



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Materiales Poliméricos

ESTUDIO DE MUROS ALIGERADOS CON UN DISEÑO BASADO EN LA ESTRUCTURA DE
LA CONCHA NÁCAR PARA APLICACIONES EN ZONAS SÍSMICAS

Tesis que presenta:

MANUEL JESÚS MENA OSORIO

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS

(MATERIALES POLIMÉRICOS)

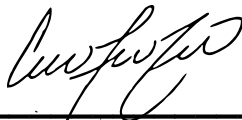
Mérida, Yucatán, mayo de 2021



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Manuel Jesús Mena Osorio** titulado “**Estudio de muros aligerado con un diseño basado en la estructura de la concha nácar para aplicaciones en 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. Juan Vicente Méndez Méndez, 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:  _____

Manuel Jesús Mena Osorio

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada número 903365.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo a través del proyecto No. A1-S-8864 de la Convocatoria de Ciencia Básica 2017-2018.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. por la oportunidad de estudiar la maestría en materiales poliméricos y por permitirme usar las instalaciones y equipos.

Al director de tesis, el Dr. Emmanuel Alejandro Flores Johnson por aceptarme en su equipo de trabajo y el apoyo brindado.

Al codirector de tesis, el Dr. Juan Vicente Méndez Méndez, a la Dra. Eliana Mabel Agaliotis y al Dr. Gonzalo Carrillo Baeza por sus observaciones en la realización de la tesis.

Al M.C. Francisco Koh Dzul por su apoyo en la realización de las pruebas y uso de los equipos de laboratorio.

DEDICATORIA

A Dios. Colosenses 3:17 "Y todo lo que hacéis, sea de palabra o de hecho, hacedlo todo en el nombre del Señor Jesús, dando gracias a Dios Padre por medio de él".

A mi mamá María y a mi hermanito José, por ser parte importante en mi vida.

A la ayuda idónea que Dios me mandó, Yamili, por apoyarme en todo momento.

Contenido

RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	3
1.1 El biomimetismo.....	3
1.2 El uso del biomimetismo para el diseño de muros	5
1.3 El uso de simulaciones computacionales para el diseño de muros	8
1.4 El uso de materiales aligerados para aplicaciones sísmicas	11
1.5 Metodología para construir el prototipo	13
1.5.1 Mesa de vibración.....	14
1.5.2 Elección de la escala geométrica.....	16
1.6 Hipótesis.....	17
1.7 Objetivos.....	18
1.7.1 Objetivo general	18
1.7.2 Objetivos específicos.....	18
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	19
2.1 Sismos y aceleración sísmica	19
2.2 Zonas sísmicas en el país.....	20
2.3 Mesa vibratoria	21
2.4 Concreto	22
2.5 Concreto ligero	23
2.6 Análisis por el método de elementos finitos	25
2.7 Análisis de método de elementos finitos en Abaqus	27
2.8 Modelado en Abaqus	28
2.8.1 Modelado de espumas usando el modelo de Crushable Foams [49].....	29
2.8.2 Comportamiento cohesivo de contacto.....	30

2.9 Justificación	31
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	32
3.1 Procedimiento de elaboración del muro con bloques rectangulares y bloques con ángulo	32
3.1.1 Diseño de un muro bioinspirado	32
3.1.2 Fabricación de los muros.....	33
3.2 Prueba mecánica de compresión diagonal de los muros de bloques	36
3.3 Pruebas de tensión y compresión del concreto espumado	38
3.4 Muro de ladrillos de barro y validación en la mesa sísmica.....	39
3.5 Simulaciones numéricas	41
3.5.1 Generación de los modelos de bloques rectangulares y bloques con ángulo	41
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	47
4.1 Resultados experimentales.....	47
4.1.1. Resultados experimentales de la prueba de compresión diagonal de los muros de bloques de concreto espumado.....	47
4.2 Resultados de la validación experimental del muro de ladrillos de barro en la mesa sísmica	51
4.3 Resultados de las simulaciones numéricas.....	53
4.3.1. Resultados de la simulación de la prueba de compresión diagonal en los muros de 15 x 15 cm.....	53
4.3.2. Resultados de la simulación de la prueba de tensión en los muros de 20 cm x 30 cm	56
4.3.3 Resultados de la distribución de esfuerzos producido en el muro de bloques rectangulares y bloques con ángulo de 40 cm x 30 cm	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA	63

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1 Muros modelados para analizarse independientemente [13]	9
Tabla 1.2 Escala geométrica [22]	16
Tabla 2.1 Escala Richter utilizada para determinar la energía liberada en un sismo [23].....	19
Tabla 2.2 Escala de Mercalli y su equivalente en aceleración sísmica [24]	20
Tabla 2.3 Aplicaciones del concreto espumado [40].....	25
Tabla 3.1 Propiedades cohesivas.....	45
Tabla 4.1 Resultados experimentales de la prueba de compresión diagonal.....	48
Tabla 4.2 Propiedades de la prueba de compresión.....	50
Tabla 4.3 Propiedades de la prueba de tensión	51
Tabla 4.4 Resultados del sismo El Centro aplicado al muro de ladrillos	52

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Cubo de agua, Beijing, China [6]	3
Figura 1.2 Eastgate Building Harare, centro comercial y edificio de oficinas [9].....	4
Figura 1.3 Estructura de la concha nácar	5
Figura 1.4 Desplazamiento horizontal en ladrillos comunes y ladrillos ligeramente ondulados [10].....	6
Figura 1.5 Pared de la casa estándar: una sola grieta conduce a un fracaso catastrófico [10]	6
Figura 1.6 Estructura ondulada, disipa energía, llevando a un fallo más estable y progresivo [10]	7
Figura 1.7 Modelo de ancho finito: (a) mallas y condiciones de contorno; (b) deformación uniforme; (c) deformación no uniforme (descompresión).....	7
Figura 1.8 Localización de la falla de paredes con relaciones de aspectos igual 2, 1 y 0.5 [12] ..	8
Figura 1.9 Modelado de habitación y de las cargas externas a las que se somete [13].....	9
Figura 1.10 a) Diagrama de esfuerzo sobre el muro TI, b) Diagrama de desplazamiento sobre el muro TI, c) Diagrama de esfuerzo sobre la habitación (carga normal), d) Diagrama de desplazamiento sobre la habitación (carga normal), e) Diagrama de esfuerzo sobre la habitación (sismo), f) Diagrama de desplazamiento sobre la habitación (sismo) [13]	10
Figura 1.11 Cilindros de concreto fibroreforzados [17]	12
Figura 1.12 a) Esquema de la pared en forma de U que muestra los detalles geométricos; b) esquema del molde de madera; c) colada de hormigón celular; y d) muestra de pared en forma de U	12
Figura 1.13 Mesa vibratoria Shake Table II	14
Figura 1.14 Programa Matlab para operación de la mesa de vibración	15
Figura 1.15 Transformador diferencial variable lineal (LVDT) para el sensor de movimiento.....	15
Figura 1.16 Acelerómetro	15
Figura 2.1 Zonas sísmicas de la República Mexicana	21
Figura 2.2 Modelo de vivienda instrumentado [28]	22
Figura 2.3 Aplicación de la fuerza lateral en el muro de mampostería.....	26
Figura 2.4 Curvas de desplazamiento de carga.....	26
Figura 2.5 Pasos del método de elementos finitos [47].....	28
Figura 2.6 Respuesta típica de tracción-separación [53]	30
Figura 3.1 Diseño de muros con bloques rectangulares y con ángulo	32
Figura 3.2 Elaboración de la mezcla de concreto espumado para la fabricación de los muros..	33
Figura 3.3 Moldes para las muestras.....	34

Figura 3.4 a) Placas de concreto espumado y corte de las mismas, b) Elaboración de muros de bloques con concreto espumado.....	35
Figura 3.5 Muros de concreto espumado de 20 cm x 30 cm	35
Figura 3.6 Muros de bloques rectangulares y con ángulo de concreto espumado de 15 cm x 15 cm	36
Figura 3.7 Soportes para prueba de compresión diagonal	36
Figura 3.8 Diagrama de la prueba de compresión diagonal [56].....	37
Figura 3.9 Prueba de compresión diagonal	37
Figura 3.10 a) Máquina Shimadzu AG1, b) Prueba de compresión, c) Prueba de tensión.....	38
Figura 3.11 a) Molde con cimbra, b) Colocación de aceite en la cimbra.	39
Figura 3.12 a) Cemento y arena, b) Realización de la mezcla.....	39
<i>Figura 3.13 a) Armado del muro, b) Muro terminado</i>	40
Figura 3.14 Elementos para la validación del "Prototipo estándar"	41
Figura 3.15 a) Bloque rectangular completo, b) Medio bloque rectangular	41
Figura 3.16 a) Bloque con una cara con ángulo, b) Bloque con ambas caras con ángulo, c) Bloque mitad del bloque uno, d) Bloque mitad del bloque 2	42
Figura 3.17 Muro cuadrado de 15 cm x 15 cm	43
Figura 3.18 Muro rectangular de 20 cm x 30 cm.....	43
Figura 3.19 Muro rectangular de 40 cm x 30 cm.....	43
Figura 3.20 Restricciones en la prueba de compresión diagonal, muro de 15 cm x 15 cm para ambos tipos de bloques.....	44
Figura 3.21 Restricciones en el mudo de 20 cm x 30 cm para ambos tipos de bloques	44
Figura 3.22 Muro de 40 cm x 30 cm con ambos tipos de bloques para prueba sísmica	45
Figura 4.1 Resultados de prueba de compresión diagonal de muros de concreto espumado de a) bloques rectangulares y b) bloques con ángulo.....	47
Figura 4.2 Muestras de muros de a) bloques rectangulares y b) bloques con ángulo después de la prueba de compresión diagonal.....	49
Figura 4.3 Resultados de la prueba de compresión del concreto espumado para densidad de 1200 kg/m ³	50
Figura 4.4 Resultados de prueba de tensión de concreto espumado para densidad de 1200 kg/m ³	51
Figura 4.5 Prototipo estándar después de la validación experimental, vista frontal	52
Figura 4.6 Distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) para diferentes desplazamientos verticales: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.....	53

Figura 4.7 Comparación de los resultados experimentales y numéricos de la prueba de compresión diagonal para a) muros con bloques rectangulares y b) muros con bloques con ángulo.	54
Figura 4.8 Daño en las juntas (interfaces) entre los bloques para: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.	55
Figura 4.9 a) Desplazamientos horizontales (U1) a) en el muro de bloques rectangulares, b) en el muro de bloques con ángulo.	56
Figura 4.10 Curvas esfuerzo-deformación de las simulaciones de la prueba de tensión para muros con bloques rectangulares y muros con bloques con ángulo.	57
Figura 4.11 Distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) al momento de la primera falla en: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.	57
Figura 4.12 Daño en las juntas (interfaces) al momento de la primera falla en: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.	58
Figura 4.13 Distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) para los muros sometidos a una carga sísmica sinusoidal en un tiempo $t=1$ s y al momento de la falla: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.	59
Figura 4.14 Daño en las juntas (interfaces) entre los bloques para los muros sometidos a una carga sísmica sinusoidal en al momento de la falla y posterior a la falla: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.	60

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es estudiar el desempeño mecánico de un muro bioinspirado en la estructura jerárquica de la concha nácar con el fin de mejorar la distribución de los esfuerzos y evitar la propagación de líneas de falla cuando la estructura es sometida a cargas mecánicas y sísmicas. Con base en el tipo de viviendas típicas del estado de Oaxaca se replicó el modelo de un muro de una vivienda tradicional usando una escala de 1:7.5.

Este trabajo comprende principalmente simulaciones computacionales usando el método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés). Para este trabajo se construyeron dos modelos FEM, uno fue un muro tradicional de bloques rectangulares y otro fue un muro con bloques con ángulo basados en la estructura de la concha nácar. En el modelo, los bloques fueron hechos de concreto espumado y pegados con mortero por medio de una formulación de superficies cohesivas con daño progresivo para simular las grietas en los puntos de adhesión de los bloques. Los modelos fueron sometidos a una prueba de tensión, de compresión diagonal y a cargas sísmicas senoidales. Para validar las simulaciones, se fabricaron los dos tipos de muros y se probaron experimentalmente usando la prueba de compresión diagonal.

Los resultados mostraron que en el muro con bloques rectangulares existe una concentración de esfuerzos localizada lo cual conlleva a deformaciones plásticas y eventual falla. Esta concentración de esfuerzos se puede observar en las uniones entre ladrillos, lugar donde normalmente fallan las construcciones de mampostería sometidas a cargas sísmicas. Las simulaciones FEM mostraron que en los muros biomiméticos inspirados en la concha nácar con bloques con ángulos existe una distribución de esfuerzos globalizada lo cual resulta en una menor concentración de esfuerzo localizado y una mejor distribución de la deformación en la toda la estructura. Se puede concluir por medio de los resultados de este trabajo, que el uso de bloques biomiméticos aligerados con ángulo, podría resultar en materiales y estructuras más resistentes a los sismos hechos de constituyentes amigables al medio ambiente como lo son los materiales compuestos de concreto espumado aligerado reforzado con fibras naturales.

ABSTRACT

In this work the mechanical performance of a bioinspired wall based on the hierarchical structure of nacre was studied to improve the distribution of stresses and prevent the propagation of cracks when the structure is subjected to mechanical and seismic loads. Based on a typical rural house in the state of Oaxaca, the wall model was replicated on a scale of 1:7.5.

This work includes mainly computational simulations using the Finite Element Method (FEM). For this work two FEM models were built, one was a traditional wall made of rectangular blocks and another one was a wall with dovetail blocks based on the structure of nacre. In the model, the blocks were made of foamed concrete and glued with mortar using a formulation of cohesive surfaces with progressive damage to simulate cracks in the adhesion points of the blocks. The models were subjected to tensile, diagonal compression and seismic tests. To validate the simulations, both types of walls were fabricated and tested experimentally using the diagonal compression test.

The results showed that in the wall with rectangular blocks there is localized concentration of stresses, which leads to plastic deformations and failure. This stress concentration can be observed in the joints between bricks, where masonry constructions undergoing seismic loads normally fail. FEM simulations showed that in the biomimetic walls inspired by the structure of nacre with dovetail blocks there is a globalized stress distribution resulting in a lower concentration of localized stress and a better distribution of deformation throughout the structure. It can be concluded that the use of dovetail biomimetic blocks could result in materials and structures with better performance under seismic loads, which are also made of environmentally friendly constituents such as foamed concrete reinforced with natural fibers.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad es común que se presenten problemas estructurales en las viviendas construidas con un bajo presupuesto en gran parte de la República Mexicana, sobre todo en estados donde existe una alta tasa de pobreza. Entre los factores principales que provocan estas fallas se encuentran dos muy importantes: a) las personas encargadas de la construcción no utilizan las proporciones adecuadas de los materiales y recursos para el óptimo funcionamiento de la vivienda; b) la forma estandarizada de los procesos constructivos y los materiales utilizados no han evolucionado lo suficiente en México sobre todo en zonas marginadas. Estos problemas estructurales son acentuados en estados localizados en zonas sísmicas lo cual puede ocasionar derrumbes y pérdidas de vida.

En el año 2017 la República Mexicana se vio afectada por dos sismos: el primero ocurrido el 7 de septiembre a 140 km al suroeste de Pijijapan, Chiapas, con una magnitud de 8.2° en la escala Richter; y el segundo ocurrido el 19 de septiembre del mismo año a 8 km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla, con una magnitud de 7.1° en la escala Richter. Ambos sismos dejaron más de 150,000 viviendas destruidas y cientos de vidas perdidas [1]. Si bien existen procesos constructivos para desarrollar casas que resistan cargas sísmicas, muchas personas no tienen los recursos para fabricarlas siguiendo las normativas establecidas.

En años recientes, el biomimetismo, una rama de la ciencia encargada de tomar modelos de la naturaleza para crear o fabricar nuevos materiales y estructuras, está teniendo un gran auge ya que es posible crear nuevos y mejores materiales que sean livianos y resistentes siguiendo los diseños que se encuentran en estructuras biológicas. Un claro ejemplo es la estructura de la concha nácar, la cual presenta un ordenamiento jerárquico que le da una gran tenacidad y resistencia a este material natural. Lo que hace interesante al material es que su tenacidad se ve aumentada en gran medida solamente por el acomodo de sus elementos, en comparación al material mineral del que está constituido el cual es frágil. Song, Soh y Bai [2] suponen que la tenacidad del nácar se debe a los puentes minerales a través de tres mecanismos:

- Desviación de fisuras
- Extracción de las placas
- Puentes en la matriz orgánica

Las fisuras se propagan solamente en la matriz orgánica, pero son paradas o desviadas por los puentes minerales, lo que aumenta la resistencia del material y limita la propagación de grietas [3]. Otro mecanismo muy importante en la tenacidad de la concha nácar es la forma de las placas que conforman las capas de este material. Estas capas son onduladas por lo que existe un anclaje mecánico al momento de deformarse lo que se transforma en una mayor disipación de energía elástica y plástica.

Con base en la estructura de la concha nácar, en este trabajo se pretende lograr una estructura que sea liviana y capaz de resistir las vibraciones producidas por un sismo, o en caso de falla, que no exista un derrumbe catastrófico en la estructura. Se espera que la nueva estructura biomimética sea capaz de tener un mejor desempeño ante cargas sísmicas. Para ello se utilizará un software del método de los elementos finitos para analizar el comportamiento de la estructura. En el software se simularán las cargas sísmicas oscilatorias con el fin de estudiar la reacción de la estructura biomimética, y de esta forma proponer un diseño mejorado para muros de casa habitación que permita una mayor resistencia a las cargas sísmicas.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

1.1 El biomimetismo

El biomimetismo se refiere a la innovación inspirada por la naturaleza. El concepto se basa en que la naturaleza es la mejor inspiración para el diseñador ya sea ingeniero, biólogo, arquitecto o científico. La naturaleza ha sabido resolver problemas del medio ambiente y adaptarse a sus caprichos. El biomimetismo engloba la elaboración de nuevos materiales y estructuras mejorados, como por ejemplo edificaciones bioinspiradas que reducirán el impacto en el medio ambiente y la construcción de una arquitectura que dialogue con la naturaleza, incluyendo un contexto sociopolítico [4].

Algunos ejemplos de este nuevo tipo de composición de diseño puede verse en el contexto mundial en construcciones como el “Gran museo egipcio” de Henegan Peng (Cairo, Egipto), el “Louvre Abu Dhabi” de Ateliers Jean Nouvel (Abu Dhabi, UAE) [5] o el “Cubo de agua” de PWT Architects (Beijing, China, Figura 1.1) [6] el cual fue construido para la natación, el buceo, la natación sincronizada y eventos de water-polo durante los Juegos Olímpicos de Verano 2008.



Figura 1.1 Cubo de agua, Beijing, China [6]

Otro edificio inspirado en la naturaleza es el Eastgate Building Harare en África [7], el cual imita los principios básicos de termorregulación de una especie de termita africana. El Arquitecto diseñador de este proyecto, Mick Pearce, se inspiró en los termiteros que construyen dichos insectos, siendo su interés principal la dosificación de energía calórica (producida en su interior) que estas estructuras realizan, con el fin de mantener una temperatura óptima tanto de día como de noche. El edificio, al igual que el termitero, se orienta en el eje norte-sur (eje de los vientos predominantes). Su morfología es similar a la de una chimenea, extrae el aire caliente (menos pesado) y renueva el aire que se encuentra en el interior por medio de corrientes más frescas (aire más pesado) presentes en la parte inferior [8], como se puede observar en la Figura 1.2 [9].

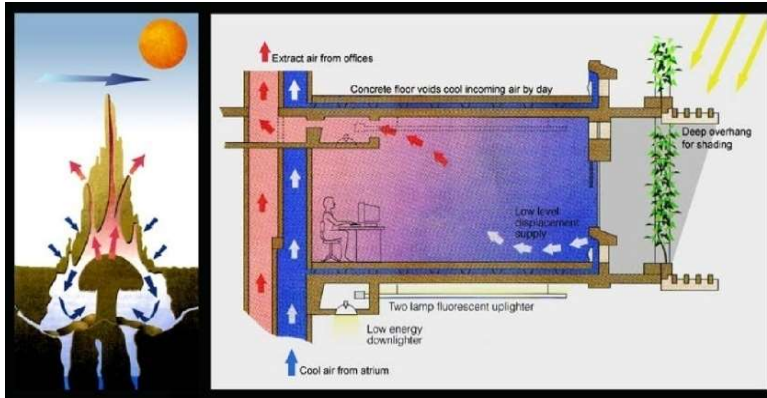


Figura 1.2 Eastgate Building Harare, centro comercial y edificio de oficinas [9]

El diseño estructural es un campo muy promisorio para el desarrollo de investigaciones de aplicación de los principios biomiméticos. Esto debido a los innumerables ejemplos de estructuras naturales totalmente eficientes, adaptables y con excelente comportamiento estructural, tanto para cargas dinámicas como para cargas estáticas. Para poder utilizar un diseño inspirado en la naturaleza como diseño estructural es importante saber qué propiedades deben aprovecharse de dicho diseño para su buen funcionamiento. Algunas de esas propiedades son:

Rigidez: al momento de hacer un diseño estructural se pretende que la estructura alcance la mayor rigidez posible para lograr su estabilidad, un claro ejemplo es el que logran hacer las hojas de las plantas por medio de la tensión superficial que ejerce el agua sobre la periferia de las moléculas de éstas. "El grupo Exploration, dirigido por Michael Pawlyn, tomó este principio y lo convirtió en fuente de inspiración para realizar estructuras que funcionan gracias a la neumática. En este caso, en vez de necesitar agua para producir la tensión necesaria, y así generar la rigidez requerida, se utiliza aire. Como resultado, se diseñaron unas vigas que funcionan bajo este principio" [8].

Flexibilidad y Adaptación: un material que es flexible aumenta en gran medida los beneficios que éste podría presentar ante diversas situaciones como por ejemplo cuando está sometido a una carga que provoca grandes deformaciones.

Optimización: el principal factor que motiva a la optimización es el factor económico. "Claus Mattheck propone dos métodos para la optimización estructural, el Computer Aided Optimization (CAO) y el Soft Kill Option (SKO). La idea del primero es simular la forma de

crecimiento orgánico que ocurre en los materiales naturales. De esta manera se puede evitar la concentración de esfuerzos en los nodos al optimizar la geometría que define su forma. Al no tener dicha concentración de esfuerzos, se podrá reducir la cantidad de material del elemento estructural. El segundo método se basa en extraer el material que está sub-esforzado dentro de un elemento estructural, es decir, el que está sub-utilizado. Ambos métodos se llevan a cabo con el uso del Método de los elementos finitos. El uso de estos métodos permite un ahorro de recursos ya que pueden predecir el comportamiento estructural de los diseños biomiméticos sin la necesidad de tener que reproducirlos físicamente" [8].

Estructuras jerárquicas: en las estructuras naturales existen diversos niveles de jerarquía. Estos niveles de formación (en donde ocurre un cambio de escala) tienen el nombre de niveles jerárquicos, o escalas jerárquicas. Los niveles jerárquicos ayudan al comportamiento de la estructura modificando la forma de fallar, es decir, al momento de producirse una fractura. En este caso, la fractura empezaría por un elemento pequeño, del nivel inferior, posteriormente se expandiría al siguiente nivel de jerarquía y así sucesivamente. Un caso contrario ocurre en elementos continuos de mayor tamaño en los que al fallar el elemento la falla se transmite a la estructura en un periodo de tiempo más corto provocando el colapso de la estructura.

La estructura de la concha nácar es de tipo "brick-and-mortar" (ladrillos), donde el mineral aragonito organizado en placas hexagonales corresponde a los ladrillos y el cemento es el adhesivo natural compuesto de fibras de proteínas y sacáridos (Figura 1.3) [3].

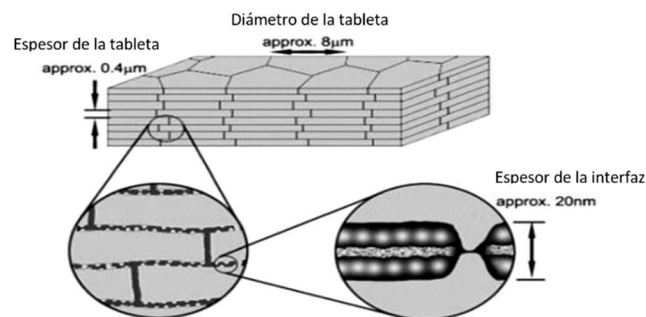


Figura 1.3 Estructura de la concha nácar

1.2 El uso del biomimetismo para el diseño de muros

En el año 2012, Cavelier y Barthelat diseñaron un muro de ladrillos inspirados en las conchas marinas. Ellos se centraron en investigar el tipo de adhesivo para unir ladrillos con ángulo inspirados en la concha nácar. Entre los adhesivos que utilizaron se puede mencionar al

uretano (por su elasticidad), el PDMS (polidimetilsiloxano: es un polímero cuya fuerza puede ser controlada gracias a la cantidad de entrecruzamiento), easy tack (baja resistencia y permite el deslizamiento), entre otros. Ellos observaron que, de acuerdo a las diferentes características del adhesivo, mejoraba ligeramente la resistencia del muro en conjunto, sin embargo, no sólo el adhesivo mejoraba las propiedades mecánicas, sino también la forma ligeramente ondulada de los ladrillos (Figura 1.4) [10].

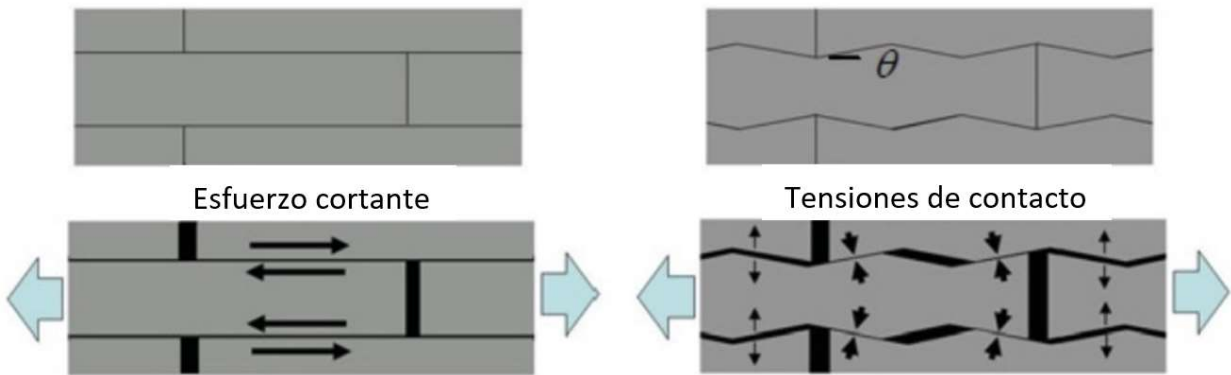


Figura 1.4 Desplazamiento horizontal en ladrillos comunes y ladrillos ligeramente ondulados [10]

Una de las razones principales por la que la concha nácar se ha empleado como inspiración para estudios científicos, es que los micro-ladrillos en el nácar no son planos (Figura 1.5 [10]) sino ondulados (Figura 1.6 [10]), lo que genera endurecimiento por deformación, esto previene la localización del daño y aumenta la absorción de energía.

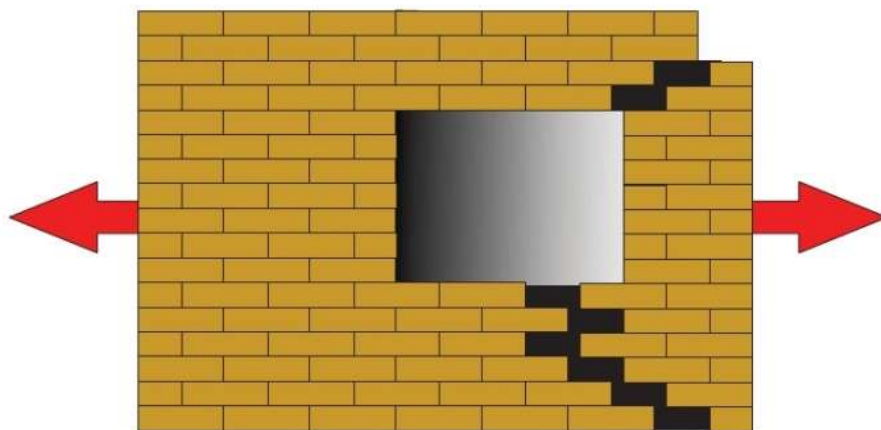


Figura 1.5 Pared de la casa estándar: una sola grieta conduce a un fracaso catastrófico [10]

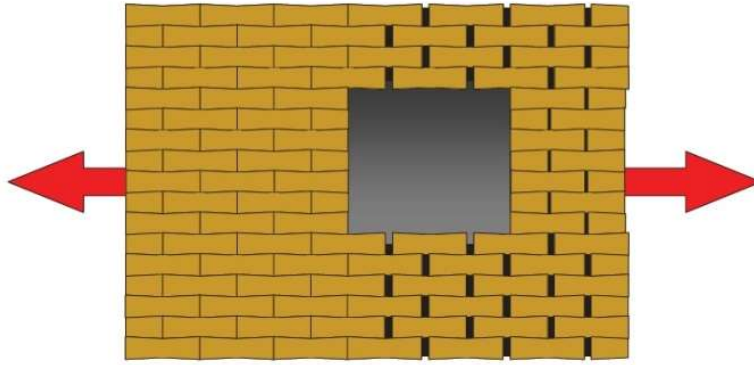


Figura 1.6 Estructura ondulada, disipa energía, llevando a un fallo más estable y progresivo [10]

En el 2011 Zhu, Deju y Barthelat, Francois [11] realizaron el primer material sintético que duplica con éxito el mecanismo de deslizamiento de las tabletas observado en el nácar, compuesto de polimetilmetil ondulado de tamaño milimétrico y tabletas de metacrilato sostenidas por sujetadores, este "material modelo" sufre un deslizamiento masivo de tabletas debajo carga de tracción, acompañada de endurecimiento por deformación, permitiendo que el nácar sea 3000 veces más resistente que el mineral con el que está hecho. Mediante el método de elementos finitos se realizó la validación de la simulación con la realidad. Aunque el comportamiento mecánico a tensión es un poco débil, sí hay mejora, en la Figura 1.7 podemos ver la simulación.

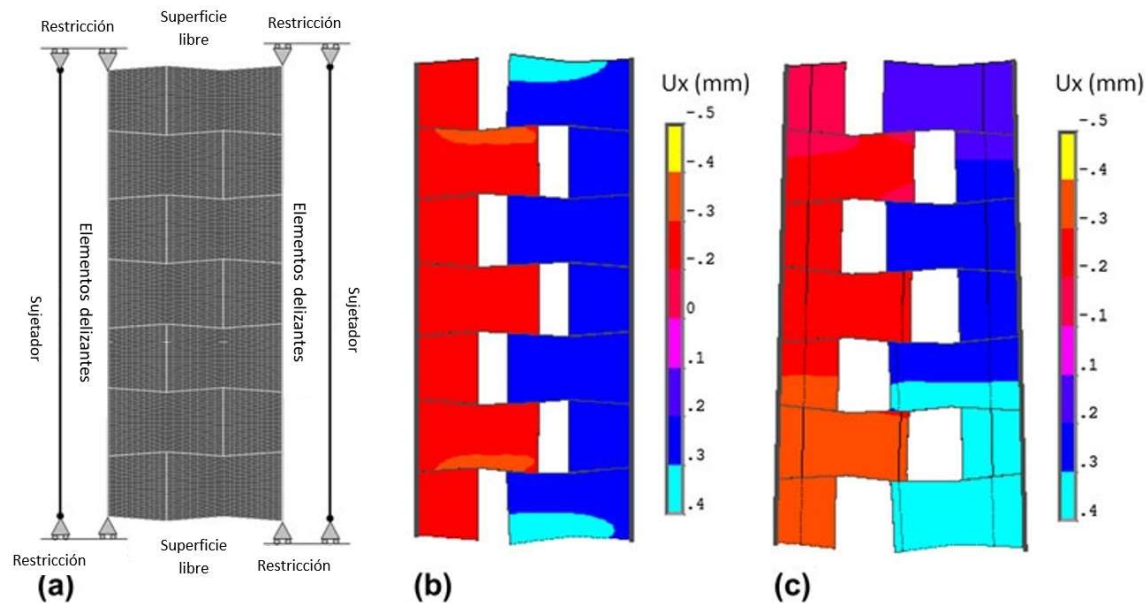


Figura 1.7 Modelo de ancho finito: (a) mallas y condiciones de contorno; (b) deformación uniforme; (c) deformación no uniforme (descompresión)

1.3 El uso de simulaciones computacionales para el diseño de muros

Otro aspecto importante a considerar para el diseño del muro es la relación entre el ancho y la altura. En el 2018, Al-Zuhairi, A. y Rafid, analizaron por el método de elementos finitos mediante el programa Abaqus tres paredes de mampostería con diferentes alturas sometidos a una carga vertical. Ellos analizaron numéricamente la influencia de las relaciones de aspecto de la pared en los esfuerzos verticales que se generaron en diferentes niveles de cada pared. Las tres paredes de mampostería tenían relaciones de aspecto de 0.5, 1 y 2 con un espesor constante de 0.2 m y mortero con un espesor de 0.010 m. La primera pared tenía dimensiones de longitud de 4 m por 2 m de altura, mientras que las dimensiones de la segunda pared eran 2 m para la longitud y de 2 m de altura. Por último, la tercera pared tenía 1 m de largo por 2 m de altura (Figura 1.8) [12].

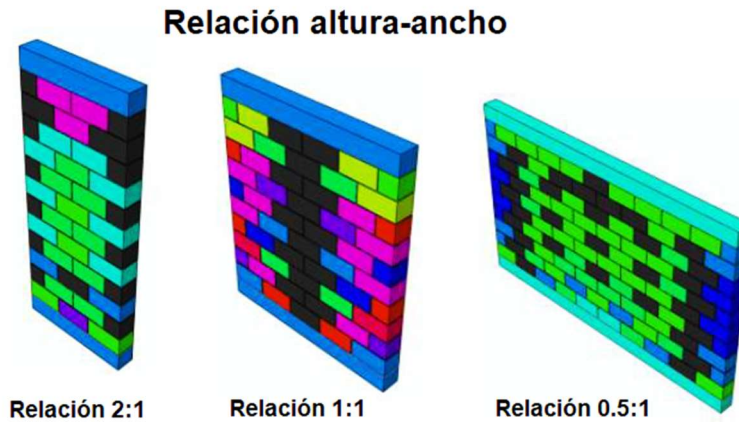


Figura 1.8 Localización de la falla de paredes con relaciones de aspectos igual 2, 1 y 0.5 [12]

Las tres paredes de mampostería con relaciones de aspectos iguales a 2, 1 y 0.5 se sometieron a una carga de compresión vertical uniformemente distribuida para examinar el efecto de las relaciones de aspectos en los esfuerzos generados a lo largo de la pared. Se encontró que la pared con la relación de aspecto igual a 2 exhibió un fallo con una carga 10 MPa y el fallo se produjo en los bordes de la pared. Mientras que la pared con la relación de aspecto es igual a 1, la carga de falla fue de 8 MPa y la ubicación de la falla estaba en el centro de la pared. Para la pared con la relación de aspecto de 0.5, la carga de falla fue de 10 MPa y la falla fue localizada en el centro y los bordes de la pared (Figura 1.8) [12]. Los muros con relación 0.5 y 2 son lo que tienen una mejor resistencia a la compresión. Tomando en cuenta las características de los muros, el muro que más se asemeja al de las casas tradicionales es el muro de relación 0.5, es decir, la altura es la mitad del ancho [12].

Siguiendo la relación de 0.5 para la altura entre el ancho del muro, en el 2017 Navas, R. calculó las reacciones de la mampostería de ladrillo como un conjunto para 4 tipos de muros (Tabla 1.1 [13]), con un espesor de 20 cm, usando el método de los elementos finitos. Para el análisis se consideró una carga distribuida sobre las cuatro paredes de la casa como se ve en la Figura 1.9 [13] y para la carga sísmica, se utilizó una aceleración creciente en sentido paralelo al plano de tierra para simular un terremoto oscilatorio [13].

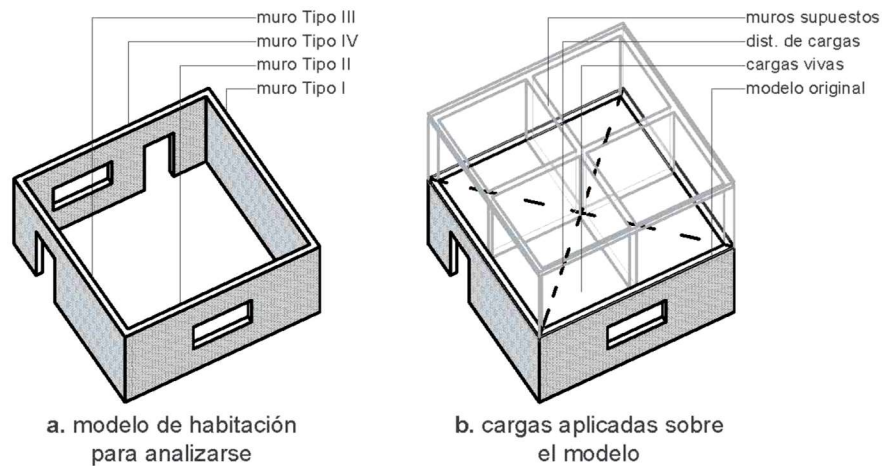
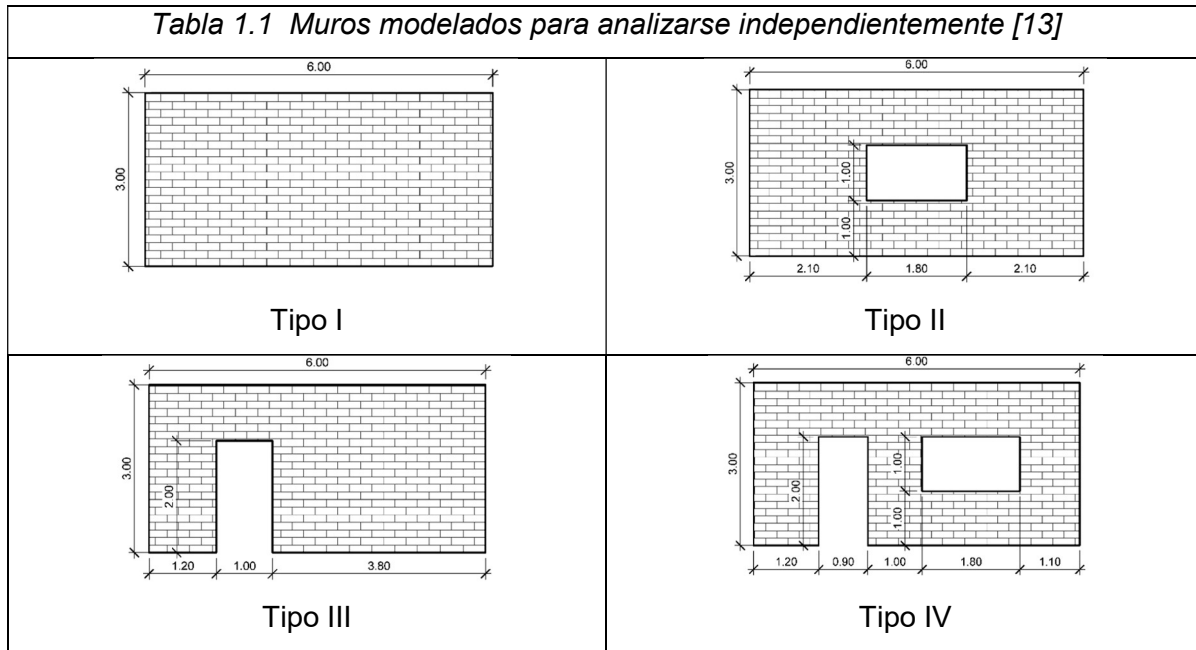


Figura 1.9 Modelado de habitación y de las cargas externas a las que se somete [13]

En la Figura 1.10 a podemos ver en el inciso a cómo se concentra en las esquinas el esfuerzo, mientras que en la Figura 1.10 b los mayores desplazamientos se dan en la parte superior del muro, en la Figura 1.10 c y Figura 1.10 d vemos que tanto la concentración de esfuerzos como

los desplazamientos producidos se concentran en los claros formados por ventanas y puertas refiriéndose a una carga normal, cuando se aplica una carga sísmica (Figura 1.10 e y Figura 1.10 f) la concentración de esfuerzos y desplazamientos se distribuye en toda la vivienda teniendo mayor incidencia en la parte inferior de los muros.

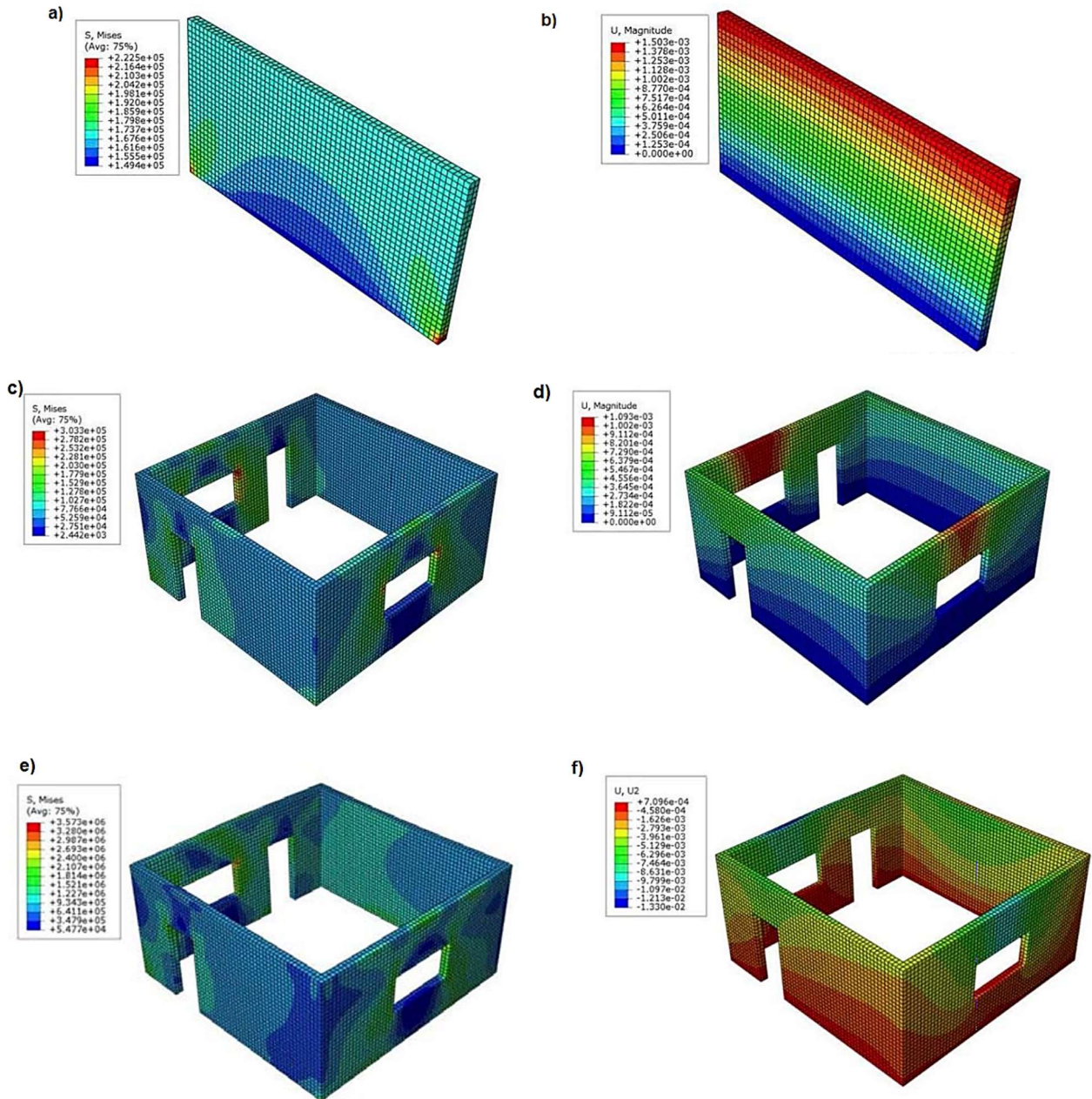


Figura 1.10 a) Diagrama de esfuerzo sobre el muro TI, b) Diagrama de desplazamiento sobre el muro TI, c) Diagrama de esfuerzo sobre la habitación (carga normal), d) Diagrama de desplazamiento sobre la habitación (carga normal), e) Diagrama de esfuerzo sobre la habitación (sismo), f) Diagrama de desplazamiento sobre la habitación (sismo) [13]

1.4 El uso de materiales aligerados para aplicaciones sísmicas

Durante un evento sísmico, el esfuerzo de las cargas se distribuye uniformemente a través de toda la estructura, los empujes laterales son contrarrestados por las cargas fijas aplicadas, el desplazamiento más fuerte es recibido por las filas inferiores, pero a medida que sube, es absorbido paulatinamente por la masa de la estructura, haciendo que sea casi imperceptible en las plantas superiores; un hecho que llama la atención es que, a pesar de que la fila inferior está en contacto directo con el plano de movimiento durante un sismo, la aceleración más alta se registra una fila más arriba [14].

Tomando en cuenta que el peso muerto de las viviendas convencionales es elevado, este también influye en la reacción que se tendrá frente a la energía producida en un sismo, es por eso que es muy importante el tipo de material que se utiliza para la construcción de viviendas en zonas sísmicas. Lo ideal es mantener las propiedades mecánicas resistentes a las cargas sísmicas, pero disminuyendo su peso para reducir la aceleración sufrida por la estructura durante un sismo.

Jones y McCarthy estudiaron al concreto espumado debido a su bajo peso propio (800 a 1600 kg/m³), la alta trabajabilidad (fluida y autocompactante) y las excelentes propiedades de aislamiento térmico (<0.50 W/mK) lo que hace atractivo para aplicaciones de construcción. Ahora es un material bien establecido en usos de relleno de vacíos y rehabilitación de carreteras. Sin embargo, las características del concreto espumado, particularmente la alta deformación por contracción por secado y el rendimiento relativamente bajo de la resistencia a la tracción y la rigidez, significan que no es posible la sustitución directa del concreto de peso normal y se necesitarán formas estructurales más innovadoras [15].

En el 2015 Zamora, Lenin diseñó un bloque de concreto celular tomando en cuenta los agregados a utilizar y modificando las proporciones hasta encontrar la mezcla óptima, llegando a la conclusión que el sistema de mampostería de bloques de Concreto Celular es 30% más liviano en comparación al sistema de ladrillos artesanales de arcilla cocida y 20% más liviano en comparación al sistema de bloques de concreto convencionales, los contribuye a reducir las cargas muertas, rapidez de construcción, menores costos de transportes y acarrees [16].

Una forma de mejorar el comportamiento elástico de los materiales es reforzarlos con algún tipo de fibra. Mithun, Mahalinge & Suresh [17] utilizaron porcentajes variables de fibras de sisal, 0%, 0.5%, 1%, 1.5% y 2% para el diseño de concreto (Figura 1.11):

- Con el 1 % de fibra, la resistencia a la compresión se incrementa hasta un 3.5% que el concreto convencional, mientras que a tensión aumentó el 11 %.
- Cuando se agrega 1.5% y 2% de fibra de sisal, la fuerza disminuirá.

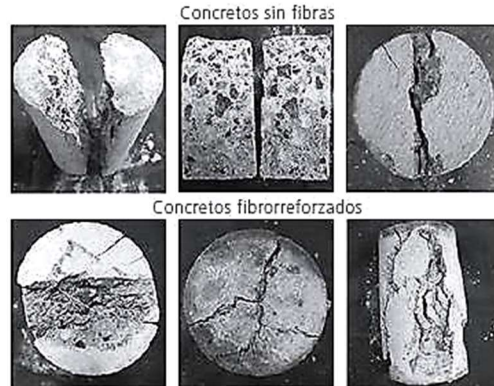


Figura 1.11 Cilindros de concreto fibrorreforzados [17]

En el 2020 Flores, Company, Koh y Carrillo realizaron pruebas en una mesa sísmica de un muro escalado en forma de U con fibra y sin fibra de concreto espumado (Figura 1.12). Mediante las pruebas de compresión y tensión encontraron que el refuerzo de fibras mejoró las propiedades mecánicas, tenacidad y ductilidad del hormigón celular, lo que se atribuyó a la mayor integridad de la muestra producida por la inclusión de las fibras. Concluyendo que los muros en forma de U hechos de concreto espumado fibrorreforzado tienen el potencial de funcionar bien en aplicaciones estructurales y sísmicas [18].

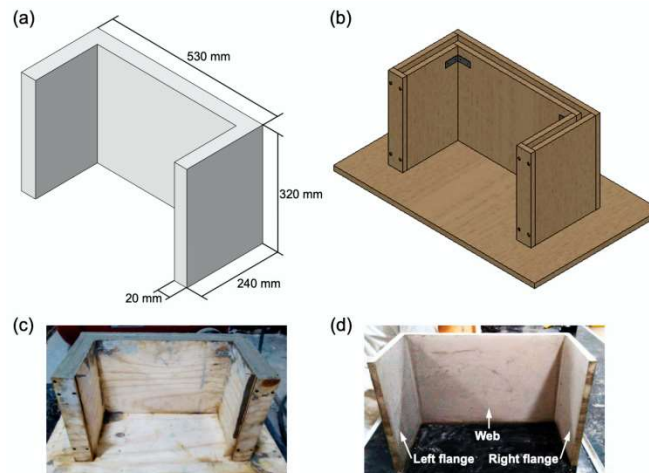


Figura 1.12 a) Esquema de la pared en forma de U que muestra los detalles geométricos; b) esquema del molde de madera; c) colada de hormigón celular; y d) muestra de pared en forma de U

1.5 Metodología para construir el prototipo

Lo primero que se tomará en cuenta para realizar el diseño del prototipo es lo establecido en los Reglamentos para Edificación de la Secretaría de las Infraestructuras y el Ordenamiento Territorial Sustentable (SINFRA) del Estado de Oaxaca:

- Reglamento de Construcciones del Estado de Oaxaca.
- Reglamento de Construcciones para el D.F. y los Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05).
- Manual de Diseño de Obras Civiles – Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

En estos reglamentos se establecen los requisitos mínimos para el diseño de estructuras con una seguridad adecuada frente a sismos.

Se realizará el diseño de un muro bioinspirado en la estructura jerárquica de la concha nácar con el cual se elaborarán elementos de construcción (blocks) que tengan las características de la estructura de la concha nácar, es decir, ondulaciones que permitan un anclaje mecánico.

Estableciendo las diferencias entre prototipo y modelo: un prototipo es un objeto que se desea estudiar mientras que un modelo lo representa a una escala menor o mayor. La similitud del prototipo y del modelo debe darse a varios niveles: geométrico, cinemático y dinámico, es decir, en cuanto a su forma las estructuras deben ser similares. Lo mismo se debe cumplir para las trayectorias que describan al prototipo y modelo si realizan movimientos, y para las fuerzas involucradas que deben ser proporcionales. Así, si la segunda ley de Newton se cumple para el prototipo, se cumplirá también para el modelo y es posible entonces experimentar con éste para conocer lo que pudiera pasarle realmente al prototipo; cuando hay similitud geométrica, cinemática y dinámica se habla de similitud dinámica [19].

Para la parte de la modelación de la estructura hay que tener en cuenta el factor de escala. Si el modelo es demasiado pequeño, será complicado replicar las partes de la escala real. Por otro lado, si el modelo es demasiado grande, se necesitarán equipos de mayor potencia.

Según el tipo de prototipo que se desee analizar dependerán los requerimientos de similitud que se deban adoptar en la fabricación del modelo. Éstos se obtienen de un análisis dimensional basado en el teorema Pi (π) de Buckingham con relación a las dimensiones

fundamentales como lo son la longitud, la fuerza (o masa), el tiempo, la temperatura y la carga eléctrica [20].

1.5.1 Mesa de vibración

Una vez realizado el diseño y fabricado el modelo, se llevarán a cabo pruebas en la mesa vibratoria Shake Table II (Figura 1.13), 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. Esta mesa consiste en una etapa superior accionada por un potente motor que le permite alcanzar una aceleración de 2.5 m/s^2 , cuando se carga con una masa de 7.5 kg. El escenario tiene un recorrido de 15.2 cm y se desplaza sobre dos ejes de metal endurecido por tierra con rodamientos lineales, lo que permite un movimiento lineal suave con una desviación de trayectoria baja.

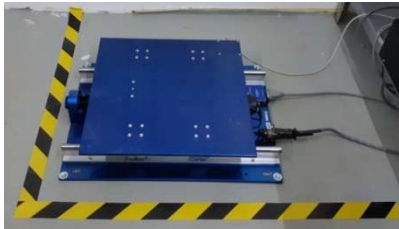


Figura 1.13 Mesa vibratoria Shake Table II

Las características específicas [21] de esta mesa, las cuales servirán también para realizar el modelo a escala, son:

- Operación de un solo eje.
- Codificador de alta resolución.
- Mecanismo de husillo de bolas para una actuación robusta.
- Fácil integración de estructuras construidas por el usuario, sensores de terceros y actuadores.
- Diseñado y construido para el consorcio de universidades en las mesas de batidos instructivos.
- Controlado con el software Shake Table independiente o con QUARC para MATLAB® / Simulink®.
- Soporta escalado y reproducción de datos de terremotos.
- Funciones y límites de seguridad integrados.

La mesa sísmica Quanser Shake Table II (Figura 1.13) tiene la característica de que mediante el software de Matlab se pueden ingresar sismos y escalarlos (Figura 1.14). Los equipos que servirán para medir los desplazamientos y aceleraciones de la estructura en la mesa de vibración son un sensor de desplazamiento (Figura 1.15) y un acelerómetro (Figura 1.16). La vivienda se diseñará para resistir una aceleración máxima de 60 cm/s^2 , es decir, un sismo de magnitud grado 6 en la escala Richter.

Después de las pruebas en la mesa de vibración se procederá al diseño del prototipo en un programa de cómputo y se simulará con la herramienta computacional de Abaqus, la cual hace uso del método numérico del método de los elementos finitos, para observar modos de falla, o colapso, que pudieran darse en la estructura.

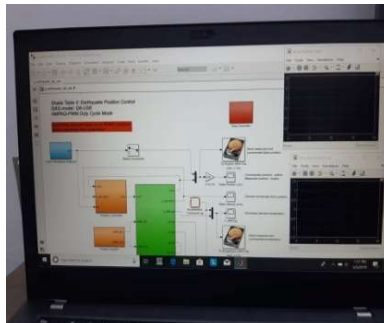


Figura 1.14 Programa Matlab para operación de la mesa de vibración



Figura 1.15 Transformador diferencial variable lineal (LVDT) para el sensor de movimiento



Figura 1.16 Acelerómetro

1.5.2 Elección de la escala geométrica

La mayoría de las construcciones a escala de laboratorio tienen un factor de escala geométrico óptimo. Los modelos muy pequeños requieren cargas ligeras, pero pueden presentar grandes dificultades en la fabricación y la instrumentación. Los modelos grandes son más fáciles de construir, pero requieren equipos de carga mucho más pesados. Este último requisito no tan difícil de cumplir en un laboratorio grande que está completamente equipado para realizar pruebas en estructuras de gran escala, pero es un obstáculo fuerte en un laboratorio más pequeño. Por eso existen varios factores de escala típicos para varias clases de estructuras, observables en la Tabla 1.2 [22]:

Tipo de estructura	Modelo elástico	Modelo de Fuerza
Concha, techo	$\frac{1}{200} a \frac{1}{50}$	$\frac{1}{30} a \frac{1}{10}$
Autopista de puente	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{20} a \frac{1}{4}$
Reactor	$\frac{1}{100} a \frac{1}{50}$	$\frac{1}{20} a \frac{1}{4}$
Estructuras de viga/losa	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{10} a \frac{1}{4}$
Presas	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{75}$
Efectos del viento	$\frac{1}{300} a \frac{1}{50}$	No aplica

1.6 Hipótesis

La incorporación de una nueva geometría bioinspirada en la concha nácar y un material compuesto liviano de concreto espumado fibrorreforzado para fabricar los ladrillos utilizados en la construcción de muros de una vivienda permitirá un mejor anclaje mecánico entre los ladrillos favoreciendo la disipación de energía de deformación, provocada por cargas sísmicas, incrementando la tenacidad a la fractura en la estructura.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Estudiar el desempeño mecánico de un muro bioinspirado en la estructura jerárquica de la concha nácar con el fin de mejorar la distribución de los esfuerzos y evitar la propagación de líneas de falla cuando la estructura es sometida a cargas sísmicas con movimientos oscilatorios.

1.7.2 Objetivos específicos

- Elaboración de un prototipo a escala de un muro de una vivienda típica de Oaxaca.
- Diseño y desarrollo de un muro estructural bioinspirado en la concha nácar usando concreto espumado.
- Simulación computacional por el método de los elementos finitos del desempeño del muro en una vivienda sometida a una situación de sismo frente a movimientos oscilatorios.
- Validación experimental del muro.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sismos y aceleración sísmica

De acuerdo al Servicio Geológico Mexicano [23] los sismos, temblores y terremotos son términos usuales para referirse a los movimientos de la corteza terrestre. Los sismos se originan en el interior de la tierra y se propagan por ella en todas direcciones en forma de ondas.

Para cuantificar y/o medir el tamaño de un sismo hay 2 escalas que los definen: las escalas de intensidad y magnitud. La primera es "la escala de Intensidad o de Mercalli", la cual define al sismo respecto a los daños producidos en una determinada región; la segunda escala es "la escala de Magnitud o Richter", 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 (Tabla 2.1).

A continuación, se presenta la clasificación de la escala de Richter:

Tabla 2.1 Escala Richter utilizada para determinar la energía liberada en un sismo [23]

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 ó +	Magnitud Épica	Jamás registrado, puede generar una extinción local.

Para conocer la intensidad con la que se presentan las ondas sísmicas se utiliza el parámetro de aceleración sísmica, el cual 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 2.2 [24] se presenta la escala de Mercalli y su equivalente en aceleración sísmica y velocidad:

Tabla 2.2 Escala de Mercalli y su equivalente en aceleración sísmica [24]

Escala de Mercalli	Aceleración sísmica (g) en (m/s ²)	Velocidad sísmica (cm/s)	Percepción del temblor	Potencial de daño
I Intensidad no perceptible	< 0.0017	< 0.1	No apreciable	Ninguno
II-III Débil Intensidad	0.0017 – 0.014	0.1 – 1.1	Muy leve	Ninguno
IV Ligera Intensidad	0.014 – 0.039	1.1 – 3.4	Leve	Ninguno
V Moderada Intensidad	0.039 – 0.092	3.4 – 8.1	Moderado	Muy leve
VI Intensidad fuerte	0.092 – 0.18	8.1 – 16	Fuerte	Leve
VII Intensidad muy fuerte	0.18 – 0.34	16 – 31	Muy fuerte	Moderado
VIII Severa Intensidad	0.34 – 0.65	31 – 60	Severo	Moderado a fuerte
IX Violenta Intensidad	0.65 – 1.24	60 – 116	Violento	Fuerte
Mayor a X Extrema Intensidad	> 1.24	> 116	Extremo	Muy fuerte

2.2 Zonas sísmicas en el país

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano [25] el país se encuentra dividido en 4 zonas sísmicas, siendo los estados de Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco con mayor sismicidad en la República Mexicana (Figura 2.1):

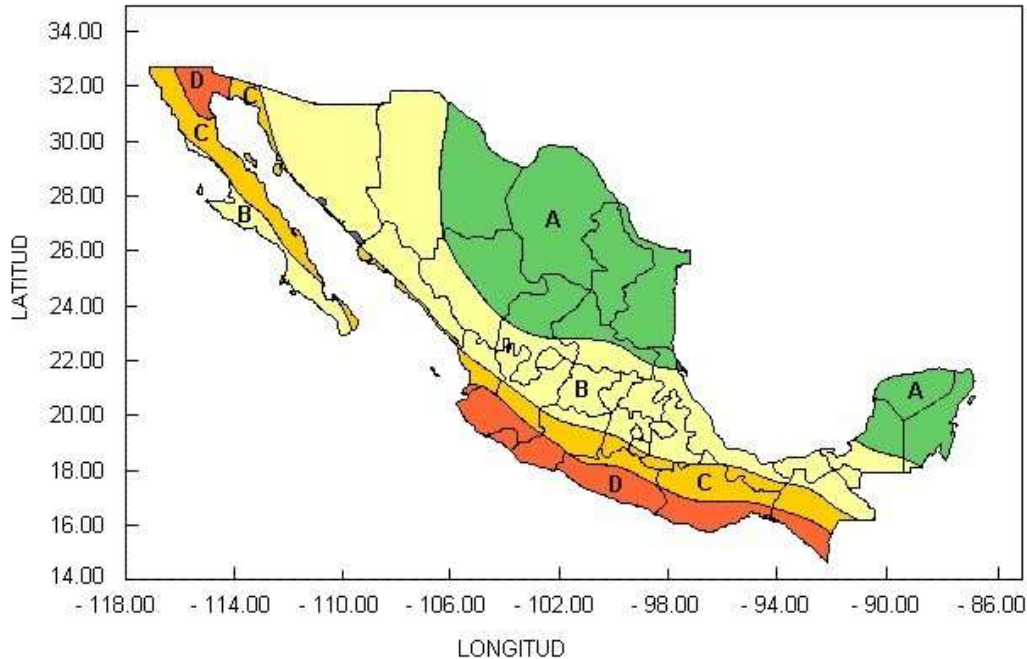


Figura 2.1 Zonas sísmicas de la República Mexicana

Las 4 zonas sísmicas se definen como:

Zona A: zona sin registro de sismos y con aceleraciones esperadas a causa de temblores menores del 10% de la aceleración de la gravedad.

Zonas B y C: zona con registro de sismos eventuales y con aceleraciones esperadas a causa de temblores menores del 70% de la aceleración de la gravedad.

Zona D: zona con registro de sismos de gran intensidad y con aceleraciones esperadas a causa de temblores mayores del 70% de la aceleración de la gravedad.

2.3 Mesa vibratoria

Una mesa vibratoria es una herramienta experimental para estudiar el comportamiento de estructuras sometidas a efectos sísmicos. La mesa vibratoria se utiliza para la reproducción del registro de una excitación sísmica sobre la base de componentes estructurales, subestructuras o sistemas estructurales completos [26].

Desde la primera mitad del siglo XX se han desarrollado herramientas para estudiar los efectos de los sismos; sin embargo, las primeras mesas vibratorias con sistemas programables se desarrollaron solo hasta la década de los setenta [27].

Los datos que se obtienen de la mesa vibratoria son similares a la realidad, debido a esto, se han hecho diversos estudios sobre el comportamiento de las viviendas frente a sismos en diversas partes del mundo, a continuación, se enlistan algunos:

- "Ensayos en mesa vibradora de modelos 3d de viviendas de mampostería confinada", realizada por Juan Arias en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Figura 2.2) [28]. En este trabajo se estudiaron las variaciones de las propiedades dinámicas de este tipo de construcciones para diferentes niveles de daño, y se calibraron modelos analíticos a partir del comportamiento observado.



Figura 2.2 Modelo de vivienda instrumentado [28]

- "Ensayos en mesa vibradora de edificios miniatura con muros estructurales de concreto convencionales y autocentrados", en colaboración con la Facultad de Ingeniería Civil (Universidad Nacional de Ingeniería, UNI. Lima, Perú) y el Instituto de Ingeniería (Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. México) realizado por Rafael Salinas, Mario Rodríguez y Roque Sánchez [29].
- "Ensayo de una vivienda a escala de dos niveles de mampostería confinada", realizada por Raziel Barragán en el Instituto de Ingeniería de la UNAM [30].

2.4 Concreto

El concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (Cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y/o aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos a compresión [31].

Las principales características físicas del concreto convencional se enlistan a continuación (donde se indican valores aproximados) [16]:

- **Densidad:** Aproximada de entre los 2200 y 2700 kg/m³.
- **Resistencia a la compresión:** De 100 a 500 kg/cm² para el concreto ordinario. Existen concretos especiales de hasta 2000 kg/cm², con densidad de más de 3200 kg/cm³.
- **Resistencia a la tensión:** proporcionalmente baja, generalmente despreciable en el cálculo global, del orden de un décimo de la resistencia a la compresión.

2.5 Concreto ligero

El concreto ligero es un concreto que tiene una densidad menor que la del concreto convencional. La densidad puede variar de 300 kg/m³ a 2000 kg/m³ en comparación con el concreto normal que tiene una densidad de alrededor de 2300kg/m³ a 2700kg/m³. La menor densidad se logra a través del aire incorporado para inducir poros o huecos en las mezclas o mediante el uso de agregado de baja densidad [16]. El concreto espumado es una clasificación del concreto aireado, y este se puede clasificar de la siguiente forma [32]:

Según el método de formación de poros:

- Método de incorporación de aire (Concreto gas): Este se elabora a partir de productos químicos que forman gas cuando se mezclan con la cal o el mortero de cemento durante la etapa líquida o plástica. Esto conlleva a que aumente el volumen del concreto y cuando el gas se escapa deja una estructura porosa. Los productos químicos pueden ser el polvo de aluminio, peróxido de hidrógeno o carburo de calcio.
- Método de espumado (Concreto espumado): Este es el proceso de formación de poros más económico y controlable debido a que no hay reacciones químicas en la formación de la espuma. La introducción de los poros se logra a través de medios mecánicos ya sea mediante el pre-espumado o el método de mezclado de espuma (agente espumante mezclado directamente con el mortero).

Método de curado:

Este se puede curar en autoclave o no. La resistencia a la compresión, la contracción por secado y las propiedades de absorción, dependen directamente del método y la duración del

curado. El aumento de la resistencia es más lento para los productos curados en húmedo y dependiendo de los materiales empleados en la fabricación del concreto y de la forma de preparación, existen métodos de curados en húmedo más eficientes. Las variables de importancia para el curado en autoclave son la edad y el estado de la mezcla al inicio del ciclo de curado y las tasas de cambio de temperatura y presión.

El concreto ligero de acuerdo con su densidad y aplicaciones se clasifica en [33]:

- **Concreto de baja densidad:** Este concreto de peso ligero tiene una densidad comprendida entre 300 kg/m^3 - 1000 kg/m^3 . Se utiliza como una parte no estructural de un edificio, tales como aislamiento y particiones. La fuerza de este concreto es inferior a 7 MPa.
- **Concreto de densidad media:** tiene una densidad de alrededor de 1000 kg/m^3 a 1600 kg/m^3 . Este tipo de concreto es generalmente un producto cementoso que puede ser utilizado como un material de soporte de carga. La resistencia mínima de este tipo de concreto es de alrededor de 17 MPa.
- **Concreto de densidad alta** con un intervalo de densidad entre 1600 kg/m^3 a 2.200 kg/m^3 también puede ser referido como concreto ligero estructural y se utiliza para soporte de carga estructural.

El concreto aligerado es reconocido por su alta fluidez, bajo contenido de cemento, bajo uso de agregados [34] [35] [36] y excelente aislamiento térmico. Se ha utilizado comúnmente en aplicaciones de construcción en diferentes países como Alemania, Reino Unido, Filipinas, Turquía y Tailandia [37] [38].

En el Medio Oriente, las principales características del concreto espumado lo hacen un material adecuado para reducir los efectos adversos de los terremotos y solucionar los cambios de temperatura. Además, las aplicaciones del concreto espumado son efectivas en cuanto al costo cuando se trata de reparaciones y rehabilitaciones [39]. En la Tabla 2.3 se pueden ver algunas aplicaciones.

Tabla 2.3 Aplicaciones del concreto espumado [40]

Densidad (Kg/m ³)	Aplicaciones
300-600	Aislamiento contra el calor y sonido en techos y pisos. Relleno de espacios intermedios entre filas de ladrillos en paredes subterráneas. Aislamiento en bloques huecos.
600-900	Producción de bloques y paneles prefabricados para muros divisorios. Losas para techos falsos. Aislamiento térmico y capas de aislamiento acústico en edificios residenciales de varios niveles.
900-1200	Bloques y paneles de concreto para cubiertas exteriores de edificios. Ornamentación arquitectónica. Sistema de losas de concreto.
1200-1600	Paneles prefabricados de cualquier dimensión para uso comercial e industrial, adornos de jardín, concreto estructural.

El concreto aligerado se reporta como un material muy efectivo para rehabilitar pisos en antiguas edificaciones, porque puede nivelar los pisos sin añadir mucha carga muerta adicional [41].

2.6 Análisis por el método de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés) es un método numérico para resolver problemas de ingeniería y física. Es un procedimiento matemático para calcular soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales. El objetivo de este procedimiento es transformar las ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones lineales [42].

En el 2019 en la Universidad Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, en el departamento de ingeniería civil y ambiental, se analizó el comportamiento de los muros de mampostería bajo fuerza lateral mediante la curva de carga-desplazamiento validando los resultados experimentales con el software de elementos finitos Abaqus, obteniendo una diferencia de 1.4% en relación a los resultados experimentales contra los resultados del software, concluyendo aceptable el uso del programa de elementos finitos [43] (Figura 2.3).

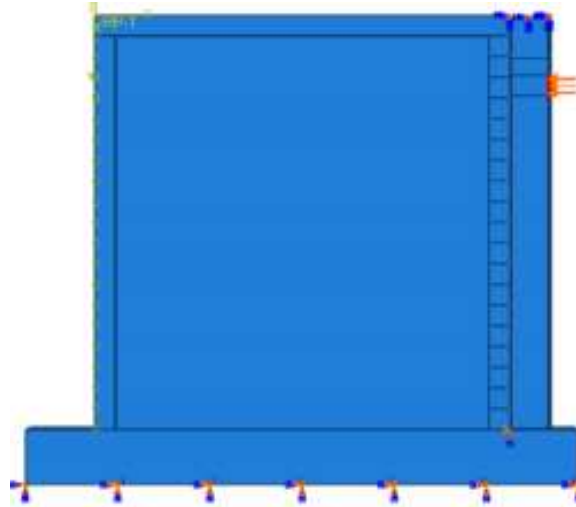


Figura 2.3 Aplicación de la fuerza lateral en el muro de mampostería

En el 2016 un estudio desarrollado tuvo como objetivo investigar el comportamiento mecánico de un nuevo tipo de bloque de hormigón autoaislante (SCMU). Un total de 12 ensamblajes de paredes con lechada completa fueron preparados y probados para resistencia a la compresión y al corte (Figura 2.4). Además, diferentes relaciones de tensión axial se utilizaron en pruebas de cizallamiento. Se desarrollaron modelos numéricos para predecir el comportamiento de muestras enlechadas utilizando una técnica de micro-modelado simplificada. Se modelaron las juntas de mortero con espesor cero y su comportamiento se aplicó mediante el modelo de tracción-separación del elemento cohesivo [44].

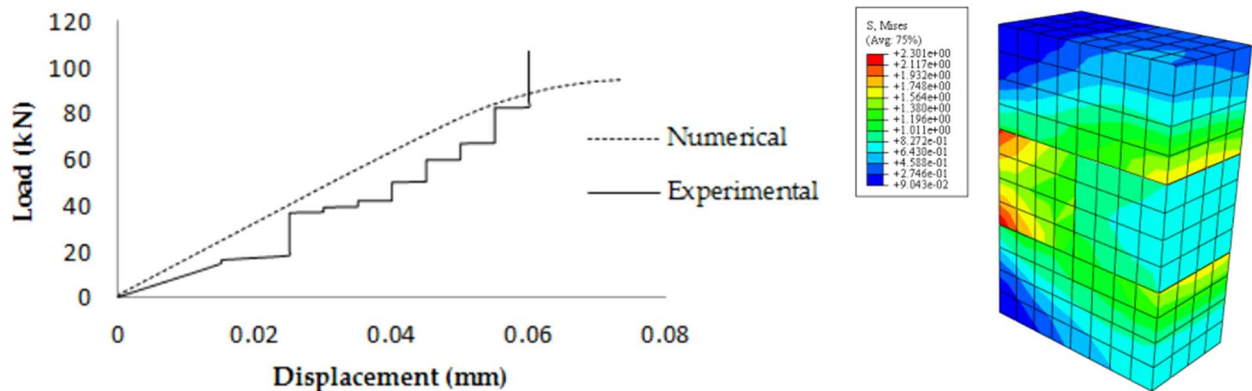


Figura 2.4 Curvas de desplazamiento de carga

Los resultados experimentales revelaron que la resistencia al corte aumenta a medida que el nivel de pre-compresión aumenta. Se observó una buena concordancia entre los resultados experimentales y numéricos. Se concluyó que los modelos propuestos se pueden utilizar para

deducir el comportamiento de los ejemplares inyectados. Los valores predichos de carga de falla y el estrés presentaron no más del 10% de error.

2.7 Análisis de método de elementos finitos en Abaqus

Abaqus es un programa de simulación de ingeniería basado en el método de elementos finitos, y puede resolver problemas que incluyen análisis lineales y no lineales complejos. En el análisis en Abaqus existen dos enfoques de solución para resolver problemas: Abaqus standard y Abaqus explicit. El primero es un enfoque iterativo para resolver el equilibrio del sistema, lo cual puede conllevar a tener problemas para lograr la convergencia en los análisis con un comportamiento de material altamente no lineal; el método explícito puede resolver ecuaciones directamente sin iteraciones, proporcionando un método eficiente con una solución aproximada para problemas altamente no lineales [45]. El análisis por medio FEM se organiza comúnmente en tres bloques [46]:

Preprocesamiento: El modelo o material a analizar se construye definiendo la geometría y las propiedades. Se configuran las interacciones entre los materiales, las cargas y las condiciones de frontera. Posteriormente, la geometría se discretiza en elementos, que se definen en términos de nodos y conectividad de elementos. El tipo de elemento se elige para representar el tipo de problema a resolver. Con esta información, el procesador puede calcular la matriz de rigidez y el vector de fuerza.

Procesamiento: En la fase de solución del análisis, la subrutina del solucionador incluida en el programa de FEM resuelve el conjunto de ecuaciones simultáneas que genera el método de elementos finitos. La solución primaria se obtiene resolviendo los valores de grados de libertad nodal como desplazamientos y rotaciones. Posteriormente, los resultados derivados, como esfuerzos y deformaciones, se calculan en los puntos de integración.

Posprocesamiento: Se obtienen los resultados de las relaciones de esfuerzo, deformación y falla. La solución se puede analizar utilizando herramientas gráficas.

En la Figura 2.5 podemos apreciar los 3 pasos:

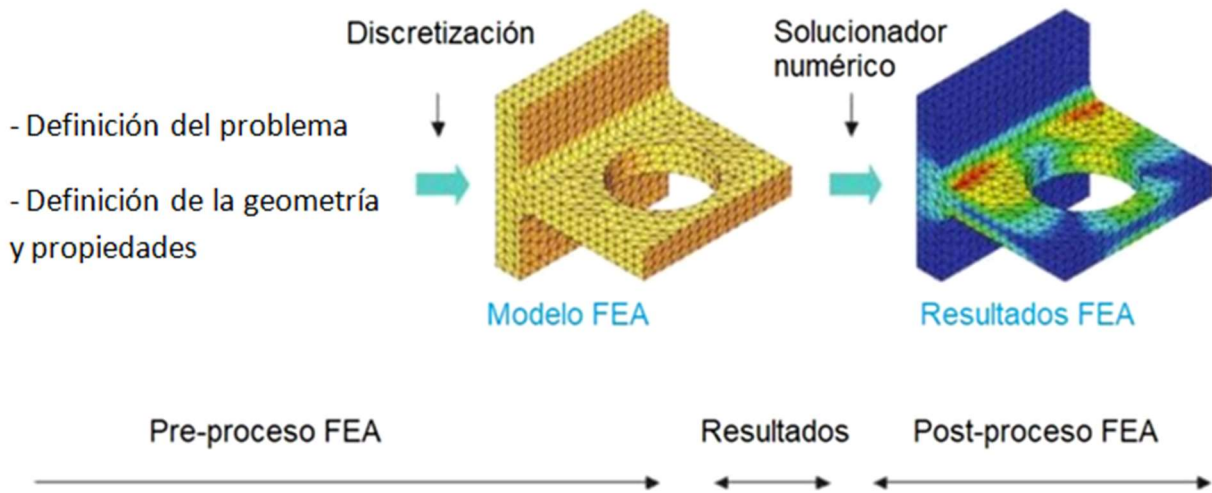


Figura 2.5 Pasos del método de elementos finitos [47]

2.8 Modelado en Abaqus

Para realizar un modelo en el software de FEM Abaqus se sigue una serie de pasos que se mencionan a continuación [48]:

- **Parte:** en este módulo se construye la geometría de un modelo. Esta se puede crear, modificar y manipularse por partes.
- **Propiedad:** en este módulo se definen los materiales y las secciones que son asignadas a las partes.
- **Montaje:** este módulo es para la creación de ensambles en el las partes creadas se posicionan en un sistema de referencia global.
- **Paso:** este módulo permite controlar el procedimiento del análisis a realizar además de configurar las variables de salida requeridas.
- **Interacción:** este módulo es para definir y manejar las interacciones mecánicas y térmicas entre regiones de un modelo o el modelo con los alrededores, además de determinar las restricciones en ellas.
- **Carga:** este módulo tiene el objetivo de definir y gestionar condiciones prescritas referentes a cargas, condiciones de frontera y campos preestablecidos.
- **Malla:** este módulo contiene las herramientas que permiten generar un mallado adecuado para cada una de las partes del modelo mediante la asignación de atributos de malla. Existen varias familias en cuanto al tipo de elementos se refiere. Destacan por

ejemplo los C3D8R, que son deformables (C) de tercera dimensión (3D) con 8 nodos (8) y pudiendo ser de integración reducida (R). Igualmente están los de tipo cohesivo como el COH3D8.

- **Optimización:** este módulo genera un grupo de restricciones y objetivos para realizar un estudio paramétrico con el fin de optimizar alguna tarea, parámetro o propiedad.
- **Trabajo:** este módulo se crea el trabajo que permite enviar el modelo para su análisis (simulación) y monitorear el progreso de este.
- **Visualización:** este módulo ofrece una visualización gráfica del modelo de elementos finitos y los resultados correspondientes.

Para poder analizar el comportamiento del concreto espumado, tomando en cuenta que presenta una falla progresiva, de manera diferente al concreto tradicional, necesitamos utilizar la propiedad de "crushable foams", la cual representa este tipo de falla. Para medir el comportamiento entre las uniones de los bloques utilizaremos la propiedad de "comportamiento cohesivo de contacto", presentadas a continuación.

2.8.1 Modelado de espumas usando el modelo de Crushable Foams [49]

Para el análisis de espumas y materiales celulares en el software Abaqus, se dispone del modelo de material "espumas triturables". Este modelo se presenta como dos modelos constitutivos fenomenológicos: el modelo de endurecimiento volumétrico y el modelo de endurecimiento isotrópico. Ambos modelos utilizan una superficie de fluencia con una dependencia elíptica del esfuerzo desviatorio sobre el esfuerzo de presión en el plano meridional.

El modelo de endurecimiento volumétrico está motivado por la observación experimental de que las estructuras de espuma suelen experimentar una respuesta diferente en compresión y tensión. En compresión, la capacidad del material para deformarse volumétricamente se ve reforzada por los procesos de pandeo de la pared celular [50] [51].

Se asume que la deformación de la celda de espuma no es recuperable instantáneamente y, por lo tanto, puede idealizarse como plástica para eventos de corta duración. En tensión, por otro lado, las paredes celulares se rompen fácilmente; y como resultado, la capacidad de carga en tensión puede ser considerablemente menor que su capacidad de carga en compresión.

El modelo de endurecimiento isotrópico fue desarrollado originalmente para espumas metálicas [52]; asume un comportamiento simétrico en tensión y compresión, y la evolución de la

superficie de fluencia se rige por una deformación plástica equivalente, que tiene contribuciones tanto de la deformación plástica volumétrica como de la deformación plástica desviatoria.

2.8.2 Comportamiento cohesivo de contacto

El comportamiento de cohesión de contacto está pensado principalmente para situaciones en las que el grosor de la interfaz es muy pequeño en comparación a las partes que une. En el software Abaqus, el comportamiento de una interfaz puede ser modelado con un comportamiento cohesivo basado en superficies, el cual también se puede usar para modelar la propagación de grietas en superficies inicialmente adheridas [53].

El modelado de daños le permite simular la degradación y eventual falla de la unión entre dos superficies unidas cohesivamente. El mecanismo de falla consta de dos partes: un criterio de iniciación del daño y una ley de evolución del daño. Se supone que la respuesta inicial es lineal, sin embargo, una vez que se cumple un criterio de inicio de daño, el daño puede ocurrir de acuerdo con una ley de evolución de daño definida por el usuario. La Figura 2.6 [53] muestra una respuesta típica de tracción-separación con un mecanismo de falla. Si el criterio de inicio del daño se especifica sin un modelo de evolución del daño correspondiente, el software evalúa el criterio de iniciación del daño solo con fines de salida; no hay ningún efecto sobre la respuesta de las superficies cohesivas (es decir, no se producirán daños).



Figura 2.6 Respuesta típica de tracción-separación [53]

2.9 Justificación

La mampostería de bloques de concreto (u otros materiales como el adobe) es un sistema de construcción muy antiguo. Sin embargo, a pesar de que es efectivo y resistente, las construcciones hechas con este método sin refuerzos estructurales no son muy resistentes frente a los fenómenos naturales y corren el riesgo de derrumbarse.

Es necesario modificar el sistema de construcción de bloques de concreto de tal manera que al utilizar los materiales propios de la región, se pueda obtener la misma resistencia a compresión y mejorar su resistencia a la tensión para que la falla no sea frágil, sin dejar a un lado el aspecto económico.

Una alternativa para mejorar estas características son los bloques de concreto espumado aligerado con una ondulación en las caras superior e inferior, que son las que entran en contacto al fallar frente a los sismos, es decir, al crear un bloque que tenga inclinación en dichas caras, la energía que asciende en el muro se disipará de forma global. Este diseño está inspirado en la estructura de la concha nácar. De esta forma se pretende mejorar el desempeño sísmico de estructuras hechas con bloques bioinspirados.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Procedimiento de elaboración del muro con bloques rectangulares y bloques con ángulo

3.1.1 Diseño de un muro bioinspirado

Se realizó el diseño de un muro bioinspirado en la estructura jerárquica de la concha nácar para lo cual se elaborarán elementos de construcción (blocks) con las características de la estructura de la concha nácar, es decir, con ondulaciones que promuevan un anclaje mecánico entre los bloques sometidos a una carga. El desempeño del muro bioinspirado se comparó con un muro hecho de bloques convencionales, es decir, rectangulares. El muro se hizo a una escala 1:7.5 ya que en un principio se pretendían hacer pruebas dinámicas sísmicas en los muros en la mesa de vibración sísmica descrita en la Sección 1.5.1, pero por cuestiones de tiempo los muros solo se probaron estáticamente y por medio de simulaciones numéricas.

La Figura 3.1 muestra un diagrama del diseño tanto de los muros con bloques rectangulares como de los muros con ángulo inspirados en la concha nácar hechos de concreto espumado con una densidad seca de 1200 kg/m^3 . Los muros bioinspirados se fabricaron con un ángulo de 3° siguiendo el diseño de Barthelat et al. [54].

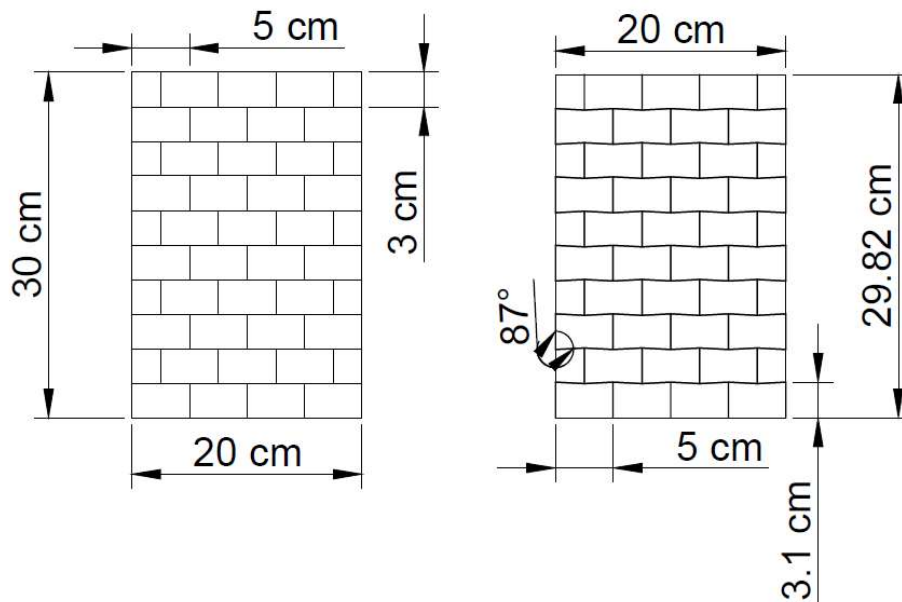


Figura 3.1 Diseño de muros con bloques rectangulares y con ángulo

3.1.2 Fabricación de los muros

Se elaboraron 2 muros para el análisis de sus propiedades mecánicas, uno con bloques rectangulares y el otro de bloques con ángulo de 3° . Las dimensiones de los muros fueron de 0.20 m x 0.30 m. Primero se elaboró la mezcla del concreto espumado como se muestra en la Figura 3.2. Para la elaboración de la mezcla de concreto espumado se consideró que la densidad seca es 100 kg/m^3 menor que la densidad fresca y que el peso de la espuma es el 6% del peso total de la mezcla. El cálculo de los materiales se determinó con una relación agua/cemento de 0.70 y una relación arena/cemento de 0.5. Se utilizó cemento gris tipo Portland CPC 30R de la marca CEMEX, cumpliendo 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. La espuma se elabora por medio de un generador de espuma “Junior foam generator” de la marca Propump Engineering LTD. A este generador se le conectó una manguera proveniente de la solución espumante; esta solución se prepara a partir de la dosificación de 97% agua y 3% de agente espumante EABASSOC. Posteriormente, el generador de espuma se conectó al equipo de aire comprimido (compresor) a una presión de $100 \pm 5 \text{ psi}$, lo cual genera una espuma con densidad de $50 \pm 2.5 \text{ kg/m}^3$; esta es la densidad objetivo de la espuma para que ésta tenga una estructura estable.

Para preparar la mezcla, primero se introdujo el cemento y la arena requerida en la revolvedora, y se dejó actuar entre 2 y 3 minutos. Posteriormente se vertió el agua para homogenizar la mezcla y se dejó actuar por 3 minutos más. Pasado este tiempo se procedió a introducir la espuma a la mezcla hasta alcanzar una densidad húmeda de 1300 kg/m^3 .



Figura 3.2 Elaboración de la mezcla de concreto espumado para la fabricación de los muros

Una vez que se obtuvo una mezcla uniforme con la densidad objetivo, esta se vertió en un molde previamente diseñado. Cuando la mezcla ya se encontraba en el molde, a este se le dieron pequeños golpecitos para lograr una compactación y acomodo de la mezcla en el molde y evitar que se crearan espacios vacíos que posteriormente afecten la resistencia del elemento terminado. El molde ya terminado se almacenó para su curado en bolsas por 28 días que es el tiempo de curado para que el concreto alcance el 99% de su máxima resistencia.

Para los muros, se usaron moldes de madera de 0.40 m por 0.30 m con 0.019 m de espesor (Figura 3.3). Para las pruebas mecánicas de tensión y compresión, se utilizaron moldes metálicos como se muestra en la Figura 3.3. A los moldes se les aplicó desmoldante para evitar que la mezcla se adhiriera a ellos.



Figura 3.3 Moldes para las muestras

Después de 28 días de curado de la mezcla, a partir de las placas de concreto espumado (Figura 3.4 a), se cortaron los bloques rectangulares de 0.05 m de ancho x 0.03 m de altura (Figura 3.4b). Finalmente se unieron los bloques con mortero como se muestra en la Figura 3.3b. Se usó el mismo procedimiento para la elaboración de los muros bioinspirados.



Figura 3.4 a) Placas de concreto espumado y corte de las mismas, b) Elaboración de muros de bloques con concreto espumado

La Figura 3.5 muestra los muros terminados tanto de bloques rectangulares como de bloques con ángulo.

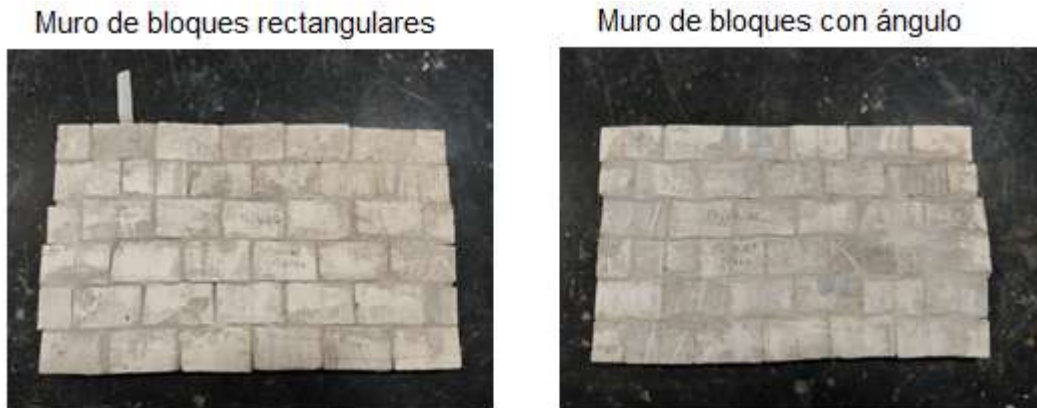


Figura 3.5 Muros de concreto espumado de 20 cm x 30 cm

Los muros elaborados de 20 cm x 30 cm se cortaron para obtener dos muestras de 15 cm x 15 cm, tanto de bloques rectangulares como de bloques con ángulo (Figura 3.6) para la prueba de compresión diagonal descrita en la siguiente sección.



Figura 3.6 Muros de bloques rectangulares y con ángulo de concreto espumado de 15 cm x 15 cm

3.2 Prueba mecánica de compresión diagonal de los muros de bloques

La prueba se realizó con base en la norma ASTM E519 "Método de prueba estándar para Tensión diagonal (esfuerzo cortante) en ensamblajes de mampostería" [55]. Este método de prueba fue desarrollado para medir con más precisión la resistencia al esfuerzo diagonal (cortante) de muros de mampostería. Para poder realizar la prueba de compresión diagonal se fabricaron 2 soportes (Figura 3.7) para poder colocar los muros en la máquina de pruebas universales de acuerdo al diagrama mostrado en la Figura 3.8.



Figura 3.7 Soportes para prueba de compresión diagonal

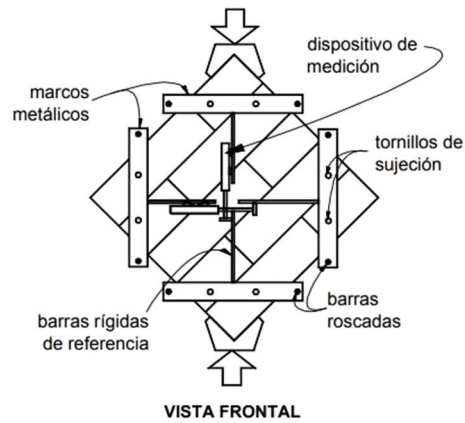


Figura 3.8 Diagrama de la prueba de compresión diagonal [56]

Las muestras se probaron en una máquina de pruebas universales Shimadzu AG-1 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japón) usando una velocidad de deformación de 0.25 mm/min (Figura 3.9).



Figura 3.9 Prueba de compresión diagonal

Para encontrar el esfuerzo cortante S^s a partir de los resultados de la prueba de compresión diagonal, se utilizó la siguiente fórmula [55]:

$$S^s = \frac{0.707P}{A_n}$$

Donde:

$P = \text{Fuerza aplicada (N)}$

$A_n = \text{Área de la muestra (mm}^2\text{)}$

Para obtener el área de la muestra se utiliza:

$$A_n = \left(\frac{W + h}{2}\right)t_n$$

Donde:

W = ancho de la muestra (mm)

h = altura de la muestra (mm)

t_n = espesor de la muestra (mm)

3.3 Pruebas de tensión y compresión del concreto espumado

Para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto espumado, se realizaron pruebas de compresión uniaxial según la norma BS-EN-12390 utilizando probetas cúbicas con dimensiones de 100 mm × 100 mm × 100 mm (Figura 3.10a y 3.10b). Las pruebas se hicieron en una máquina de pruebas universales Shimadzu AG-1 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japón) (Figura 3.10a), equipada con una celda de carga de 100 kN, y usando una velocidad de deformación de 2.4 mm/min. El comportamiento a tensión del concreto espumado se evaluó de acuerdo con la norma ASTM C307 (ASTM International, West Conshohocken, PA, EE. UU.) utilizando probetas en forma de hueso (Figura 3.10c) con una longitud de 76 mm y un área de sección transversal de 25.4 mm x 25.4 mm. Las muestras se colocaron en la máquina Shimadzu AG-1, equipada con una celda de carga de 20 kN (Figura 3.10c), y se probaron en tensión uniaxial directa con una velocidad de deformación de 1 mm/min. Todas las muestras se dejaron curar durante al menos 28 días antes de la prueba.



Figura 3.10 a) Máquina Shimadzu AG1, b) Prueba de compresión, c) Prueba de tensión

3.4 Muro de ladrillos de barro y validación en la mesa sísmica

En esta sección se muestra la metodología de un primer muro preliminar que se elaboró de barro cocido, el cual tiene una densidad similar al adobe, para las pruebas sísmicas en la mesa de vibración. Aunque estas pruebas no dieron resultados satisfactorios y por la limitante del tiempo no se construyeron más muros similares, se presenta la metodología y resultados para fines académicos. La Figura 3.11 muestra el molde que se utilizó para colar la cadena de cimentación de 0.018 m x 0.4 m, sobre la cual se construyó el muro.

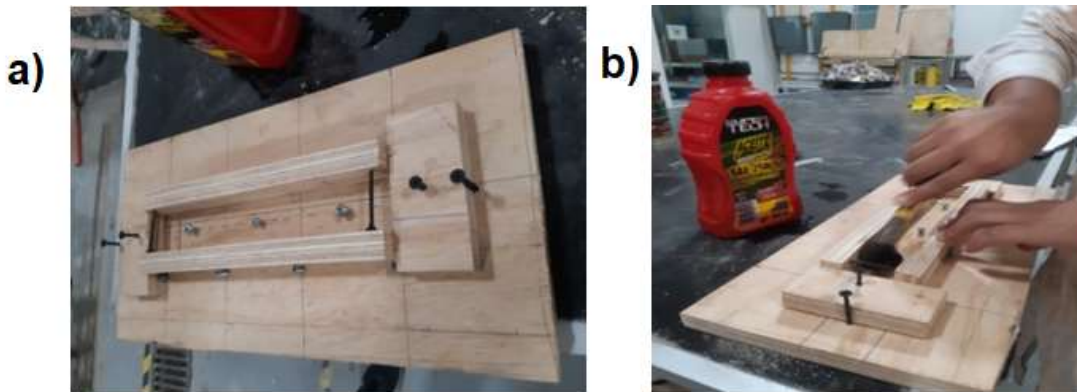


Figura 3.11 a) Molde con cimbra, b) Colocación de aceite en la cimbra.

Para el mortero de unión entre los bloques y la cadena se preparó la mezcla midiendo y pesando las partes de cemento y arena (Figura 3.12 a), para posteriormente verter agua hasta que la mezcla se tornó manejable (Figura 3.12b). Posteriormente se colocó la mezcla en el molde de la cadena.

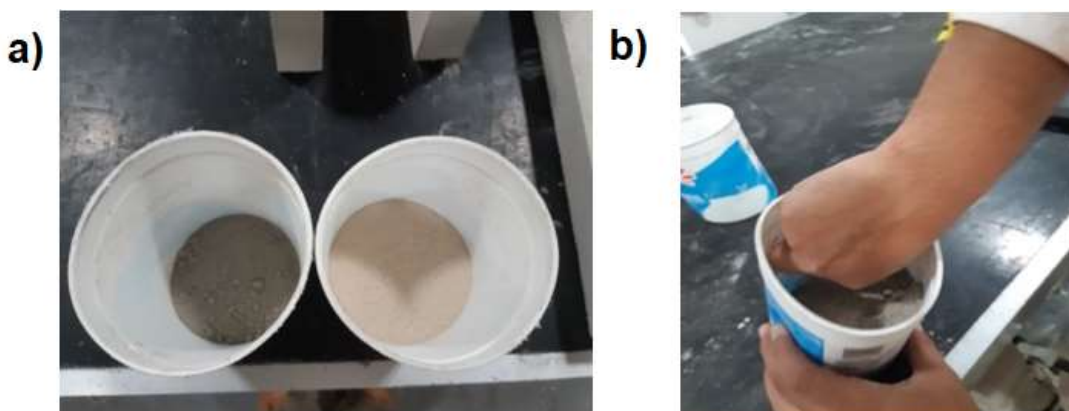


Figura 3.12 a) Cemento y arena, b) Realización de la mezcla

Antes de colocar cada ladrillo para la construcción del muro, éstos se humedecieron totalmente para evitar que al momento de colocar el mortero (Figura 3.13a), éste perdiera el agua y no se

lograra la unión mortero-bloque. Posteriormente se colocó el mortero sobre la cadena y posteriormente se fueron colocando los ladrillos, nivelando cada fila y verificando que el muro esté totalmente vertical (Figura 3.13b).

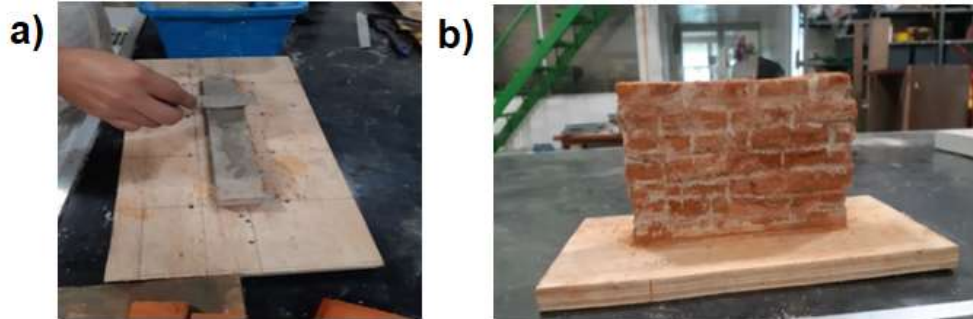


Figura 3.13 a) Armado del muro, b) Muro terminado

Para verificar el comportamiento del muro realizado se procedió a realizar la prueba experimental en la mesa sísmica. Con ayuda de los programas Matlab y SimuLink, un transformador diferencial variable lineal (LVDT) para medir los desplazamientos de la estructura y un acelerómetro se observó el comportamiento del muro frente a los diferentes sismos a los que fue sometido.

En la Figura 3.14 se puede observar cada uno de los elementos que fueron utilizados para la validación del muro de ladrillos.

- | | |
|---|--------------------------------|
| a) Mesa sísmica. | d) Acelerómetro. |
| b) Soporte universal. | e) Muro (Prototipo estándar). |
| c) LVDT con rango de desplazamiento de 10 cm. | f) Equipo transmisor de datos. |
| | g) Cámara. |



Figura 3.14 Elementos para la validación del "Prototipo estándar"

3.5 Simulaciones numéricas

3.5.1 Generación de los modelos de bloques rectangulares y bloques con ángulo

Las simulaciones numéricas se realizaron utilizando el software del método de los elementos finitos (FEM) Abaqus/Explicit versión 2016 [57]. La simulación FEM se utilizó como herramienta para investigar la concentración de esfuerzos localizados y la deformación plástica que pudiera provocar grietas y fallas durante una carga dinámica [18].

Para el ensamblaje del muro de bloques rectangulares, se utilizaron 2 tipos de bloques rectangulares, el primero de 3 cm x 5 cm x 1.9 cm (Figura 3.15a), el cual es el bloque rectangular completo, mientras que el segundo bloque fue de 3 cm x 2.5 cm x 1.9 cm (Figura 3.15b), es decir, la mitad de un bloque completo, con el fin de rellenar las esquinas del muro.

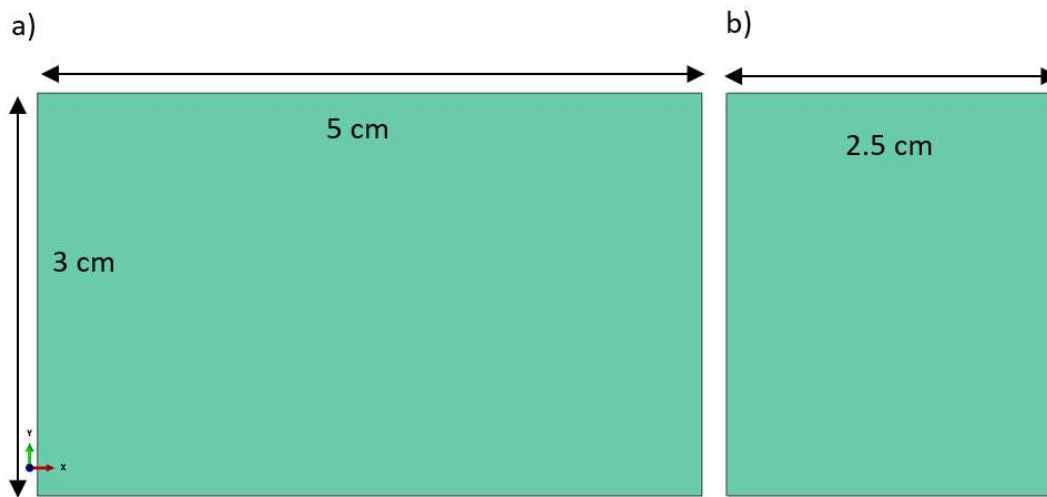


Figura 3.15 a) Bloque rectangular completo, b) Medio bloque rectangular

Para el ensamblaje del muro de bloques con ángulo, se utilizaron 4 tipos de bloques con ángulo, un primer bloque de 3.1 cm x 5 cm x 1.9 cm (Figura 3.16a), el cual es el bloque con ángulo en una sola cara, un segundo bloque de 3.1 cm x 5 cm x 1.9 cm (Figura 3.16b) con ángulo en ambas caras superior e inferior, un tercer bloque de 3.1 cm x 2.5 cm x 1.9 cm (Figura 3.16c), el cual es la mitad del primer bloque, y por último un cuarto bloque de 3.1 cm x 2.5 cm x 1.9 cm (Figura 3.16d), el cual es la mitad del bloque 2; estos 2 últimos se utilizaron para rellenar las esquinas de las filas.

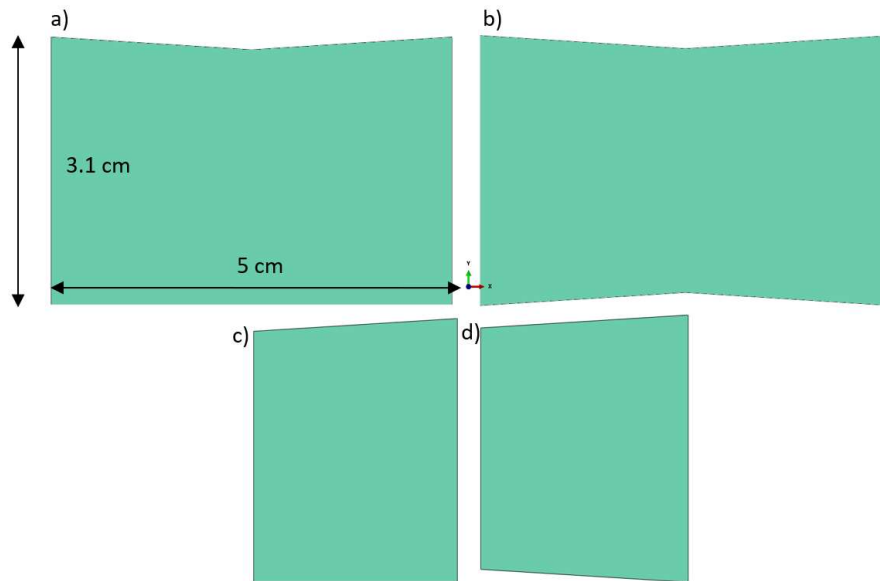


Figura 3.16 a) Bloque con una cara con ángulo, b) Bloque con ambas caras con ángulo, c) Bloque mitad del bloque uno, d) Bloque mitad del bloque 2

Los modelos FEM consistieron en: 1) un muro cuadrado de 15 cm x 15 cm para la prueba de compresión diagonal para ambos tipos de bloques (Figura 3.17), 2) un muro rectangular de 20 cm x 30 cm para la prueba de tensión para ambos tipos de bloques (Figura 3.18) y 3) un muro rectangular de 40 cm x 30 cm para la prueba sísmica para ambos tipos de bloques (Figura 3.19).

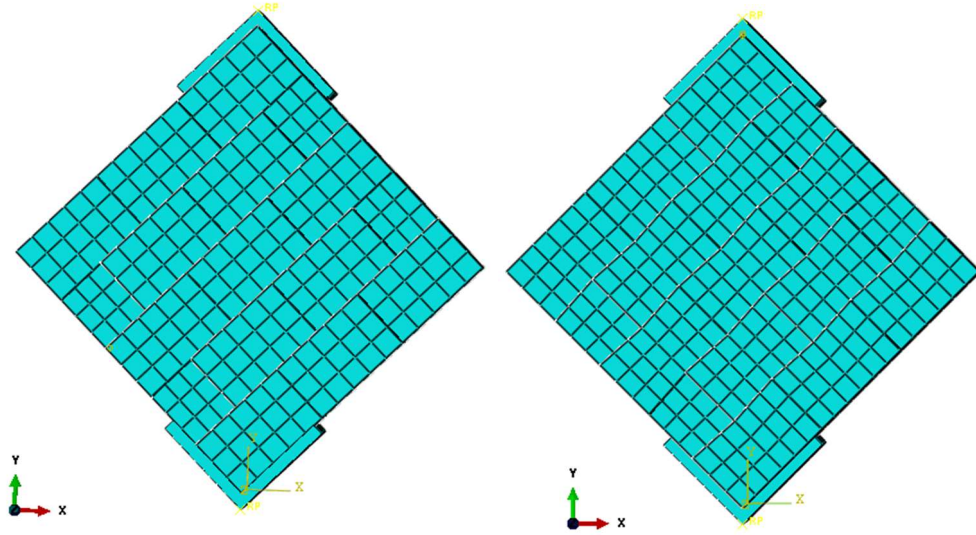


Figura 3.17 Muro cuadrado de 15 cm x 15 cm

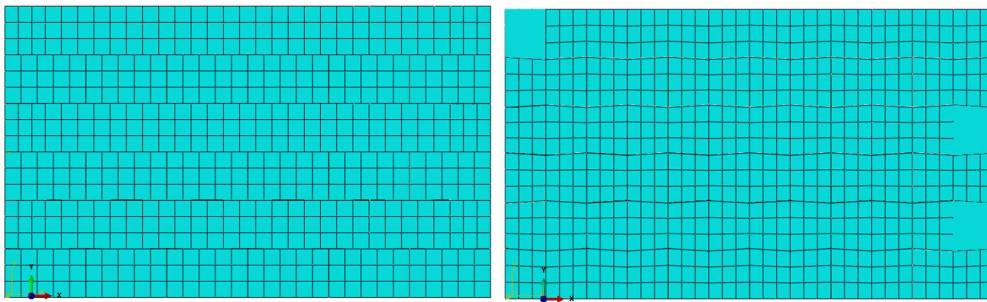


Figura 3.18 Muro rectangular de 20 cm x 30 cm

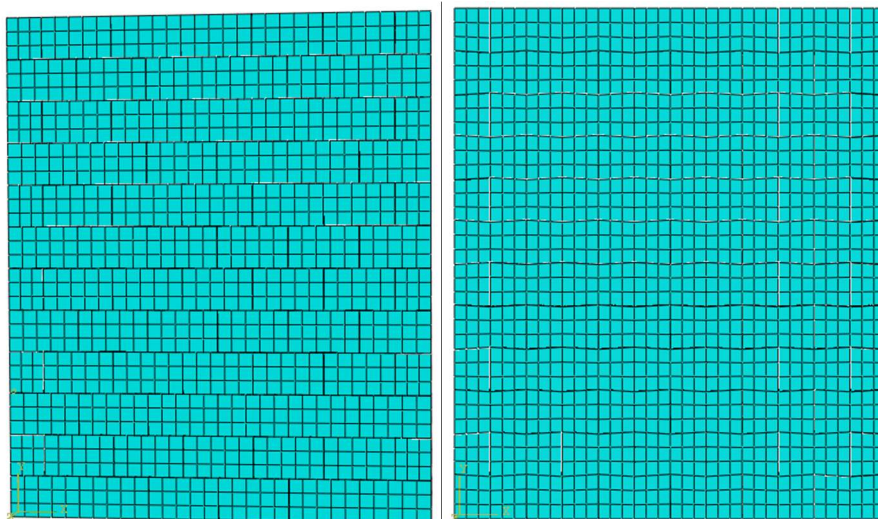


Figura 3.19 Muro rectangular de 40 cm x 30 cm

Para el mallado de los modelos se utilizaron elementos tipo ladrillo de 8 nodos (C3D8R) con una formulación de integración reducida. Se utilizó un tamaño de elemento global de 10 mm. El

comportamiento elástico del material de concreto espumado utilizado para el muro se modeló utilizando un módulo elástico de compresión de $E = 5 \text{ GPa}$, una relación de Poisson de $\nu = 0.05$ y una densidad de $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$. El comportamiento plástico se modeló utilizando el modelo de material de "Crushable Foam" con los siguientes parámetros: relación de tensión de fluencia por compresión $k = 1$ y relación de tensión de fluencia hidrostática $k_t = 0.1$ [58].

Para la prueba de compresión diagonal del muro cuadrado de $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ se colocó en la parte inferior un encastre, restringiendo el movimiento, mientras que en la parte superior se permitió el desplazamiento de 4 mm sobre el eje "y" aplicando una carga constante (Figura 3.20) para la prueba de cortante diagonal.

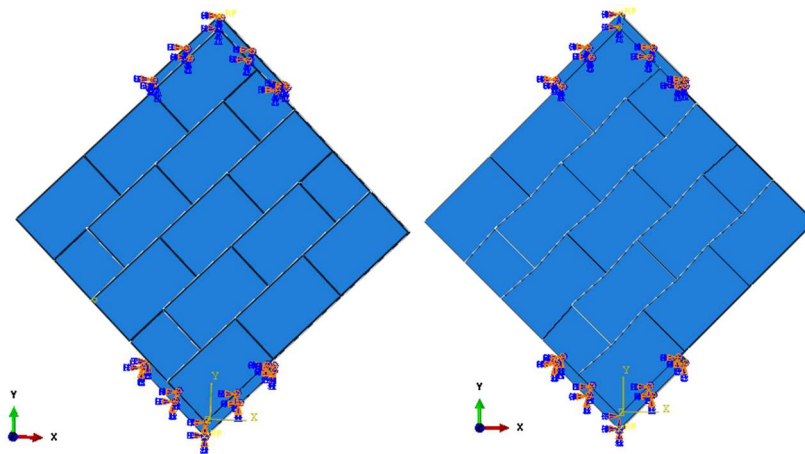


Figura 3.20 Restricciones en la prueba de compresión diagonal, muro de $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ para ambos tipos de bloques

Para la prueba de tensión del muro de $20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ se le aplicó una restricción de "encastre" en el lado izquierdo del muro, con el fin de mantenerlo sin desplazamiento (Figura 3.21), mientras que en el lado derecho del muro se permitió el desplazamiento en el eje x para la prueba de tensión. El tiempo total del análisis fue de 1 s .

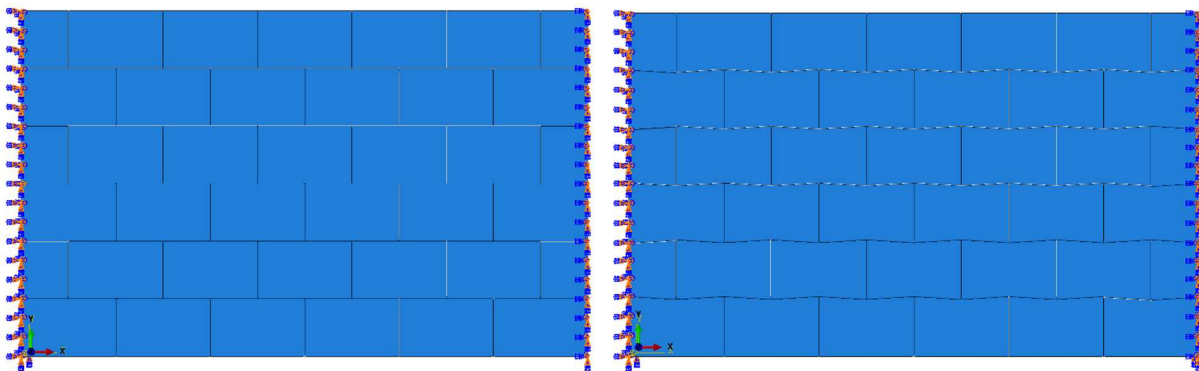


Figura 3.21 Restricciones en el muro de $20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ para ambos tipos de bloques

Entre las restricciones que se colocaron para el muro de 40 cm x 30 cm (Figura 3.22) para la prueba sísmica son:

- Un movimiento oscilatorio cíclico con una amplitud de 20 mm y una frecuencia de 4 Hz en la dirección X.
- Muro con carga gravitatoria de -9.81 m/s^2 .

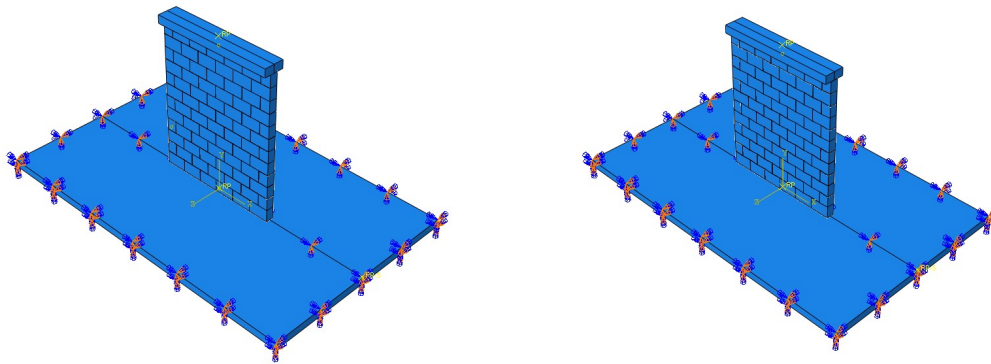


Figura 3.22 Muro de 40 cm x 30 cm con ambos tipos de bloques para prueba sísmica

Se utilizó la siguiente propiedad cohesiva (Tabla 3.1) para la unión entre bloques y mortero en todos los modelos.

Tabla 3.1 Propiedades cohesivas

Propiedad	Característica	Valor
Comportamiento tangencial	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de fricción 	<ul style="list-style-type: none"> • 0.4
Comportamiento normal	<ul style="list-style-type: none"> • Presión 	<ul style="list-style-type: none"> • Contacto fuerte • Permitir separación después de contacto
Comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamiento de 	<ul style="list-style-type: none"> • $K_{nn} = 4$ • $K_{ss} = 4$

cohesivo	separación por tensión	<ul style="list-style-type: none">• $K_{tt} = 4$
Daño	<ul style="list-style-type: none">• Evolución del daño	<ul style="list-style-type: none">• Normal = 1• Cortante 1,2 = 5

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales

4.1.1. Resultados experimentales de la prueba de compresión diagonal de los muros de bloques de concreto espumado

En las Figuras 4.1a y 4.1b se pueden ver los resultados de esfuerzo cortante versus desplazamiento de la prueba experimental de compresión diagonal de los muros de bloques rectangulares y bloques con ángulo, respectivamente. La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos de estas pruebas.

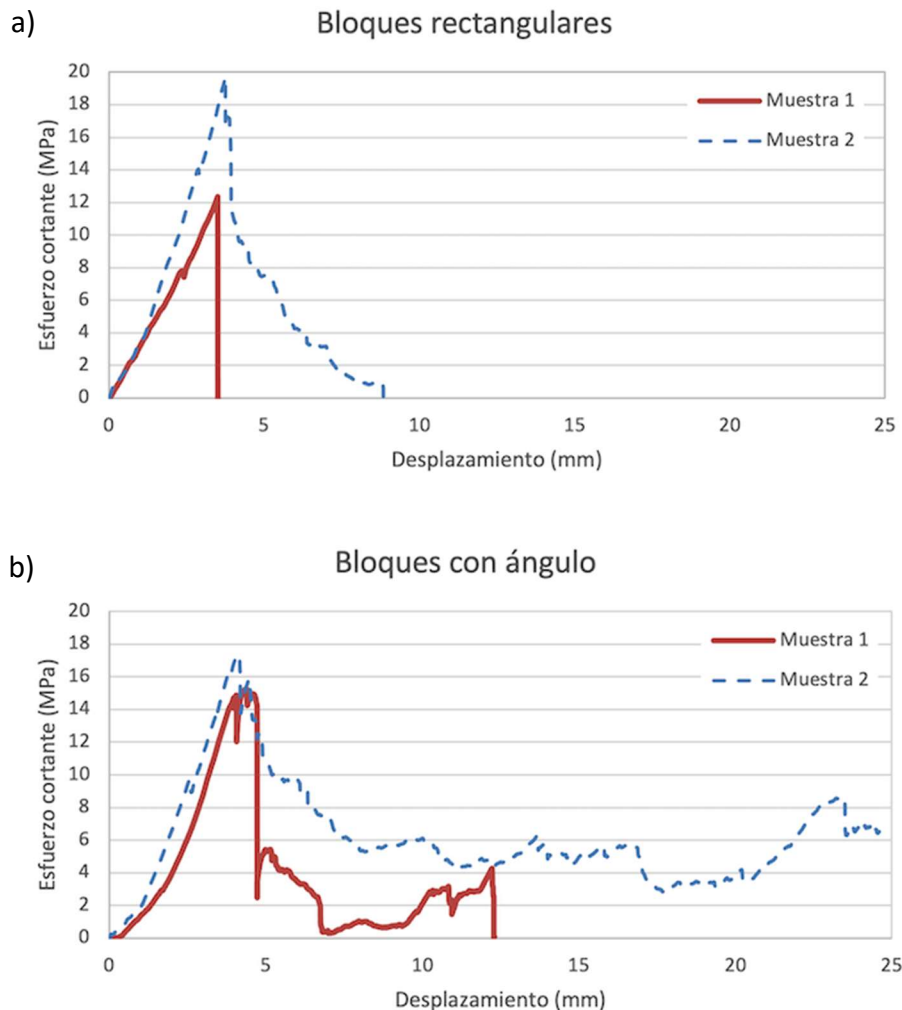


Figura 4.1 Resultados de prueba de compresión diagonal de muros de concreto espumado de a) bloques rectangulares y b) bloques con ángulo

Tabla 4.1 Resultados experimentales de la prueba de compresión diagonal

Propiedad	Bloques rectangulares	Bloques con ángulo
Carga máxima promedio (N)	5766.09 ± 1548.56	5819.06 ± 1313.24
Esfuerzo máximo promedio (MPa)	15.98 ± 4.29	16.13 ± 3.64
Desplazamiento en la carga máxima promedio (mm)	3.61 ± 1.79	4.36 ± 5.33
Máximo desplazamiento promedio (mm)	6.19	18.46

Se puede observar en la Tabla 4.1 que los muros con bloques con ángulo resistieron en promedio 16.13 MPa de esfuerzo cortante mientras que los muros con bloques rectangulares resistieron en promedio 15.98 MPa de esfuerzo cortante. Además, los muros con bloques con ángulo presentaron un desplazamiento a la fractura de 4.36 mm en comparación con los 3.61 mm presentados por los muros con que bloques rectangulares. Es importante destacar que en general, después de la fractura, los muros con bloques con ángulos continuaron resistiendo un parte de la carga máxima lo cual demuestra un incremento en la tenacidad de los muros bioinspirados. Esto puede deberse al anclaje mecánico ya que, al presentar un ángulo de contacto entre bloques, éste reduce el desplazamiento horizontal entre los bloques, disipando la energía producida por las cargas, simulando el comportamiento de la estructura jerárquica de la concha nácar. Tingyi Miao et al. [59] midieron el rendimiento balístico de placas de aluminio bioinspiradas en la concha nácar, utilizando placas compuestas similares al nácar de 5, 7 o 9 capas que consisten en muchas tabletas unidas entre sí con adhesivo epoxi endurecido. Ellos concluyendo que la falla de las muestras impactadas confirmó la mejora del rendimiento de impacto de las placas compuestas con forma de nácar debido a la estructura jerárquica que facilita globalizada, similar a los resultados en la Figura 4.1. Batherlat analizó el comportamiento del vidrio laminado bioinspirado en la disposición tridimensional “ladrillo y mortero” del nácar. Concluyeron que el vidrio transparente propuesto duplica el deslizamiento a gran escala de tabletas individuales en tres dimensiones del nácar por el esfuerzo a cortante de las capas intermedias, que absorben grandes cantidades de energía mecánica, proporcionando al material tenacidad [60].

En las Figuras 4.2a y 4.2b se pueden observar las probetas de los muros con bloques rectangulares y con bloques con ángulo, respectivamente, después de la prueba de compresión

diagonal. Se puede ver que el caso de los muros con bloques rectangulares la falla principalmente ocurrió en las juntas y se desplazó atravesando los bloques. En el caso de los muros con bloques con ángulo, la falla ocurrió principalmente atravesando los bloques y también en ocasiones en las juntas. Este tipo de falla más globalizada en los muros con bloques con ángulo explica la mayor tenacidad y esfuerzo a cortante observados en las pruebas de compresión diagonal.



Figura 4.2 Muestras de muros de a) bloques rectangulares y b) bloques con ángulo después de la prueba de compresión diagonal.

En la Figura 4.3 se puede ver el comportamiento de las muestras de concreto espumado para la prueba de compresión. Las muestras presentan un comportamiento similar, es decir, después de alcanzar la resistencia máxima, las muestras siguen resistiendo un porcentaje de esta mientras se van compactando los espacios vacíos del material celular. Al llegar a una deformación de ~ 0.7 , el material llega a la etapa de densificación donde ya casi no existen vacíos y al empezar a interactuar las paredes de las celdas, el material se empieza a comportar como sólido. En la Tabla 4.2 se encuentran las propiedades obtenidas de la Figura 4.3.

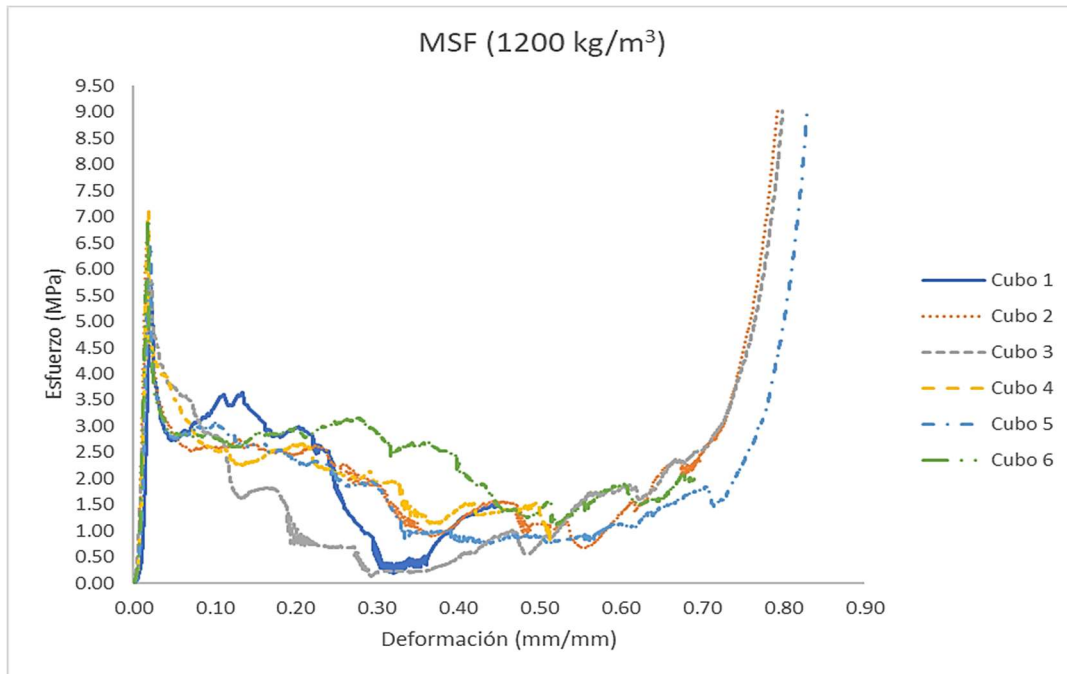


Figura 4.3 Resultados de la prueba de compresión del concreto espumado para densidad de 1200 kg/m³

Tabla 4.2 Propiedades de la prueba de compresión

Mezcla	Densidad seca (kg/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deformación a la cedencia (mm/mm)
MSF 1200	1183.71 ± 7.73	6.43 ± 0.55	579.80 ± 87.81	0.020 ± 0.002

Al analizar el comportamiento del concreto espumado a tensión (Figura 4.4) se ven diferentes picos de esfuerzo, resistiendo en promedio 1.04 MPa. Todas las muestras fallaron de manera frágil como se esperaba. En las pruebas de tensión no se ve una recuperación del concreto espumado debido a que la prueba provoca que los espacios vacíos se agranden. Las propiedades obtenidas de la Figura 4.4 se encuentran en la Tabla 4.3.

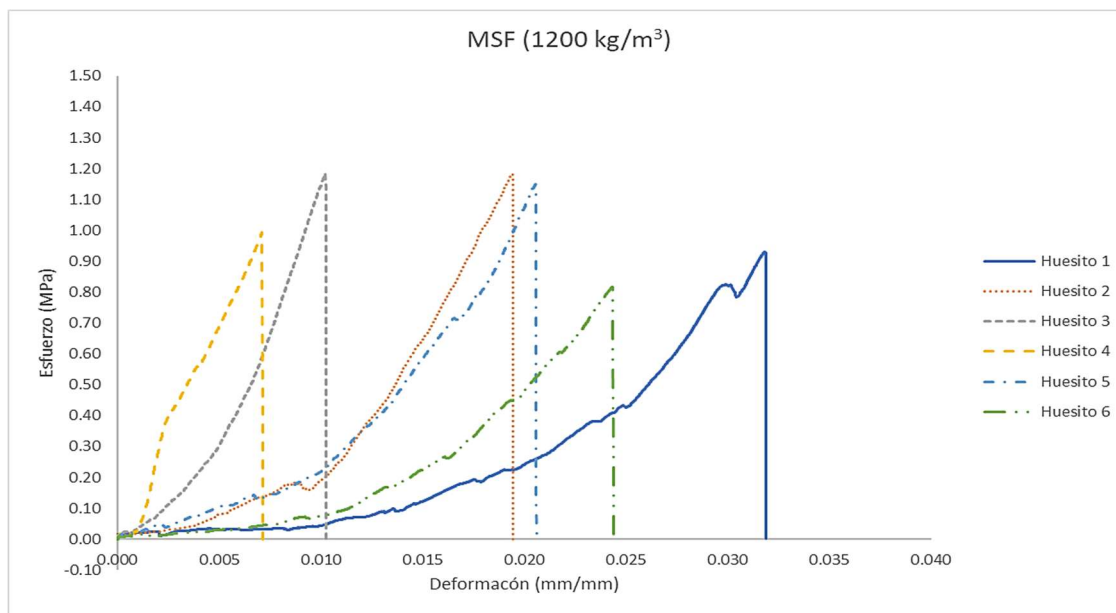


Figura 4.4 Resultados de prueba de tensión de concreto espumado para densidad de 1200 kg/m³

Tabla 4.3 Propiedades de la prueba de tensión

Mezcla	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación a la cedencia (mm/mm)
1200 kg/m ³	1.04 ± 0.14	0.019 ± 0.008

4.2 Resultados de la validación experimental del muro de ladrillos de barro en la mesa sísmica

El muro de ladrillos de barro fue colocado en la mesa sísmica (Figura 4.5) utilizando el sismo El centro (California, 8 de mayo de 1940) disponible en el software de la mesa, debido a la manera tan repentina de hacer los cambios de aceleración que presenta este sismo y al momento de realizar la validación en la mesa sísmica fue el que más movimientos realizó.

La Tabla 4.4 muestra los resultados datos de los sensores de la mesa sísmica en la columna izquierda y los adquiridos por los sensores fijados al muro (acelerómetro y LVDT) en la columna derecha. Los datos que arrojó el acelerómetro indican que la aceleración fue similar a la prevista por los datos de la mesa sísmica. El desplazamiento máximo según la mesa sísmica fue de 4.8 cm similar al resultado que arroja el LVDT. Esto significa que la estructura se

mantuvo totalmente rígida ya que se desplazó lo mismo en la base del muro que en la parte superior.

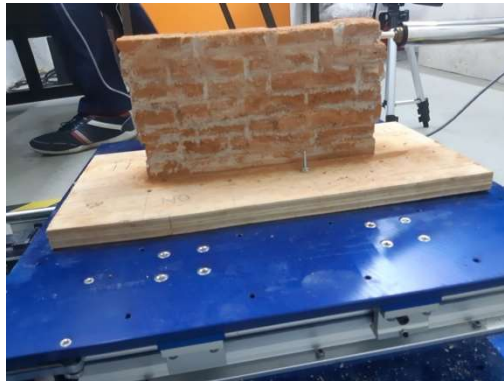


Figura 4.5 Prototipo estándar después de la validación experimental, vista frontal

Tabla 4.4 Resultados del sismo El Centro aplicado al muro de ladrillos	
DATOS REGISTRADOS POR LA MESA	DATOS DEL ACELEROMETRO Y LVDT
<p>Table Acceleration (g)</p>	<p>Aceleración en la estructura (g)</p> <p>Tiempo (s)</p>
<p>Table Position (cm)</p> <p>time (s)</p>	<p>Desplazamiento LVDT</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Tiempo (s)</p>

4.3 Resultados de las simulaciones numéricas

4.3.1. Resultados de la simulación de la prueba de compresión diagonal en los muros de 15 x 15 cm

Las Figura 4.6a y 4.6b muestran la distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) en los muros de bloques rectangulares y de bloques con ángulo, respectivamente, para desplazamientos verticales de compresión (U_2) de 1 mm y 2 mm, así como para el desplazamiento en el cual ocurre la falla (3.2 mm para el muro de bloques rectangulares y 3.5 mm para el muro con bloques con ángulo).

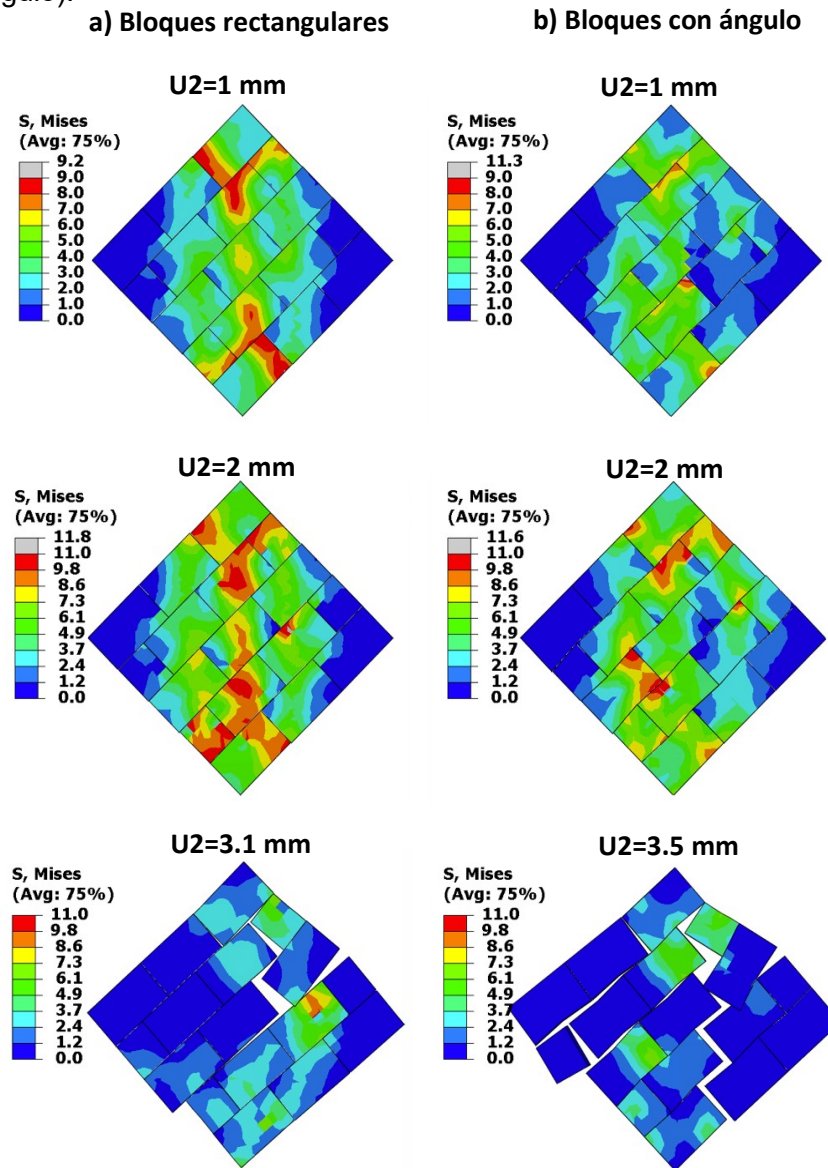


Figura 4.6 Distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) para diferentes desplazamientos verticales: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.

Se puede observar en la Figura 4.6 que, para 1 mm de desplazamiento vertical, hay una concentración de esfuerzos en la parte central de los muros con bloques rectangulares (indicado por las zonas rojas) lo cual no se observa en el muro con bloques con ángulo. Para 2 mm de desplazamiento las zonas de concentración de esfuerzos son mayores en el muro con bloques rectangulares que en el muro con bloques con ángulo; además en este último, se puede ver que los esfuerzos están mejor distribuidos en el espécimen lo cual disminuye la concentración de esfuerzos localizada. Por último, se puede observar en la última fila de la Figura 4.6 que la muestra con bloques rectangulares falla antes (a los 3.1 mm de desplazamiento) que la muestra con bloques con ángulo (a los 3.5 mm de desplazamiento) demostrando que este último tiene una mayor tenacidad debido a la mejor distribución de esfuerzos en toda la muestra ocasionada por la estructura bioinspirada en la concha nácar.

Las Figura 4.7a y 4.7b muestran una comparación entre los resultados experimentales y los numéricos (curvas esfuerzo-desplazamiento) para los muros con bloques rectangulares y bloques con ángulo, respectivamente. Se puede ver que los modelos FEM pueden predecir el esfuerzo cortante máximo con una diferencia de menos del 20%, sin embargo, los modelos no pueden predecir correctamente el desplazamiento a la ruptura, lo cual se le atribuye al hecho de que el modelo constitutivo de los bloques de concreto espumado no tiene un modelo de falla sino únicamente plástico, es decir, en la simulación los bloques no pueden fallar sino solamente las juntas, mientras que en el experimento fallan tanto las juntas como los bloques (Figura 4.2).

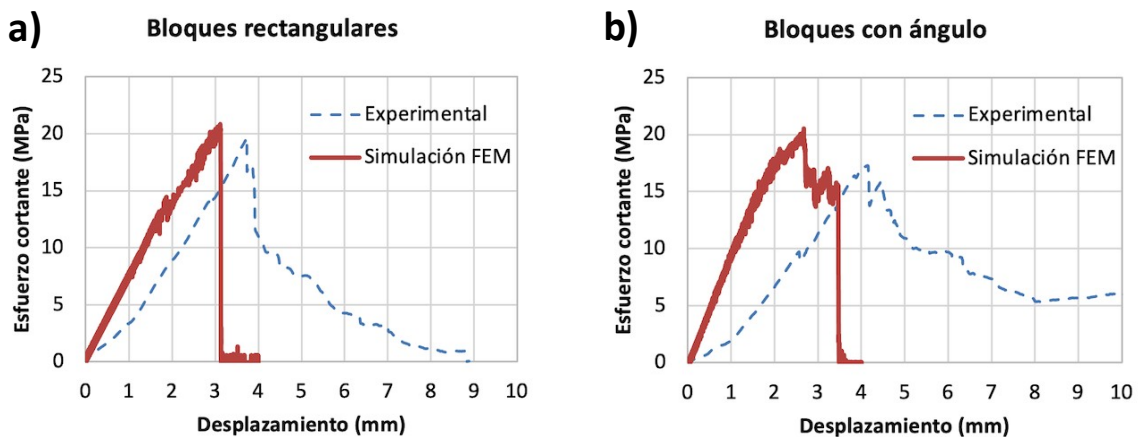


Figura 4.7 Comparación de los resultados experimentales y numéricos de la prueba de compresión diagonal para a) muros con bloques rectangulares y b) muros con bloques con ángulo.

Las Figuras 4.8a y 4.8b muestran el daño de las juntas (interfaces) entre los bloques (variable CSDMG) donde el valor de 1 (zona roja) indica que la interface ha fallado y los bloques ya no están unidos. Se puede ver que para desplazamientos correspondientes a 0.1 mm antes del desplazamiento a la ruptura, es decir, 3 mm para los bloques rectangulares y 3.4 mm para los bloques con ángulos, las zonas de desunión entre bloques son mayores para el muro con bloques con ángulo. Esto demuestra que para este muro las deformaciones ocurren de forma globalizada ocasionando grietas en toda la muestra mientras que para el muro de bloques rectangulares las grietas son localizadas. Cuando la muestra de bloques rectangulares falla se puede ver que solo existen dos grietas principales mientras que para la muestra con bloques con ángulo se pueden apreciar hasta cuatro grietas, lo cual resulta en una mayor absorción de energía.

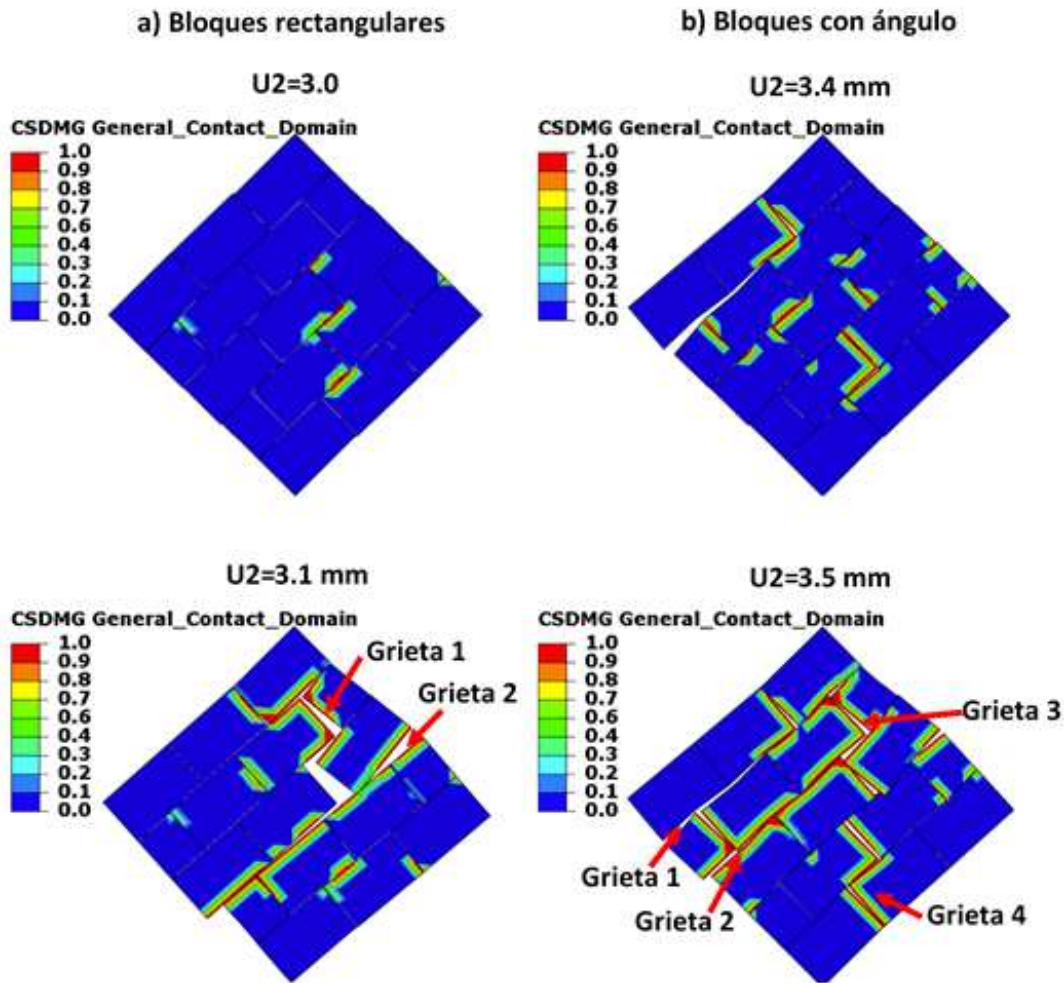


Figura 4.8 Daño en las juntas (interfaces) entre los bloques para: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.

Las Figuras 4.9a y 4.9b muestran los desplazamientos horizontales (U_1) para desplazamientos correspondientes a 0.1 mm antes del desplazamiento vertical a la ruptura, es decir, $U_2=3$ mm para los bloques rectangulares y $U_2=3.4$ mm para los bloques con ángulos. Se puede observar que, en el muro con bloques con ángulo, las esquinas laterales tanto izquierda como derecha, tiene un desplazamiento horizontal mayor que el observado en el muro con bloques rectangulares. Esto demuestra que el muro bioinspirado se deforma más que el muro convencional debido a su estructura la cual permite deformaciones globalizadas.

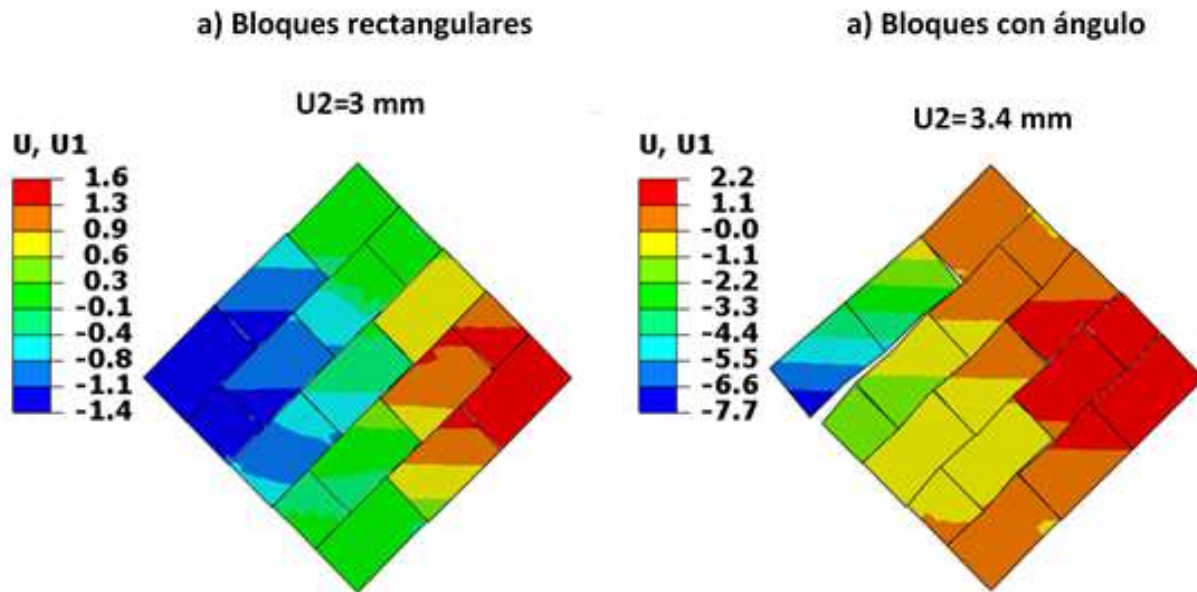


Figura 4.9 a) Desplazamientos horizontales (U_1) a) en el muro de bloques rectangulares, b) en el muro de bloques con ángulo.

4.3.2. Resultados de la simulación de la prueba de tensión en los muros de 20 cm x 30 cm

En la Figura 4.10 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la simulación de la prueba de tensión de los muros de 20 x 30 cm. Se puede observar que ambos muros llegan al primer pico de esfuerzo a una deformación de 0.45%. Se esperaría que después de este punto el muro con bloques rectangulares falle de forma frágil, sin embargo, como el modelo constitutivo del concreto espumado no tiene un criterio de falla, el muro sigue resistiendo carga. Se puede ver que el esfuerzo en el muro de bloques con ángulo ha sobrepasado 1 MPa que es el valor la resistencia a la tensión (Ver Tabla 4.4).

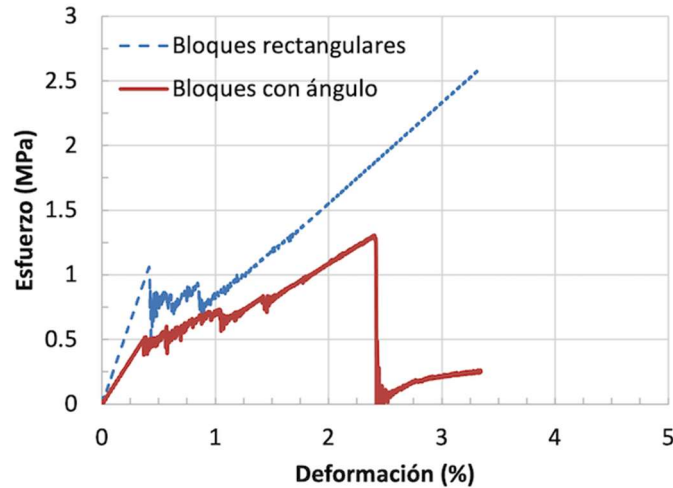


Figura 4.10 Curvas esfuerzo-deformación de las simulaciones de la prueba de tensión para muros con bloques rectangulares y muros con bloques con ángulo.

Las Figuras 4.11a y 4.11b muestran la distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) en los muros con bloques rectangulares y bloques con ángulo, respectivamente, al momento de la primera falla. Se puede observar que para el muro con bloques rectangulares existen concentraciones de esfuerzo (indicado por flechas rojas) las cuales siguen un patrón vertical en donde se esperaría que el muro falle si estuviera implementado un criterio de falla. Esto se puede ver con más claridad en la Figura 4.12a la cual muestra el daño de las juntas (interfaces) al momento de la falla entre los bloques rectangulares.

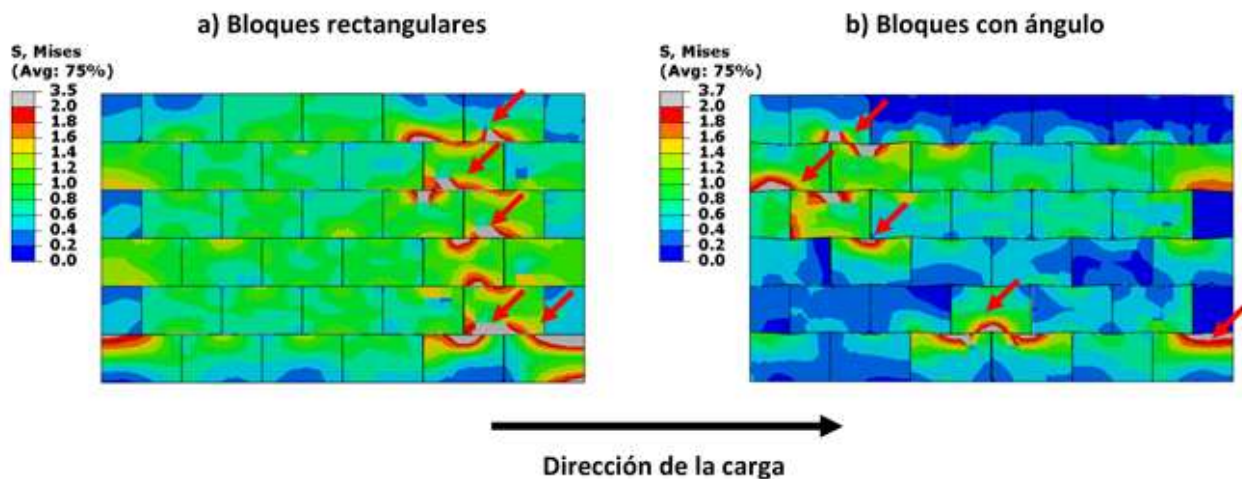


Figura 4.11 Distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) al momento de la primera falla en: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.

Se puede observar en la Figura 4.11b que las concentraciones de esfuerzo (indicado con flechas rojas) en el muro con bloques con ángulo están mejor distribuidas en todo el espécimen por lo que se espera una falla más controlada y distribuida en todo el espécimen. La Figura 4.12b muestra que solo en una región existe una falla de las juntas. Este comportamiento del muro con bloques con ángulo podría ser de beneficio para una vivienda ya que la casa no colapsaría de forma catastrófica, es decir de forma frágil.

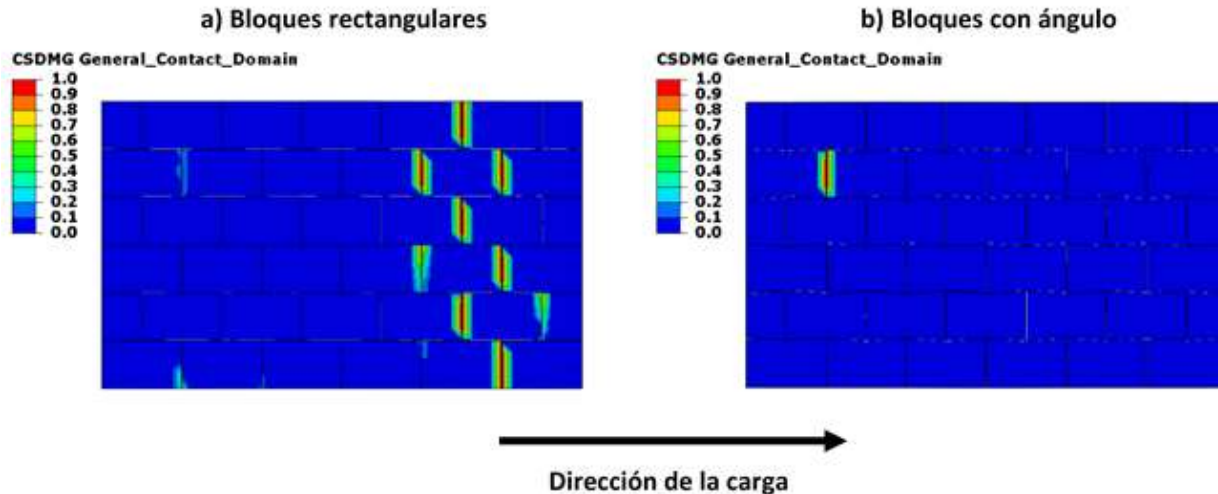


Figura 4.12 Daño en las juntas (interfaces) al momento de la primera falla en: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.

4.3.3 Resultados de la distribución de esfuerzos producido en el muro de bloques rectangulares y bloques con ángulo de 40 cm x 30 cm

En las Figuras 4.13a y 4.13b se observa la distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) en los muros con bloques rectangulares y bloques con ángulo, respectivamente, sometidos a la carga sísmica sinusoidal en la mesa de vibración, para un tiempo $t = 1$ s y al momento de falla. Se puede observar que para $t = 1$ s, el muro de bloques rectangulares presenta un esfuerzo localizado en la esquina inferior derecha, mientras que el muro de bloques con ángulo presenta concentraciones de esfuerzos varias zonas lo cual demuestra que la estructura inspirada en la concha nácar distribuye las deformaciones de forma globalizada. Al momento de la falla (1.1 s para el muro con bloques rectangulares y 1.22 segundos para el muro con bloques con ángulo) las zonas de concentraciones de esfuerzos siguen siendo las mismas pero el nivel de esfuerzos ha aumentado.

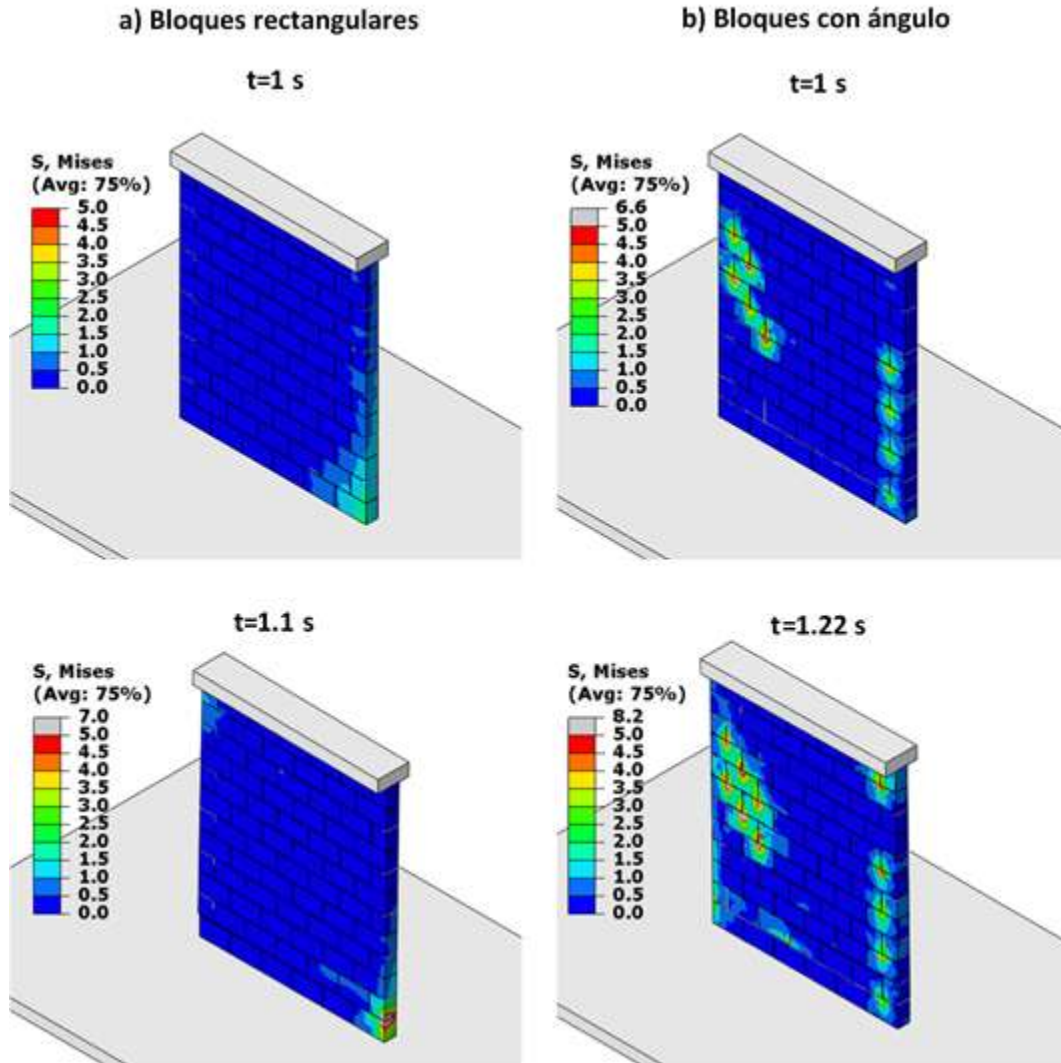


Figura 4.13 Distribución de esfuerzos de von Mises (MPa) para los muros sometidos a una carga sísmica sinusoidal en un tiempo $t=1$ s y al momento de la falla: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo

Las Figuras 4.14a y 4.14b muestran el daño de las juntas (interfaces) al momento de la falla y posterior a la falla en los muros con bloques rectangulares y bloques con ángulo, respectivamente, sometidos a la carga sísmica sinusoidal en la mesa de vibración. Se puede observar que para el muro de bloques rectangulares solo existe una fractura vertical al momento del fallo de la muestra mientras que, para el muro con bloques con ángulo, existen dos fracturas verticales y una fractura horizontal. El número mayor de fracturas en el muro bioinspirado explica porque este muro falla después que el muro de bloques rectangulares. Con eso se demuestra la prueba de concepto de que el muro con bloques con ángulos tiene un

mejor desempeño sísmico que el muro con bloques convencionales bajo las condiciones de prueba simuladas.

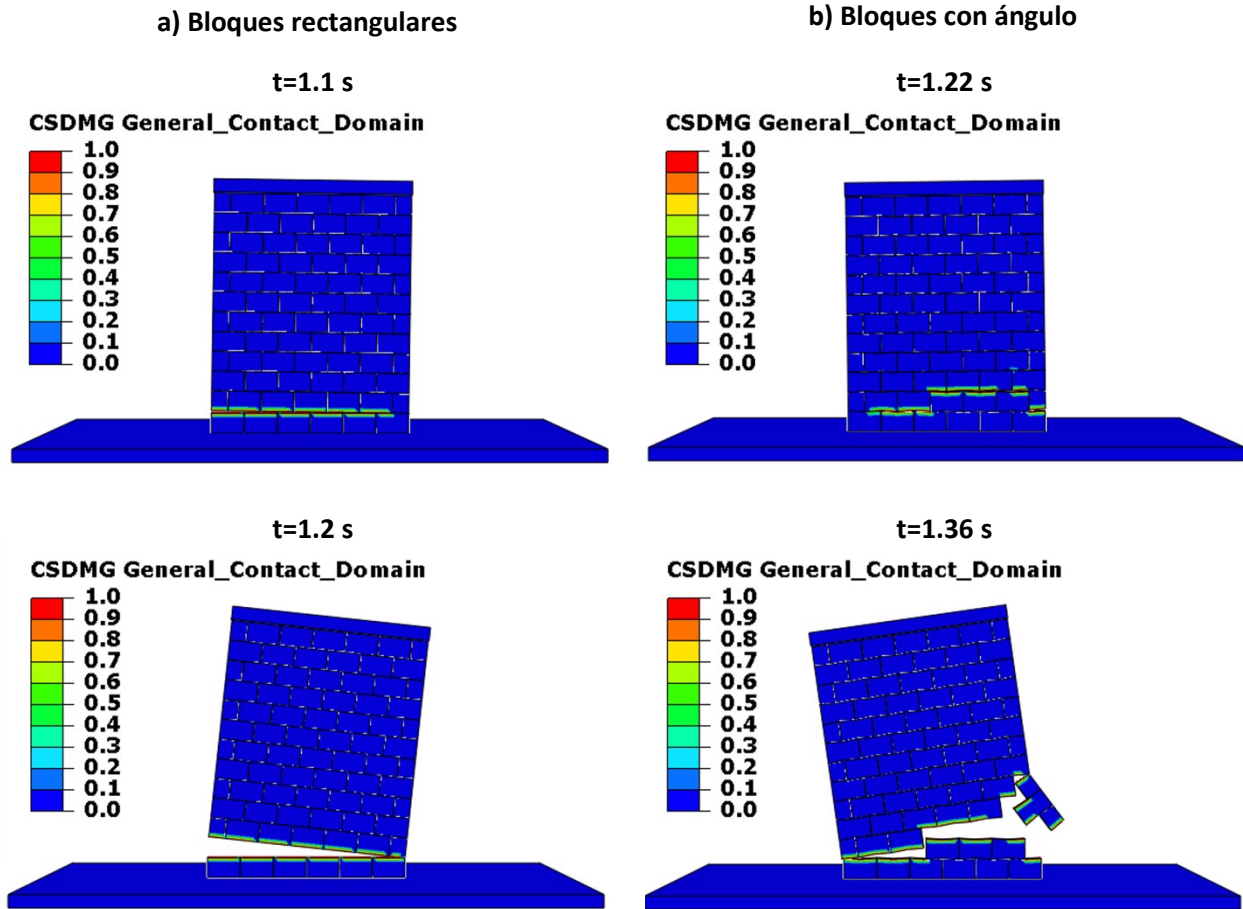


Figura 4.14 Daño en las juntas (interfaces) entre los bloques para los muros sometidos a una carga sísmica sinusoidal en el momento de la falla y posterior a la falla: a) muro de bloques rectangulares, b) muro de bloques con ángulo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la prueba de compresión diagonal experimental, los muros con bloques con ángulo resistieron más que los muros con bloques rectangulares. Además, los muros con bloques con ángulo presentaron un desplazamiento a la fractura mayor que los muros con bloques rectangulares. Es importante destacar que en general, después de la fractura, los muros con bloques con ángulos continuaron resistiendo un parte de la carga máxima lo cual demuestra un incremento en la tenacidad de los muros bioinspirados. Esto puede deberse al anclaje mecánico ya que, al presentar un ángulo de contacto entre bloques, éste reduce el desplazamiento horizontal entre los bloques, disipando la energía producida por las cargas.

En la prueba experimental de compresión uniaxial, las muestras cúbicas de concreto espumado, siguieron resistiendo un porcentaje de la resistencia máxima, posterior al fallo de la muestra, lo cual es característico de un material celular, al irse compactando los espacios vacíos dentro del material. En la prueba experimental de tensión todas las muestras tuvieron una falla frágil, debido a que la prueba provoca que los espacios vacíos se agranden.

En las pruebas de compresión diagonal por medio de la simulación FEM, para 1 y 2 mm de desplazamiento vertical, se observó una concentración de esfuerzos en la parte central de los muros con bloques rectangulares, mientras que en el muro con bloques con ángulo el esfuerzo se distribuyó mejor en toda la muestra. Con respecto a las juntas, las zonas de desunión entre bloques son mayores para el muro con bloques con ángulo. Esto demuestra que para este muro las deformaciones ocurren de forma globalizada ocasionando grietas en toda la muestra mientras que para el muro de bloques rectangulares las grietas están localizadas en la parte central. Cuando la muestra de bloques rectangulares falla se puede ver que solo existen dos grietas principales mientras que para la muestra con bloques con ángulo se pueden apreciar hasta cuatro grietas, lo cual resulta en una mayor absorción de energía y un fallo a un mayor desplazamiento.

En la prueba de tensión para el muro de 20 x 30 cm por medio de la simulación se observó que en el muro de bloques rectangulares se presentan concentraciones de esfuerzos localizadas mientras que para el muro de bloques con ángulo no se observa, sin embargo, al no haber un criterio de falla en el modelo FEM no se puede determinar qué tipo de muro se desempeñó mejor en esta prueba.

Para los muros de 40 x 30 cm sometidos a una carga sísmica sinusoidal el muro de bloques rectangulares presenta un esfuerzo localizado en la esquina inferior derecha, mientras que el muro de bloques con ángulo presenta concentraciones de esfuerzos varias zonas lo cual demuestra que la estructura inspirada en la concha nácar distribuye las deformaciones de forma globalizada. Además, el muro con bloques con ángulo falló en un tiempo posterior al muro de bloques rectangulares.

Recomendaciones

- Se recomienda hacer muestras de concreto espumado con diferentes densidades para analizar su comportamiento mecánico ante las diferentes pruebas realizadas.
- Se recomienda tener más cuidado al unir los bloques ya que las juntas pueden excederse el espesor determinado.
- Se recomienda hacer pruebas experimentales para obtener las propiedades cohesivas de los morteros utilizados para las juntas.
- En la simulación se recomienda variar el peso muerto sobre los muros sometidos a cargas sísmicas para que la simulación represente una situación real de sismo.
- Se recomienda implementar un criterio de fallo que permita simular la falla del concreto espumado tanto en tensión como en compresión.
- Se recomienda hacer un diseño de bloques con ángulos de 4 y 5 %, repitiendo todo el procedimiento realizado en esta tesis.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sismos fuertes, Servicio Sismológico Nacional, UNAM, Septiembre 2017. Consultado: 13 de mayo de 2019. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/sismos-fuertes/>
- [2] F. Song, A. Soh y Y. Bai, Structural and mechanical properties of the organic matrix layers of nacre, *Biomaterials*, 24 (20), 3623–3631, 2003.
- [3] M. Husson, Comportamiento al contacto del nácar artificial y natural, Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2008.
- [4] Ingeniería + Arquitectura = Biomimética, Planeamiento y desarrollo urbano, 0-slums i consultoría, Abril 2012. Consultado: 13 de mayo de 2019. <https://barrioscolgantes.wordpress.com/2012/04/12/ingenieria-arquitectura-biomimetica-2/>
- [5] N. Lozano, Comparación sismo resistente y económica entre una estructura convencional y una no convencional en un mismo edificio irregular, Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2013.
- [6] P. Zou y L.-C. Rob, Lessons Learned from Managing the Design of the Water Cube National Swimming Centre for the Beijing 2008 Olympic Games, *Architectural Engineering and Design Management*, 6 (3), 175-188, 2010.
- [7] J. S. Turner y R. Soar, Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building, Proceedings de 1st International Conference on Industrialized, Intelligent Construction, Loughborough University, Leicester, UK, 2008, 1-18.
- [8] L. Moreno, M. Galvís y R. García, Biomímesis en arquitectura e ingeniería estructural, *Revista de la división de ingenierías y arquitectura de la Universidad Santo Tomás de Bucaramanga*, 9 (1), 78-101, 2012.
- [9] M. Pearce, Eastgate, 2016. Consultado: 13 de mayo de 2019. <http://www.mickpearce.com/Eastgate.html>
- [10] S. Cavelier y F. Barthelat, Towards bioinspired housing: Stronger brick walls inspired

from seashells, Quebec, Canadá: McGill University, 2012.

- [11] D. Zhu y F. Barthelat, A Novel Biomimetic Material Duplicating the Structure and Mechanics of Natural Nacre, *Journal of materials research*, 26 (10), 181-187, 2011.
- [12] A. Al-Zuhairi y A. Rafid, Height-to-Length Ratio Effect on the Response of Unreinforced Masonry Wall Subjected to Vertical Load Using Detailed-Micro Modeling Approach, *International Journal of Science and Research*, 7 (1), 1456-1462, 2018.
- [13] R. Navas, Mampostería de ladrillo portante como método constructivo para viviendas unifamiliares, Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, 2017.
- [14] L. A. Alvarado Chorro, S. G. Pineda Alvarado y J. A. Ventura Ramírez, Diseño de elementos estructurales en edificios, Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador, San Salvador, 2004.
- [15] M. Jones y A. McCarthy, Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, *Magazine of Concrete Research*, 57 (1), 21-31, 2005.
- [16] L. P. Zamora Terrones, Diseño de un bloque de concreto celular y su aplicación como unidad de albañilería no estructural, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, 2015.
- [17] V. Swaminathan, Sisal Fiber Reinforced Concrete, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 5 (6), 65-69, 2018.
- [18] 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.
- [19] L. Quintanar, El Teorema Pi y la modelación, Instituto Superior de Matemática. Consultado: 15 de junio de 2019. <http://www.cns.gatech.edu/~luzvela/epigrafe/teoremapi.pdf>
- [20] W. Thompson, Concept of an earthquake-proof hut for Mexico (and other countries), *Renewable Energy*, 6 (8), 977-981, 1995.

- [21] Quanser Inc, *User Manual STII*, Markham, Ontario, 2014, 1-20.
- [22] H. Harris y G. Sabnis, *Structural modeling and experimental techniques*, 2nd ed.; RC Press, Boca Raton, 1999, 412-460.
- [23] Causas, características e impactos, Servicio Geológico Mexicano, Marzo 2017. Consultado: 15 de junio de 2019. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Causas-caracteristicas-e-impactos.html>
- [24] N. Carazo, ¿Qué es la aceleración sísmica?, Marzo 2015. Consultado: 20 de agosto de 2019. <http://ncarquitectura.com/que-es-la-aceleracion-sismica/>
- [25] L. Ferrari, El sismo del 19 de septiembre de 2017: Información básica, Serendipia, Septiembre 2017. Consultado: 15 de septiembre de 2019. <https://www.revistaserendipia.com/ciencia/especiales/el-sismo-del-19-de-septiembre-de-2017-informaci%C3%B3n-b%C3%A1sica/>
- [26] O. Ozcelik, J. Luco, J. Conte y T. Trombetti, Experimental characterization, modeling and identification of the NEES-UCSD shake table mechanical system, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37 (2), 243-246, 2008.
- [27] R. Severn, *The Contribution of Shaking Tables to Early Developments in Earthquake Engineering*, Garevski M., Ansal A. (eds) Earthquake Engineering in Europe; Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering, Heidelberg, 2010, 17, 79-144
- [28] J. Arias, Ensayos en mesa vibradora de un modelo a escala 1:2 de edificio de mampostería confinada de tres niveles, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2005.
- [29] R. Salinas, M. Rodríguez y R. Sánchez, Ensayos en mesa vibradora de edificios miniatura con muros estructurales de concreto convencionales y autocentrados, *Ingeniería sísmica*, (89), 101-134, 2013.
- [30] R. Barragán, Ensayo de una vivienda a escala de dos niveles de mampostería, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2005.
- [31] D. Sánchez de Guzmán, *Tecnología del Concreto y del Mortero*, Ed. 5; Bhandar Editores, Santa Fe de Bogotá, 2010, 1, 300-349.

- [32] N. Ramamurthy y K. Narayanan, Structure and properties of aerated concrete: a review, *Cement & Concrete Composites*, 22 (5), 321-329, 2000.
- [33] ACI Committee 213, ACI213R, Guide for structural lightweight aggregate concrete, American Concrete Institute, Detroit, USA, 2014, 1-38.
- [34] K. Ramamurthy, E. Kunhanandan Nambiar y G. Indu, A classification of studies on properties of foam concrete, *Cement and Concrete Composites*, 31 (6), 388-396, 2009.
- [35] J. Rudolph C. Valore, Cellular Concretes Part 2 Physical Properties, *Journal Proceedings*, 50 (6), 817-836, 1954.
- [36] M. McCarthy y R. Jones, Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, *Magazine of Concrete Research*, 57 (1), 21-31, 2005.
- [37] S. K. Helmut Weigler, Structural lightweight aggregate concrete with reduced density—lightweight aggregate foamed concrete, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 2 (2), 101-104, 1980.
- [38] Y. W. Md Azree Othuman Mydin, Structural performance of lightweight steel-foamed concrete—steel composite walling system under compression, *Thin-Walled Structures*, 49 (1), 66-76, 2011.
- [39] Y. Mugahed Amran, N. Farzadnia y A. Abang, Properties and applications of foamed concrete; a review, *Construction and Building Materials*, 101 (1), 990-1005, 2015.
- [40] M. A. O. Mydin y O. Mydin, An Experimental Investigation on Thermal Conductivity of Lightweight Foamcrete for Thermal Insulation, *Jurnal Teknologi*, 63 (1), 43-49, 2013.
- [41] F. Fouad, Cellular Concrete. En J. F. Lamond , & J. H. Pielert , *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM International, U.S.A, 2006, 548-647.
- [42] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, Fourth ed.; Thomson Canadá, 2007, 534-592
- [43] D. Darmayadi y I. Satyarno, Finite element modeling of masonry wall with mortar 1pc : 4 lime : 10 sand under lateral force, *MATEC Web of Conferences*, 258, 1-6, 2019.

- [44] A. B. Mohamad y Z. Chen, Experimental and Numerical Analysis of the Compressive and Shear Behavior for a New Type of Self-Insulating Concrete Masonry System, *Applied Sciences*, 6 (9), 1-14, 2016.
- [45] J. F. Castillo Lara, Estudios 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.
- [46] E. Barbero, *Finite element analysis of composite materials using abaqus*, CRC Press Taylor & Francis Group, 1st Ed.; Boca Ratón, Florida, 2013, 1, 2-56.
- [47] O. González, C. González y A. López, Introducción al método del elemento finito: solidworks y matlab, *Ideas en ciencias de la ingeniería*, 1 (1), 27-47, 2019.
- [48] Elementos cohesivos: descripción general, SIMULIA, Abaqus Analysis User's Guide, 2016. Consultado: 15 de enero de 2021. <http://abaqus.software.polimi.it/v2016/books/usb/default.htm?startat=pt06ch32s05abo29.html>
- [49] Crushable foam plasticity models, Section 18.3.5 of the ABAQUS Analysis User's Manual, SIMULIA, 2009. Consultado: 15 de enero de 2021. <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch18s03.html>
- [50] L. Gibson y M. Ashby, The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 382 (1782), 43–59, 1982.
- [51] L. Gibson, M. Ashby y G. Schajer, The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 382 (1782), 25–42, 1982.
- [52] V. Deshpande y N. Fleck, Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48 (6-7), 1253–1276, 2000.
- [53] Abaqus Analysis User's: Volume III: Materials, SIMULIA, Abaqus 6.10, 2010. Consultado: 15 de enero de 2021.

https://www.academia.edu/24831145/Abaqus_Analysis_Users_Manual

- [54] M. Mohammad, S. Amanul, A. Behnam y F. Barthelat, Toughness by segmentation: Fabrication, testing and micromechanics of architected ceramic panels for impact applications, *International Journal of Solids and Structures*, 158, 52-65, 2019.
- [55] ASTM International, ASTM E519 / E519M-20, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, West Conshohocken, United States, 2020, 1-5.
- [56] L. Flores, Norma Mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010 ensaye de muretes y pilas, Ponencia en Normas MX para estructuras de mampostería de la Coordinación Nacional de Protección Civil, Agosto 2015. Consultado: 15 de enero de 2021. <https://www.smie.org.mx/archivos/eventos/2015/agosto/ponencia-mexico-cambio-para-siempre-desde-1985-norma-mexicana-nmx-c-464-onncce-2010-ensaye-muretes-pilas-leonardo-flores.pdf>
- [57] About contact pairs in Abaqus/Standard, ABAQUS. Abaqus Analysis User's Guide, version 2017, 2017. Consultado: 15 de enero de 2021. <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEITNRefMap/simaitn-c-contactpair.htm>
- [58] E. A. 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.
- [59] T. Miao, L. Shen, Q. Xu, E. A. Flores Johnson, J. Zhang y G. Lu, Ballistic performance of bioinspired nacre-like aluminium composite plates, *Composites Science and Technology*, 177, 13-22, 2019.
- [60] Z. Yin, F. Hannard y F. Barthelat, Impact-resistant nacre-like transparent material, *Science*, 364 (6447), 1260-1263, 2019.