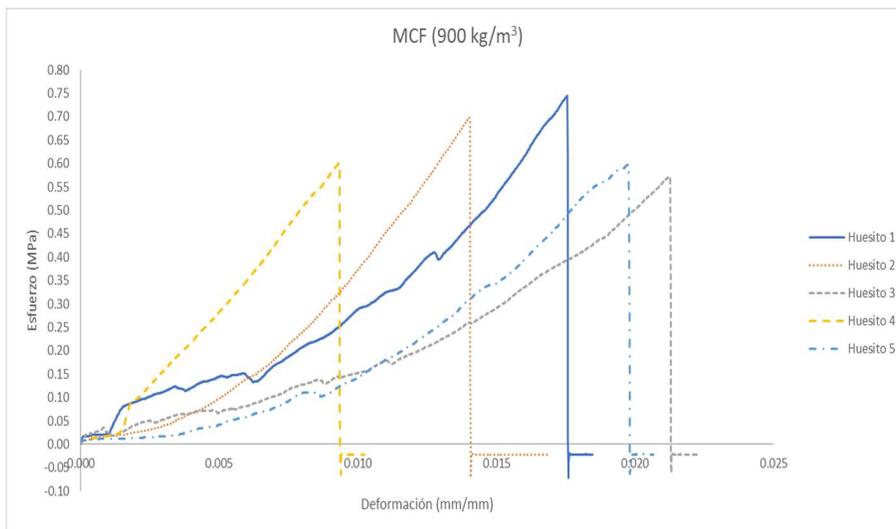


Figura 4.6 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de tensión de concreto espumado con fibra para densidad de 900 kg/m<sup>3</sup>.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se presentan las curvas de esfuerzo-deformación para la prueba de tensión para las muestras de 1200 kg/m<sup>3</sup> sin fibra (MSF) y con fibra (MCF), respectivamente. Se observa un mejor comportamiento en cuanto a la resistencia a la tensión para las probetas con fibra, sin embargo, ésta no mejoró considerablemente debido a la alta densidad de la mezcla.

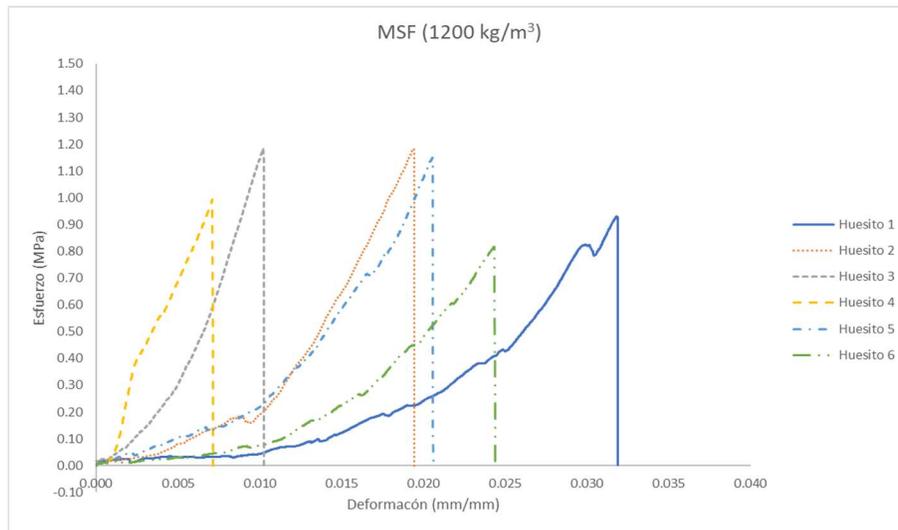


Figura 4.7 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de tensión de concreto espumado sin fibra para densidad de 1200 kg/m<sup>3</sup>.

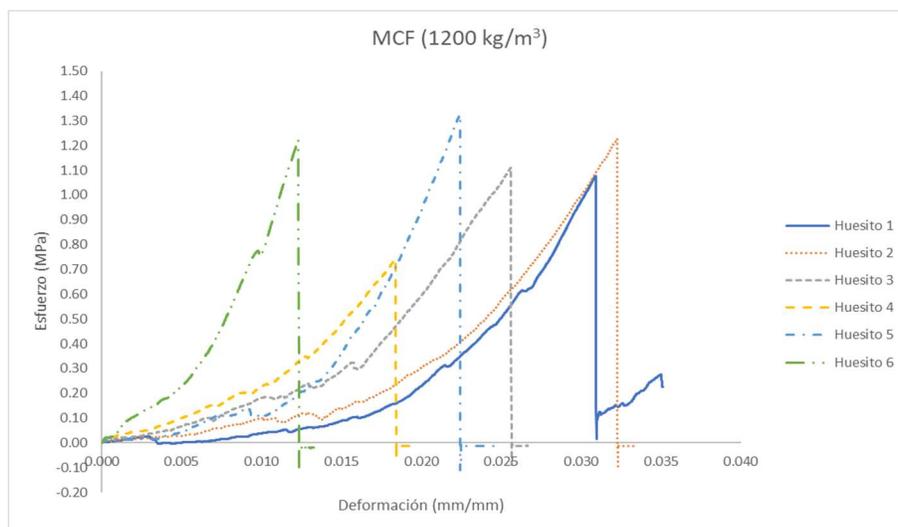


Figura 4.8 Gráfica esfuerzo-deformación en prueba de tensión de concreto espumado con fibra para densidad de 1200 kg/m<sup>3</sup>.

### 4.3 Prueba sísmica en la mesa de vibraciones

Los resultados obtenidos de la prueba sísmica en la mesa de vibración de los muros tipo U se encuentran resumidos en la Tabla 4.2. En esta Tabla se pueden observar, el tipo de mezcla de cada muro, el máximo desplazamiento del ala izquierda del muro donde se colocó el LVDT, el tiempo de colapso del ala izquierda, la máxima aceleración del ala derecha donde se colocó el acelerómetro y el tiempo de colapso del ala derecha. Es posible observar que la mayoría de los muros no colapsaron como se esperaba tanto para los muros de 900 como los de 1200 kg/m<sup>3</sup>. Después de examinar los videos obtenidos durante las pruebas sísmicas, la razón por la cual los muros no colapsaron se explica con la falta de agarre de los muros a la base. En la Figura 4.9 se puede apreciar que cuando el muro llegaba a su desplazamiento máximo ya sea en una dirección u otra durante el movimiento oscilatorio, el muro se levantaba y se podía apreciar un espacio entre la base y el muro. Esta falta de agarra invalida la prueba sísmica por lo que no se puede llegar a ninguna conclusión en cuanto a los resultados presentados en esta sección. Debido a restricciones de tiempo, tampoco es posible repetir estas pruebas en este trabajo. Para pruebas a futuro, se recomienda incrementar el número de tornillos que sujetan los muros a los perfiles en L y aumentar el número de tuercas por tornillo para generar un buen agarre que no sea afectado durante las vibraciones de la prueba cíclica sísmica.

*Tabla 4.3 Resultados de las pruebas sísmicas.*

Mezcla	Muro	Ala izquierda		Ala derecha		Tiempo total de prueba (s)
		Inicio de grieta de falla (s)	Tiempo de colapso (s)	Inicio de grieta de falla (s)	Tiempo de colapso (s)	
MSF 900	1	-	-	-	-	49.89
	2	-	-	-	-	28.11
	3	-	-	-	-	28.05
MCF 900	1	-	-	14.29	18.15	31.2
	2	5.73	23.92	27.98	29.96	7.96
	3	-	-	-	-	28.05
MSF 1200	1	-	-	5.05	-	8.13
	2	-	-	-	-	27.08
	3	-	-	-	-	27.87
MCF 1200	1	-	-	-	-	58.01
	2	-	-	0.04	1.18	1.18
	3	-	-	-	-	28.85

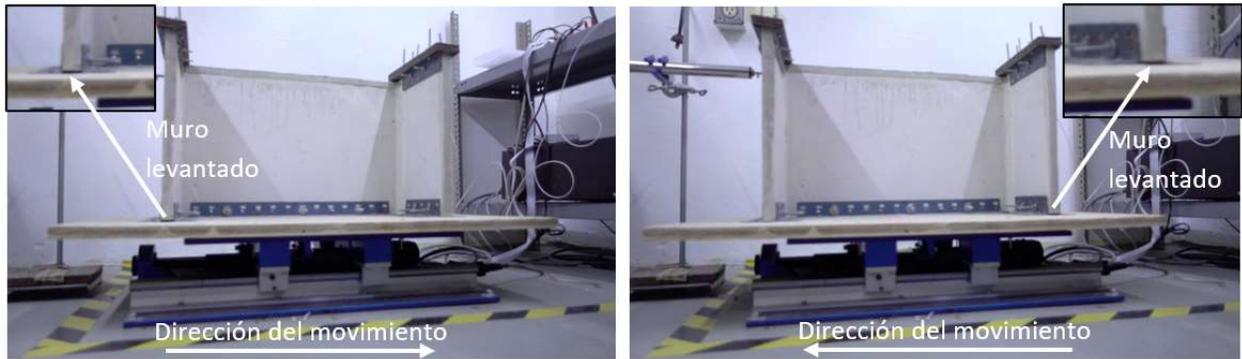


Figura 4.9 Imágenes de los videos de las pruebas sísmicas del muro con una densidad de  $1200 \text{ kg/m}^3$ .

En la Figura 4.10 se muestra el colapso de las alas tanto izquierda (Figura 4.10a) como del ala derecha (Figura 4.10b) de la muestra MCF900 #2 usando imágenes capturadas por la cámara de video. Esto solo se muestra para ilustrar las formas de falla esperada debido a los pesos sobre las alas del muro U. Estas formas de falla incluyen fallas en forma diagonal en el ala y en las esquinas del muro debido a la concentración de esfuerzos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente debido a la pobre unión del muro con la base y el hecho de que la mayoría de los muros no fallaron, lo cual invalida la prueba, no se discutirá a detalle los modos de fallo de los muros.

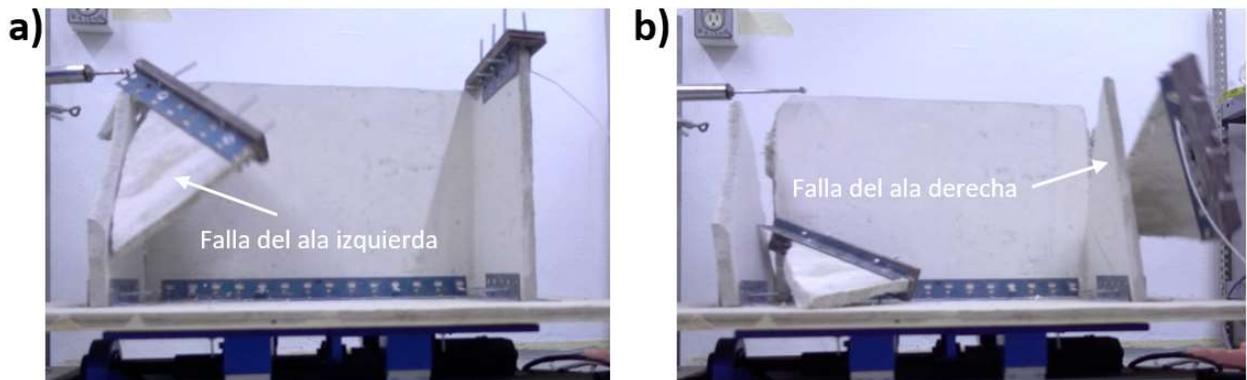
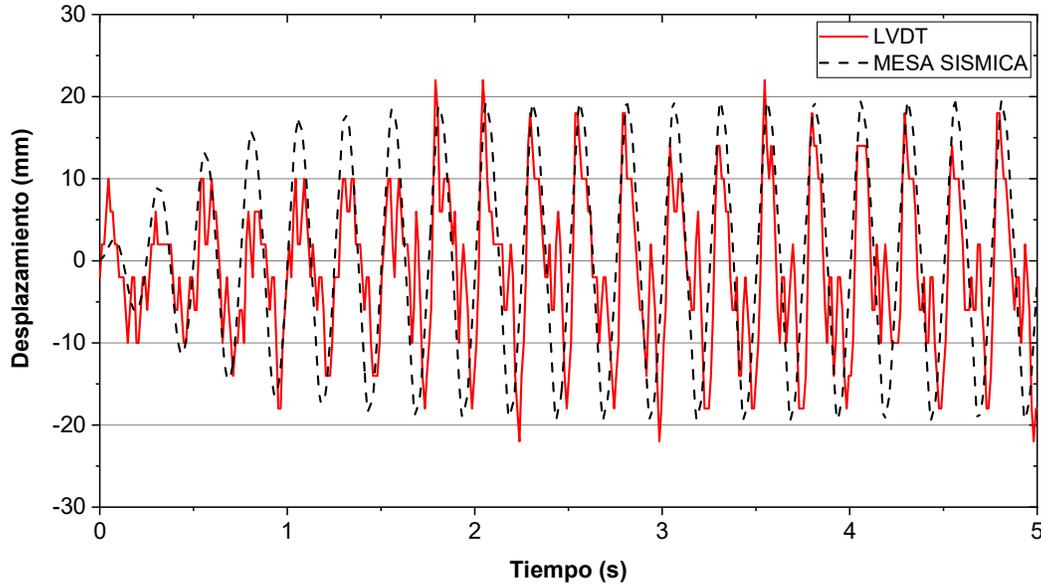


Figura 4.10 Fallas observadas durante la prueba sísmica de la muestra MCF900 #2.

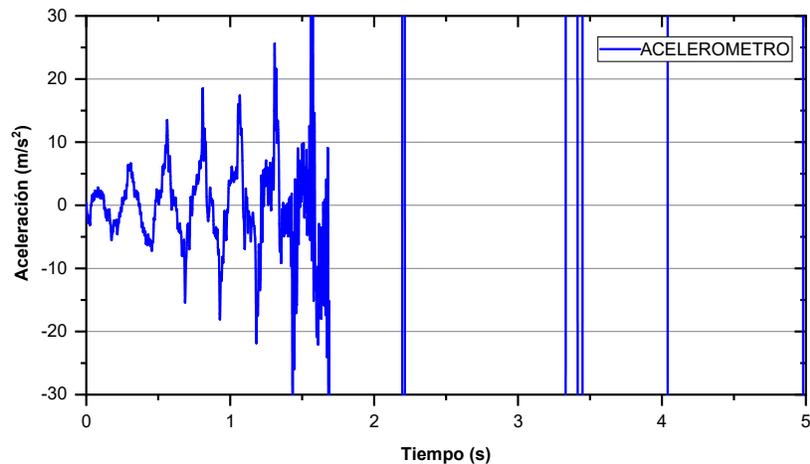
En la Figura 4.11 se presentan la gráficas de desplazamiento *versus* tiempo del ala izquierda de un muro tipo C junto con la gráficas de desplazamiento *versus* tiempo que registró el sensor de la mesa sísmica para los primeros 5 segundos de la prueba. Es posible observar que la mesa ejecutó el movimiento oscilatorio con una amplitud de 20 mm y una frecuencia de 4 Hz de forma correcta. Este desplazamiento también fue registrado por el

LVDT para el ala izquierda, en el que se puede observar la pobre unión del muro con la base lo cual generó saltos y golpeteos en el muro y como consecuencia de esto, oscilaciones en el desplazamiento.



*Figura 4.11 Gráficas desplazamiento-tiempo registradas por la mesa sísmica y por el LVDT en el ala izquierda.*

La Figura. 4.12 muestra la gráfica de aceleración *versus* tiempo del ala derecha registrada por el acelerómetro. para los primeros 5 segundos de la prueba. Es posible observar que el acelerómetro registro la aceleración de forma correcta ( $\sim 12 \text{ m/s}^2$  para una amplitud de 20 mm y una frecuencia de 4 Hz), sin embargo, después de 1 segundo se empiezan a ver oscilaciones las cuales se incrementan conforme pasa el tiempo. Esto se le atribuye de nuevo al golpeteo y movimientos horizontales del muro debido a que no estaban bien unidos a la base.



*Figura 4.12 Gráfica aceleración-tiempo registradas por el acelerómetro en el ala derecha.*

#### **4.4 Prueba sísmica en la mesa de vibraciones del muro escalado de bloques de barro cocido**

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas sísmicas del muro de ladrillos de barro tipo U, el cual tiene una densidad similar al adobe. Estas pruebas no dieron resultados satisfactorios y por la limitante del tiempo no se construyeron más muros similares. Se presenta la metodología (Sección 3.6) y resultados preliminares para fines académicos.

El muro de ladrillos de barro tipo U fue colocado en la mesa sísmica (Figura 3.15) y se probó utilizando el sismo El centro (California, 8 de mayo de 1940) disponible en el software de la mesa.

El escalamiento del sismo fue hecho por el software que controla la mesa al agregar los datos del peso de la estructura y el desplazamiento máximo para la mesa. En la Figura 4.13 se observan los datos de los sensores de la mesa sísmica para el sismo escalado: aceleración (Figura 4.13a) y desplazamiento (Figura 4.13b).

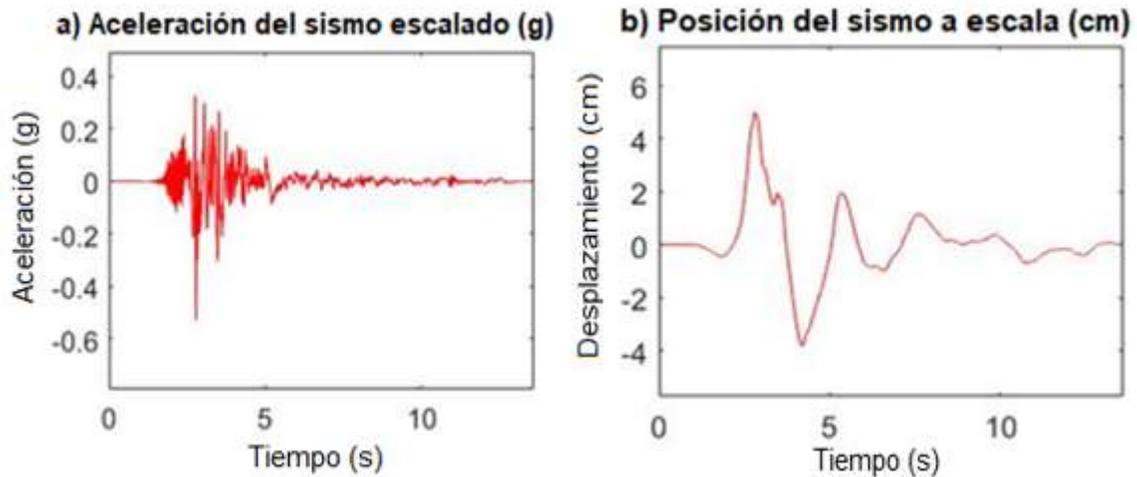
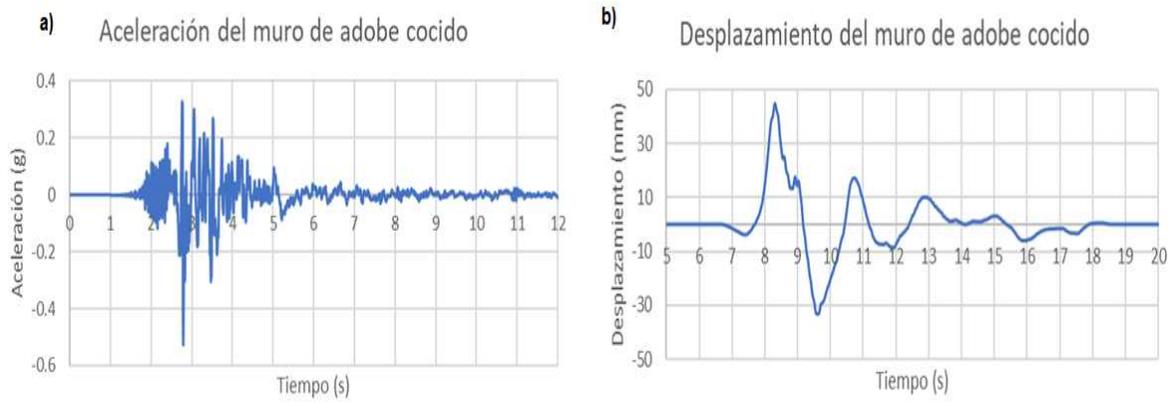


Figura 4.13 a) Aceleración y b) desplazamiento a escala del sismo El Centro realizado por la mesa sísmica.

La Figura 4.14 muestra los resultados, datos de los sensores fijados al muro (acelerómetro y LVDT). Los datos que arrojó el acelerómetro indican que la aceleración fue similar a la prevista por los datos de la mesa sísmica. En la Figura 4.14a se observa que la aceleración que fue inducida en el muro es, prácticamente, la misma aceleración que sufrió la mesa. En la Figura 4.14b se muestran los valores de los desplazamientos del prototipo medido mediante el LVDT en la parte superior del muro. Se observa, nuevamente, como en el caso de la aceleración, que los desplazamientos sufridos, tanto en la parte inferior como en la parte superior del muro, no tuvieron variaciones significativas y que presentan el mismo comportamiento dado por las aceleraciones de la onda producida por el sismo. Esto significa que la estructura se mantuvo rígida ya que se desplazó lo mismo en la base del muro que en la parte superior. La Figura 4.15 muestra el muro de bloques de barro después de la prueba sísmica. Se logró apreciar una grieta en las juntas en la esquina inferior, lo que nos indica que la energía producida en la mesa sísmica se propagó al muro; sin embargo, el daño fue mínimo, por lo que la prueba no fue satisfactoria.



*Figura 4.14 a) Aceleración y b) desplazamiento que sufrió el prototipo a escala del muro de adobe cocido durante el sismo El Centro en la mesa sísmica.*



*Figura 4.15 Muro de bloques de ladrillos de barro después de la prueba en mesa sísmica.*

#### 4.5 Simulación numérica del muro en U de concreto espumado.

Las simulaciones FEM de los muros tipo U de concreto espumado se realizaron para evaluar el comportamiento sísmico de los muros sin fibra (MSF) y con fibra (MCF), y usando densidades ya sea de 700, 900 o 1200 kg/m<sup>3</sup>. La Tabla 4.4 muestra las propiedades mecánicas usadas en el modelo. La resistencia a la compresión (esfuerzo máximo) y el esfuerzo residual a una deformación del 5% (fracción del esfuerzo máximo que sigue soportando la muestra después de la falla) para 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup> se obtuvieron por medio de las pruebas de compresión (Sección 4.1) mientras que las propiedades para 700 kg/m<sup>3</sup> se obtuvieron de la literatura [100]. El módulo elástico para todas las densidades se obtuvo de la literatura [95]. La simulación, con una duración de 3 segundos, se hizo con una onda sinusoidal con una amplitud de 50 mm y una frecuencia de 4 Hz.

*Tabla 4.4 Resultados de las pruebas de tensión con y sin fibra.*

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)	Esfuerzo residual a una deformación del 5% (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
MSF 700	1.4	1	1.2
MCF 700	1.6	1.2	1.2
MSF 900	2.5	1.5	1.6
MCF 900	3	1.8	1.6
MSF 1200	6.4	3	2.5
MCF 1200	7.3	3.25	2.5

La Figura 4.16 muestra la distribución de esfuerzos de Von Mises en el muro de concreto espumado fibrorreforzado con una densidad de 900 kg/m<sup>3</sup> a un tiempo  $t = 0$  (antes de iniciar la prueba) (Figura 4.16a) y a un tiempo  $t = 1.85$  s (Figura 4.16b vista isométrica, Figura 4.16c vista frontal), el cual corresponde a un ciclo completo de la onda sinusoidal, en donde el espécimen cambia de dirección de movimiento y se obtiene la máxima aceleración. Para poder apreciar la deformación de los muros, la deformación se escaló 50 veces en la dirección del movimiento (eje x, ver Figura 4.16a). Se puede observar que existe concentración de esfuerzos (indicado por flechas rojas en la Figura 4.16) en las esquinas del muro, principalmente en la parte superior. También se pueden observar bandas de esfuerzo diagonales (Figura 4.16b) en las alas de los muros debido a la deformación de

estos en esa zona. Estas zonas de alta concentración de esfuerzos observadas en la simulación corresponden a las fallas observadas durante la prueba sísmica experimental (Figura 4.10).

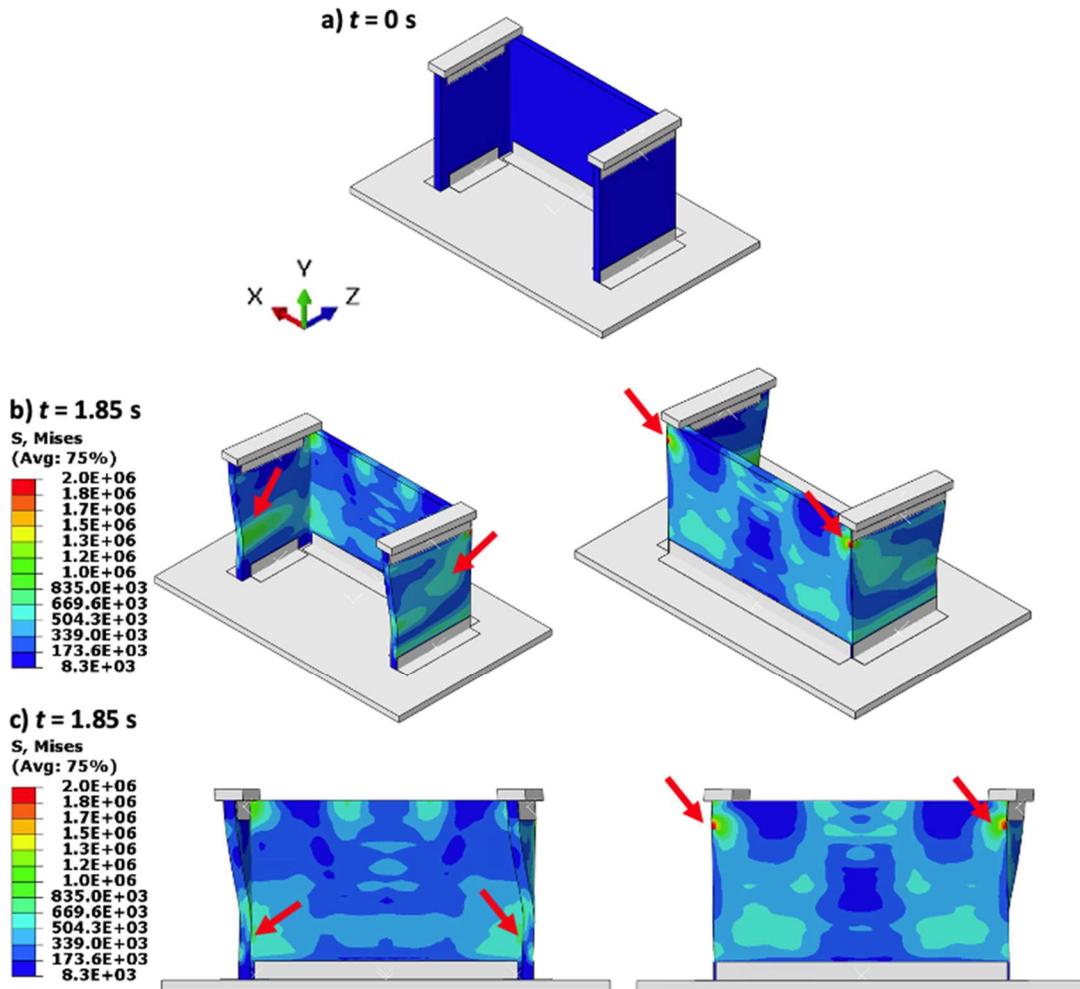


Figura 4.16 Visualización de la distribución de esfuerzos de Von Mises en el muro de concreto espumado fibrorreforzado de  $900 \text{ kg/m}^3$ . Las flechas rojas indican zonas de concentración de esfuerzos.

La Figura 4.17 muestra el contorno de desplazamiento en la dirección del movimiento (eje x, ver Figura 4.16a) en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup> a un tiempo  $t = 1.85$  s. Se puede observar que los desplazamientos (y deformaciones) mayores ocurren en los muros con una densidad de 1200 kg/m<sup>3</sup> a pesar de su mayor rigidez, lo cual se debe a alta densidad de los muros los cuales sufren una mayor carga inercial debido a las aceleraciones ocasionadas por la carga sísmica. También se puede observar que los muros de 900 kg/m<sup>3</sup> sufren desplazamientos ligeramente menores a los muros 700 kg/m<sup>3</sup> lo cual puede deberse a una buena combinación de rigidez (mayor módulo elástico que los muros de 700 kg/m<sup>3</sup>) y densidad (menor densidad que los muros de 1200 kg/m<sup>3</sup>).

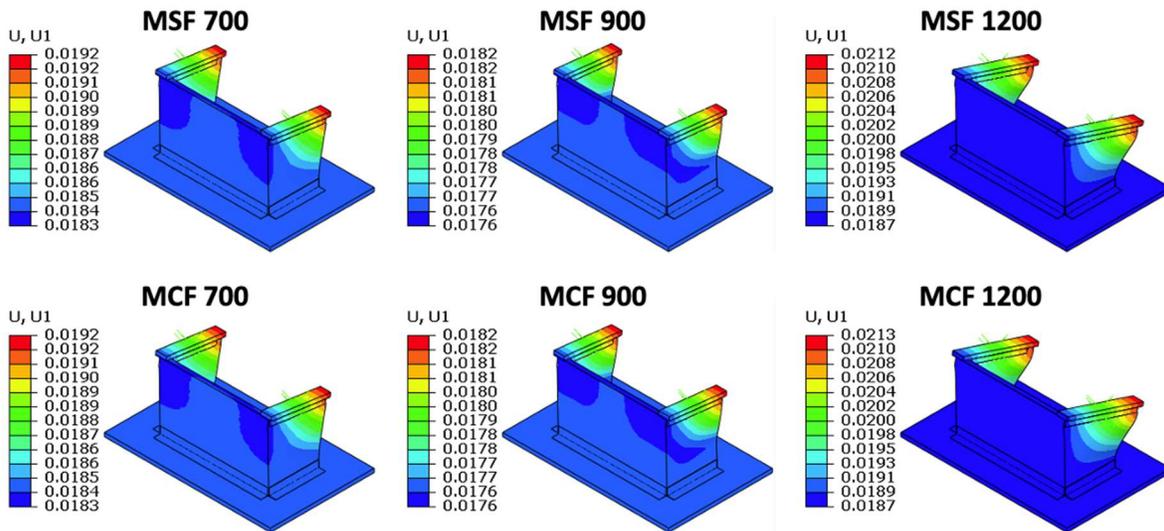


Figura 4.17 Visualización de los desplazamientos en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup> a un tiempo  $t = 1.85$  s.

La Figura 4.18 muestra la distribución de esfuerzos de Von Mises en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup> a un tiempo  $t = 1.85$  s. Se puede observar que las zonas de concentración de esfuerzos es la misma en todos los muros, independientemente de la densidad, es decir, en las esquinas de los muros (principalmente en la parte superior) y en bandas diagonales en las alas debido a la deformación. Se puede observar que, mientras que en los muros de 700 y 900

kg/m<sup>3</sup> existen esfuerzos distribuidos en todo el muro, en el muro de 1200 kg/m<sup>3</sup> los esfuerzos se concentran principalmente en las alas debido a la alta deformación que estas presentan por la alta densidad. Se puede observar también que para los muros con 700 y 900 kg/m<sup>3</sup> el nivel de esfuerzo ha sobrepasado la resistencia máxima, mientras que en el muro de 1200 kg/m<sup>3</sup> el nivel de esfuerzo es menor a su resistencia máxima al menos en este punto de la simulación.

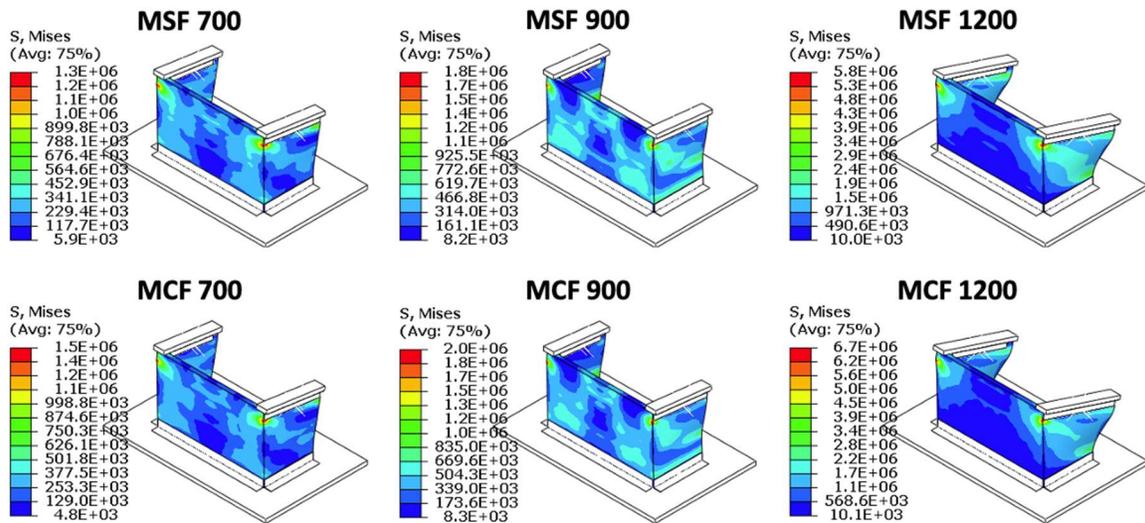


Figura 4.18 Visualización de la distribución de esfuerzos de Von Mises en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup> a un tiempo  $t = 1.85$  s.

Las Figuras 4.19 y 4.20 muestran la deformación plástica (PEEQ) en los muros de concreto espumado en un tiempo  $t = 1.85$  s y  $t = 3$  s, respectivamente. Las zonas de concentración de deformación plástica se indican con flechas rojas. Se puede observar en la Figura 4.19 ( $t = 1.85$  s) que los muros de 700 kg/m<sup>3</sup> son los que presentan una mayor PEEQ en comparación con las otras densidades. Es posible observar que el muro con fibra de 700 kg/m<sup>3</sup> presenta una menor PEEQ que el muro sin fibra lo cual muestra la ventaja del fibrorrefuerzo; sin embargo, la baja resistencia del muro de 700 kg/m<sup>3</sup> no permite que se siga deformando plásticamente. En la Figura 4.20, al final de la simulación ( $t = 3$  s), se puede observar que se ha acumulado más PEEQ en todos los muros. Los niveles más altos de PEEQ se encuentran en el muro de 700 kg/m<sup>3</sup>, seguido del muro de 900 kg/m<sup>3</sup>. El muro de 1200 kg/m<sup>3</sup>, presenta los niveles más bajos de PEEQ, lo cual se puede atribuir a la rigidez y resistencia a la compresión y tensión mayores en el muro. La Figura 4.20 confirma que los muros con fibras sufrieron menos PEEQ que los muros sin fibra.

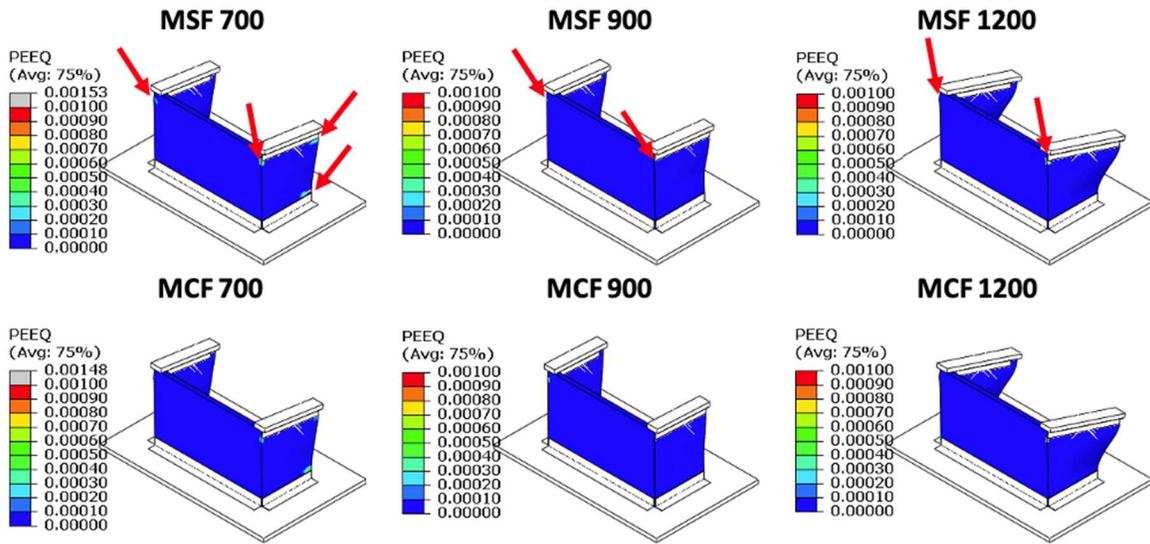


Figura 4.19 Visualización de la deformación plástica (PEEQ) en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup> a un tiempo  $t = 1.85$  s.

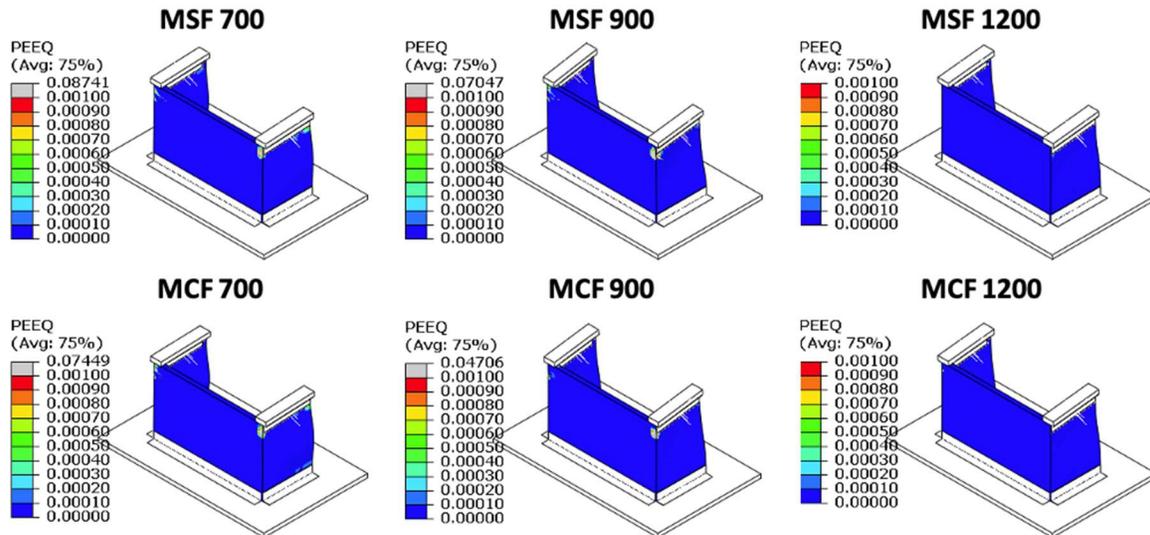


Figura 4.20 Visualización de la deformación plástica (PEEQ) en los muros de concreto espumado sin fibra (MSF) y con fibra (MCF) para las densidades de 700, 900 y 1200 kg/m<sup>3</sup> a un tiempo  $t = 3$  s.

Las simulaciones FEM mostraron que los muros de  $1200 \text{ kg/m}^3$  sufren una mayor deformación, concentración de esfuerzos en las alas y mayores niveles de esfuerzo que sus contrapartes de  $700$  y  $900 \text{ kg/m}^3$ , lo cual se atribuye a la mayor carga inercial debido a la mayor densidad de estos muros. Sin embargo, los muros de  $1200 \text{ kg/m}^3$  mostraron menores niveles de deformación plástica lo cual se debe a su mayor resistencia mecánica y rigidez. Debido a que no se implementó un modelo de falla en los muros, no es posible con estos resultados determinar si los muros de  $1200 \text{ kg/m}^3$  son los que tendrán un mejor desempeño sísmico. Los muros con fibra tuvieron un mejor desempeño que sus contrapartes sin fibra.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación demostraron que el empleo del concreto espumado fibrorreforzado presenta mejores propiedades mecánicas que el concreto espumado sin fibrorrefuerzo, variando en función de la densidad de éste. En las mezclas con fibra, para ambas densidades de  $900 \text{ kg/m}^3$  y  $1200 \text{ kg/m}^3$ , se observó una mejora en la resistencia a la compresión de 21% y 13%, respectivamente, en comparación con las mezclas que no tenían el fibrorrefuerzo.

En las pruebas a tensión, las mezclas de ambas densidades ( $900$  y  $1200 \text{ kg/m}^3$ ) fibrorreforzadas mejoraron su resistencia a la tensión en un 78% y 8%, respectivamente. Las fibras de henequén transfieren la carga de tensión manteniendo la unión del material al presentarse grietas en el concreto, de esta manera la resistencia a la tensión se incrementa antes de la fractura del material.

Los muros en forma de U de concreto espumado, probados en mesa sísmica, no fallaron de la forma en la que se esperaba por un agarre pobre entre la base y los muros durante la prueba, sin embargo, aun cuando los resultados de las pruebas no fueron satisfactorios, se pudo observar la falla de las alas de los muros debido al peso sobre ellas.

En cuanto a la prueba en la mesa sísmica del muro de adobe cocido fue posible observar que la estructura se mantuvo rígida ya que no hubo variaciones significativas en los desplazamientos medidos en la mesa sísmica y los medidos por el LVDT, así como en las aceleraciones dadas por la mesa sísmica en la parte inferior y las aceleraciones medidas mediante el acelerómetro en la parte superior. Esto pudo deberse a que las juntas de unión entre ladrillos tuvieron un espesor de aproximadamente el doble de lo que debió ser de acuerdo con el escalamiento geométrico.

En las simulaciones numéricas fue posible observar que los desplazamientos (y deformaciones) mayores ocurren en los muros con una densidad de  $1200 \text{ kg/m}^3$  a pesar de su mayor rigidez, ya que su alta densidad provoca una mayor carga inercial en los mismos debido a las aceleraciones ocasionadas por la carga sísmica. En los muros de  $900 \text{ kg/m}^3$  los desplazamientos fueron ligeramente menores a los muros  $700 \text{ kg/m}^3$  lo cual puede deberse a una buena combinación de rigidez (mayor módulo elástico que los muros de  $700 \text{ kg/m}^3$ ) y densidad (menor densidad que los muros de  $1200 \text{ kg/m}^3$ ).

Las zonas de concentración de esfuerzos es la misma en todos los muros, independientemente de la densidad, es decir, en las esquinas de los muros (principalmente en la parte superior) y en bandas diagonales en las alas debido a la deformación. En los muros de 700 y 900 kg/m<sup>3</sup> el esfuerzo está distribuido en todo el muro y en el muro de 1200 kg/m<sup>3</sup> los esfuerzos se concentran principalmente en las alas.

### **Recomendaciones**

- Para trabajos futuros se recomienda realizar pruebas de pull-out para determinar la longitud correcta de las fibras y realizar pruebas mecánicas con diferentes proporciones de fibra en los modelos a escala.
- Para pruebas a futuro en la mesa sísmica, se recomienda incrementar el número de tornillos que sujetan los muros a los perfiles en L y aumentar el número de tuercas por tornillo para generar un buen agarre que no sea afectado durante las vibraciones de la prueba cíclica sísmica. También se recomienda añadir diferentes pesos muertos sobre el muro que representen el peso de varios tipos de techos de una vivienda y tener una mejor visión del comportamiento del muro bajo cargas sísmicas.
- Para las pruebas sísmicas de muros de mampostería a escala reducida se recomienda realizar el pegado de las piezas teniendo mucho cuidado de mantener el espesor del mortero según el escalamiento, ya que se puede tener un espesor muy grueso que no represente la escala real.
- Para las simulaciones computacionales se recomienda implementar un modelo de falla en los muros para poder determinar cuál de los muros tendría un mejor desempeño sísmico.
- Se recomienda hacer simulaciones computacionales de los muros en forma de U con diferentes diseños que tengan el potencial de reducir la concentración de esfuerzos en las esquinas, como por ejemplo, esquinas curvas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Meli, *Cuadernos de investigación 17 "Seguridad sísmica de la vivienda económica"*, edición electrónica, CENAPRED, Distrito Federal, 2014, 3-23.
- [2] L. F. Guerrero Baca y J. G. Boto de Matos Caeiro, El legado de la construcción tradicional con tapial, *La Gaceta del Instituto del Patrimonio Cultural del Estado de Oaxaca*, 24, 4-11, 2013.
- [3] L. F. Guerrero Baca, Potencial ecológico de la edificación con adobe, *Gremium*, 1 (1), 23-35, 2014.
- [4] M. Blondet, G. Villa García, S. Brzev, A. Rubiños, en *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial*, M. Greene, segunda edición; Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, 2011, 1-25.
- [5] Sistema Sismológico Nacional, Zona de subducción mexicana y su potencial para un sismo mayor, Sistema Sismológico Nacional. Consultado: 12 de febrero de 2019. <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismoMayor.pdf>.
- [6] I. Islas Arredondo y M. K. Sánchez Correa, Sismos 2017. Diagnósticos y propuestas para la reconstrucción, Instituto Belisario Domínguez (Senado de la República), primera edición, Ciudad de México, 2018, 13-24.
- [7] Radios Sarmex, Sismicidad en Oaxaca, mitos y verdades. Fortalecimiento de la cultura de protección civil y mecanismos de alertamiento 2017, Protección Civil Oaxaca. Consultado: 15 de abril de 2019. <http://www.proteccioncivil.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/2017/09/RadiosSarmex2017>.
- [8] Servicio Geológico Mexicano, Sismología de México, Servicio Geológico Mexicano, UNAM, septiembre 2017. Consultado: 04 de junio de 2019. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>.
- [9] J. Aguilar Carboney, R. González Herrera, A. Ruiz-Sibaja y R. Cruz, análisis de vulnerabilidad de las construcciones del centro histórico de Tapachula y Tuxtla

- Gutiérrez, Chiapas, en XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 2008, 1-18.
- [10] R. González Herrera, J. Aguilar Carboney y C. Gómez Soberón, Análisis de vulnerabilidad de viviendas de adobe en Chiapas y alternativas para su reparación, en 4th International Conference on Structural Defects and Repair, University of Aveiro, Portugal, 2008, 263219841.
- [11] Van 96 muertos por sismo; en Chiapas y Oaxaca, 80 mil casas dañadas, Ángulo7, Septiembre 2017. Consultado: 14 de agosto de 2019. <https://www.angulo7.com.mx/2017/09/11/van-96-muertos-sismo-chiapas-oaxaca-80-mil-casas-danadas/>.
- [12] Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. *Cartilla de reconstrucción para vivienda de adobe*, Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, Distrito Federal, 1986, 1-80.
- [13] O. Hernández, R. Meli, M. Padilla y E. Valencia, Refuerzo de la vivienda económica en zonas sísmicas, *Instituto de Ingeniería: UNAM*, 441, 1-90, 1981.
- [14] O. Cardona, L. Yamín, C. Phillips, J. Reyes, S. Rivero y S. Arias, *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, 2001, 60-83.
- [15] H. Mizuno, T. Fukuta, I. Ohkawa y M. Eliba, A Monotonic lateral loading test of adobe wall specimens, *Building Research Institute, Ministry of Construction*, (124), 20, 1988.
- [16] A. Salgado, Daños por sismo esperados en las viviendas tradicionales de ciertos centros históricos del sureste mexicano, en Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Distrito Federal, 2005, artículo II-04, CD.
- [17] S. Alcocer, H. Gallegos, D. Vasconcelos, T. Sánchez, O. De la Torre, E. Miranda, O. Hernández, R. Jean, J. Pérez, T. Sánchez, M. Faradji, S. Duarte y R. Einbenschutz, *Edificaciones de mampostería para vivienda*, Fundación ICA, Distrito Federal, 1999, 457-554.

- [18] C. Modena, *Italian practice in evaluating, strengthening, and retrofitting masonry buildings*, en Proceedings of an International Seminar on Evaluating, Strengthening, and Retrofitting Masonry Buildings, The Masonry Society, 1989, 1-25.
- [19] V. Morales, T. Caballero y M. Ortiz, Ventajas del reforzamiento de muros de bloques de tierra compactados (BTC), como opción para el rescate de viviendas rurales, *Informes de la construcción*, 62 (518), 25-32, 2010.
- [20] M. Tomazevic, M. Lutman y P. Weiss, Seismic upgrading of old-brick masonry urban houses tying of walls steel ties, *Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute*, 3 (12), 599-622, 1996.
- [21] A. Tena Colunga, Enseñanzas principales durante sismos recientes, en Seminario Anual Riesgo Terremoto y Huracán, ERN-Hannover Re, 2004, 51-87.
- [22] M. Blondet, D. Torrealva y G. Villa García, Earthquake Resistant Design Criteria and Testing of Adobe Buildings at Pontificia Universidad Católica del Perú, en Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium, The Getty Conservation Institute, 2006, 3-10.
- [23] L. Ruíz, V. Morales y T. Caballero, Ensayo de flexión lateral en muretes de adobe compactado reforzados con mallas de acero, en Memorias de Sísmica 2004 - 6° Congreso Nacional de sismología e engenharia sísmica, Universidade do Porto, 2004, 543- 555.
- [24] M. Blondet, J. Vargas, N. Tarque, J. Soto, C. Sosa y J. Sarmiento, Refuerzo sísmico de mallas de sogas sintéticas para construcciones de adobe, en 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, Ecuador, 2015, 67-80.
- [25] Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008. Consultado: 23 de octubre de 2019. <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/739.pdf>
- [26] B. Borah, S. Singhal y H. Kaushik, Sustainable housing using confined masonry buildings, *SN Applied Sciences*, 1 (9), 983, 2019.
- [27] E. Ferretti y G. Pascale, Combined Strengthening Techniques to Improve the Out-of-Plane Performance of Masonry Walls, *Materials*, 12 (7), 1171, 2019.

- [28] F. Sciarretta, Seismic Retrofitting of Traditional Masonry with Pultruded FRP Profiles, *Applied Sciences*, 10 (7), 2489, 2020.
- [29] H. M. Banadaki, R. Morshed y A. Eslami, In-plane cyclic performance of adobe walls retrofitted with near-surface-mounted steel rebars, *Engineering Structures*, 194, 106-119, 2019.
- [30] M. Corradi, G. Castori, R. Sisti, A. Borri y G. L. Pesce, Repair of Block Masonry Panels with CFRP Sheets, *Materials*, 12 (15), 2363, 2019.
- [31] K. Dong, Z.-a. Sui, J. Jiang y X. Zhou, Experimental Study on Seismic Behavior of Masonry Walls Strengthened by Reinforced Mortar Cross Strips, *Sustainability*, 11 (18), 4866, 2019.
- [32] D. Domínguez-Santos, D. Mora-Melia, G. Pincheira-Orellana, P. Ballesteros-Pérez y C. Retamal-Bravo, Mechanical Properties and Seismic Performance of Wood-Concrete Composite Blocks for Building Construction, *Materials*, 12 (9), 1500, 2019.
- [33] M. Tomažević y M. Gams, Shaking table study and modelling of seismic behaviour of confined AAC masonry buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10, 863-893, 2011.
- [34] M. Tomažević y M. Gams, Seismic behaviour of confined autoclaved aerated concrete masonry buildings: A shaking table study, *Mauerwerk*, 14 (3), 153-160, 2010.
- [35] T. Dunn, G. Van Zijl y A. Van Rooyen, Investigating a reinforced lightweight foamed concrete walling system for low-rise residential buildings in moderate seismic regions, *Journal of Building Engineering*, 20, 663-670, 2018.
- [36] F. Jafari y B. Badarloo, Finite Element Analysis and ANFIS investigation of seismic behavior of sandwich panels with different concrete material in two story steel building, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 13 (50), 209-230, 2019.
- [37] O. Rezafari, M. Taribakhsh y A. Tehranian, Dynamic behavior of 3D-panel single-storey system using shaking table testing, *Engineering Structures*, 30 (2), 318-337, 2008.

- [38] I. Ricci, M. Palermo, S. Silvestri, G. Gasparini, T. Trombetti, D. Foti y S. Ivorra, Shake table response of a full-scale 3-storey building composed of thin reinforced concrete sandwich walls, en *Memorias del First International Conference on Reliability and Safety of Engineering Systems and Structures*, Advanced Engineering Solutions, 2013, 29-41.
- [39] M. Blondet, D. Torrealva, G. García, F. Ginocchio y I. Madueño, Using Industrial Materials for the Construction of Safe Adobe Houses in Seismic Areas, *Proceedings of Earthbuild 2005: Conference Held at the Faculty of Design, Architecture and Building*, University of Technology, Earthbuild, 2005, 76-90.
- [40] E. Flores Johnson y Q. Li, Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces, *Composite structures*, 94 (5), 1555-1563, 2012.
- [41] J. F. Castillo Lara, Estudio de materiales compuestos livianos tipo sándwich con núcleo de concreto espumado para aplicaciones estructurales, Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México, 2019.
- [42] G. Guzmán. Cómo se clasifican los sismos según su magnitud e intensidades, *biobiochile*, marzo, 2011. Consultado: 22 de enero de 2019. [https://www.biobiochile.cl/noticias/2011/03/29/como-se-clasifican-los-sismos-segun-su-magnitud-e-intensidad.shtml?fb\\_comment\\_id=1097921556](https://www.biobiochile.cl/noticias/2011/03/29/como-se-clasifican-los-sismos-segun-su-magnitud-e-intensidad.shtml?fb_comment_id=1097921556).
- [43] N. Carazo. ¿Qué es la aceleración sísmica?, *NC arquitectura*, marzo 2012. Consultado: 29 de marzo de 2020. <http://ncarquitectura.com/que-es-la-aceleracion-sismica/>.
- [44] M. Romero, Estudio del comportamiento estructural de paneles sándwich empleados en el carenado de aviones comerciales, Tesis de licenciatura, España, 2010.
- [45] S. Poveda Martínez, *Representación normalizada de piezas de material compuesto*, OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Madrid, edición digital, Madrid, 2002, 1-23.

- [46] ACI Committee 523, ACI 523.3R-14 , Guide for cellular concretes above 50 lb/ft<sup>3</sup> (800 kg/m<sup>3</sup>), American Concrete Institute, Documento técnico, 2014, 2-16.
- [47] K. Ramamurthy, E. Kunhanandan y G. Siva, A classification of studies on properties of foam concrete, *Cement & concrete composites*, 31 (6), 388-396, 2009.
- [48] Y. Mugahed Amran, Nima Farzadnia y A. Abang Ali, Properties and applications of foamed concrete; a review, *Construction and Building Materials*, 101 (1), 990-1005, 2015.
- [49] H. A. Mohaged Yahya, Determination of Structural Behavior of Precast Foamed Concrete Sandwich Panel, PhD Thesis, Universiti Putra Malaysia, Malasia 2016.
- [50] A. J. Hamad, Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lighthweight Concrete: Review, *International Journal of Materials Science and Engineering*, 2 (2), 152-157, 2014.
- [51] H. K. Kim, J. H. Jeon y H. K. Lee, Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air, *Construction and Building Materials*, 29, 193-200, 2012.
- [52] S. Ganesan, M. A. Othuman Mydin, M. Y. Mohd Yunos y M. N. Mohd Nawi, Thermal Properties of Foamed Concrete with Various Densities and Additives at Ambient Temperature, *Applied Mechanics and Materials*, 747, 230-233, 2014.
- [53] E. Kearsley y M. Visagie, Properties of Foamed Concrete as Influenced by air-void parameters, *Concrete Beton*, 101, 8-14, 2002.
- [54] M. Othuman y Y. Wang, Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete, *Construction and Building Materials*, 25 (2), 705-716, 2011.
- [55] K. A. Mohd Sari y A. R. Mohammed Sani, Applications of Foamed Lightweight Concrete, *MATEC Web of Conferences*, 97, 1097, 2017.
- [56] A. Cervantes Abarca, Nuevas tecnologías en concretos: concreto celular, concreto reforzado con fibras, concreto ligero estructural, en Memorias del Congreso nacional de administración y tecnología para la arquitectura, ingeniería y diseño, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 2008, 141-162.

- [57] A. M. Neville y J. J. Brooks, *Concrete Technology*, Segunda ed., Malasia: Pearson Education Limited, Harlow, 2010, 339-410.
- [58] F. Zollo y C. Hays, Engineering Material Properties of a Fiber Reinforced Cellular Concrete, *ACI Materials Journal*, 95 (5), 631-635, 1998.
- [59] B. Arisoy y H.-C. Wu, Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA, *Construction and Building Materials*, 22 (4), 635-645, 2008.
- [60] D. Atoyebi Olumoyewa, O. Odeyemi Samson, A. Bello Sefiu y O. Ogbeifun Cephas, Splitting Tensile Strength Assessment of Lightweight Foamed Concrete Reinforced with Waste Tyre Steel Fibre, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9 (9), 1129-1137, 2018.
- [61] K. Joseph, R. D. Toledo Filho, B. James , S. Thomas y L. Hecher de Carvalho, A review on sisal fiber reinforced polymer composites, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3 (3), 367-379, 1999.
- [62] M. A. Othuman Mydin, N. M. Noordin, N. Utaberta, M. Y. Mohd Yunos y S. Segeranazan, Physical properties of foamed concrete incorporating coconut fibre, *Jurnal Teknologi*, 78 (5), 99-105, 2016.
- [63] F. J. Quiñonez de la Cruz, E. V. Ayala Zapata, J. M. Gómez Vásquez, S. A. Gómez Palacios y L. E. Morales Aguirre, Evaluación Experimental de matrices fibro-reforzadas con desechos del fruto de coco (*Cocos Nucifera* L.) y de paneles para construcción de vivienda económica (sistema constructivo de matriz-fibro-reforzada Pancoco), Informe final, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2009.
- [64] C. Frazao, J. Barros, R. Toledo, S. Ferreira y D. Goncalves, Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement composites and fiber-reinforced lightweight concrete, *Cement and concrete composites*, 86, 206-223, 2018.
- [65] R. Park, A Perspective on the Seismic Design of Precast Concrete Structures in New Zealand, *PCI journal*, 40 (3), 40-60, 1995.

- [66] L. Chica y A. Alzate, Cellular concrete review: New trends for application in construction, *Construction and Building Materials*, 200 (10), 637-647, 2019.
- [67] M. Amran, Y. Huei Lee, N. Vatin, R. Fediuk, S. Poi-Ngian, Y. Yong Lee y G. Murali, Design Efficiency, Characteristics, and Utilization of Reinforced Foamed Concrete: A Review, *Crystals*, 10 (10), 948, 2020.
- [68] F. J. Crisafulli, J. Restrepo y R. Park, Seismic Design of Lightly Reinforced Precast Concrete Rectangular Wall Panels, *PCI Journal*, 47 (4), 104-121, 2002.
- [69] A. S. Pall, C. Marsh y P. Fazio, Friction Joints for seismic control of large panel structures, *PCI Journal*, 25 (6), 38-61, 1980.
- [70] T. P. Andrew Dunn, *Precast Lightweight foamed concrete walling, a structural system for low-rise residential buildings*, Tesis de maestría, Stellenbosch, Sudáfrica: Stellenbosch University, 2017.
- [71] Z. Xu, Z. Chen, B. H. Osman y S. Yang, Effect of a new type of high-strength lightweight foamed concrete on seismic performance of cold-formed steel shear walls, *Construction and Building Materials*, 181, 287-300, 2018.
- [72] M. A. Othuman Mydin y Y. C. Wang, Structural performance of lightweight steel-foamed concrete–steel composite walling system under compression, *Thin-Walled Structures*, 49 (1), 66-76, 2011.
- [73] M. A. Othuman Mydin, Potential of Using Lightweight Foamed Concrete in Composite Load-Bearing Wall Panels In Low-Rise Construction, *Concrete Research Letters*, 2 (2), 213-227, 2011.
- [74] Análisis de elementos finitos, Autodesk. Consultado: 5 de noviembre de 2019. <https://www.autodesk.mx/solutions/finite-element-analysis>.
- [75] L. Alonso San José, *Aplicación del método de elementos finitos extendido a la propagación de fisuras en vigas cilíndricas*, tesis de licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2015.
- [76] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, Fourth ed., Thomson Canadá, 2007, 1-24.

- [77] M. Alhizaji, Q. Zeeshan, Z. Qin, B. Safaei y M. Asmel, Finite element analysis of natural fiber composites: A review, *Nanotechnology Reviews*, 9 (1), 853-875, 2020.
- [78] N. Ile y J. M. Reyouard, Behaviour of U-Shaped walls subjected to uniaxial and biaxial cyclic lateral loading, *Journal of Earthquake Engineering*, 9 (1), 67-94, 2005.
- [79] E. A. Flores-Johnson, B. A. Company-Rodríguez, J. F. Koh-Dzul y J. G. Carrillo-Baeza, Shaking Table Test of U-Shaped Walls Made of Fiber-Reinforced Foamed Concrete, *Materials*, 13 (11), 2534, 2020.
- [80] I. Anastasopoulos, T. Georgarakos, V. Georgiannou, V. Drosos y R. Kourkoulis, Seismic performance of bar-mat reinforced-soil retaining wall: Shaking table testing versus numerical analysis with modified kinematic hardening constitutive model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (10), 1089-1105, 2010.
- [81] T. Baran, A. K. Tanrikulu y C. Dundar, Construction and performance test of a low-cost shake table, *Experimental Techniques*, 35 (4), 8-16, 2011.
- [82] J. Carrillo, N. M. Bernal Ruíz y P. Porras, Design evaluation os a small shake table for tests on earthquake-resistant enginnnering, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23 (1), 89-105, 2013.
- [83] P. Agüero-Barrantes, E. Montalto-Bolaños y Y. Liu-Kuan, Experimentos a pequeña escala usando mesa vibratoria y su comparación con predicciones analíticas, manual del estudiante, informe técnico, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2015.
- [84] J. Apkarian, M. Lévis y A. Molki, *Laboratory guide. Shake Table II for MATLAB/Simulink Users*. Quanser Inc., Ontario, 2017, 4-34.
- [85] Quanser Inc., *User Manual Shake Table II*, Quanser Inc., Ontario, 2014, 4-22.
- [86] Quanser, Quanser Shake Table II, *System overview*, Quanser Inc., presentación electrónica, 2017, 1-13.
- [87] M. Rodríguez y J. restrepo, Práctica y diseño sísmico de edificios en México - cambios necesarios, *Ingeniería Sísmica*, (86), 89-118, 2012.

- [88] M. Torres Búa, Rigidez, Xunta de Galicia, Consellería de Cultura, Educación e Ordenación Universitaria. Consultado: 13 de mayo de 2020. [https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/52\\_rigidez.html#:~:text=Rigidez%20es%20la%20capacidad%20que,se%20dice%20que%20son%20deformables.](https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/52_rigidez.html#:~:text=Rigidez%20es%20la%20capacidad%20que,se%20dice%20que%20son%20deformables.)
- [89] M. Domínguez Caicedo, Períodos de vibración de las edificaciones, *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 8 (2), 1-13, 2014.
- [90] J. Janney, J. Breen, H. Geymayer, W. Lockman, M. Rocha, The Use of models in structural engineering, *ACI Symposium Publication*, 24, 1-18, 1970.
- [91] Á. Rodríguez, Modelación Estructural Para Cargas Sísmicas, *Revista Facultad De Ingeniería*, 16 (23), 25-37, 2007.
- [92] D. Zafra Pinacho y J. M. Gastéllum Alvarado, Catálogo de la vivienda vernácula en el estado de Oaxaca. Caso: distrito de Tlacolula, *Estudios sobre conservación, restauración y museología*, 2, 167-181, 2015.
- [93] A. De Leo, *Catálogo de arquitectura vernácula de Oaxaca*, Primera ed., Secretaría de las Culturas y Artes de Oaxaca, Oaxaca, 2015, 14-18
- [94] M. Blanco, Criterios fundamentales para el diseño sismorresistente, *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, 27 (3), 71-84, 2012.
- [95] M. Koztowski y M. Kadela, Mechanical Characterization of Lightweight Foamed Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 6801258, 2018.
- [96] E. Smith y G. Austin, *Adobe, pressed-earth, and rammed-earth industries in New Mexico*, New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources, Nuevo México, 1989, 7-60.
- [97] M. Arroyo, S. Sánchez Tizapa y P. Catalán Quiroz, Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México, *Ingeniería*, 17 (3), 167-177, 2013.

- [98] D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi y E. Gugliandolo, Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density, *Construction and Building Materials*, 198, 479-493, 2019.
- [99] E. A. Flores Johnson , Q. M. Li y R. A. W. Mines, Degradation of Elastic Modulus of Progressively Crushable Foams in Uniaxial Compression, *Journal of Cellular Plastics*, 44 (5), 415-434, 2008.
- [100] J. F. Castillo Lara, E. A. Flores Johnson, A. Valadez González, P. J. Herrera Franco, J. Gonzalez Carrillo, P. I. González Chí y Q. M. Li, Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Foamed Concrete, *Materials*, 13 (14), 3060, 2020.