

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



Campus Celaya-Salvatierra

División de Ciencias de la Salud e Ingenierías

Simulación numérica del comportamiento de viviendas de adobe

Tesis

Que para obtener el Título de:
Ingeniero Civil

Presenta:
Miguel Ángel Vargas Carranza

Director de Tesis:
Dr. Arturo Galván Chávez

Co-Director de Tesis:
Dra. Jatziri Yunuén Moreno Martínez

Celaya, Guanajuato, Noviembre de 2017

Dedicatorias

A mis padres:

Miguel y Gema, Por su apoyo, su ejemplo, sus enseñanzas, su cariño, sus consejos, por formar las bases de quien hoy en día soy; por su esfuerzo y su búsqueda de lo mejor para mí cada día.

A mis hermanos:

Diego y Saúl, por los inolvidables momentos vividos, por las diversas emociones que siempre me han causado y con las que hemos crecido juntos.

A mis familiares:

Por conformar mi hogar, por compartir tiempo y aprendizaje y por su amable presencia en mi vida.

A mis amigos y compañeros:

Por las convivencias, las risas, las dificultades superadas y por todos los momentos que pasamos durante todos estos años de mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad de Guanajuato:

Por proveerme de mi segundo hogar, dándome el espacio para desempeñar todas las actividades que me llevaron hasta el término de mi carrera profesional.

A la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2016-2017 “Investigación de materiales regionales para construcciones de adobe ubicadas en zonas rurales del Estado de Guanajuato”, número 947/2016.

A mi director y co-director de tesis:

Dr. Arturo y Dra. Jatziri, por compartir su conocimiento y proveerme de guía y ayuda durante la elaboración de mi tesis, así como por exigirme día a día para seguir aprendiendo y creciendo profesionalmente.

A mis profesores:

Por su paciencia y su disposición para enseñar, y por promover el desarrollo de mis aptitudes.

Resumen

Ante la búsqueda de construir de forma sustentable y económica vivienda nueva, así como de rehabilitar vivienda existente de adobe, se realizó una simulación numérica del comportamiento estructural de viviendas de adobe típicas del estado de Guanajuato, México. Se utilizaron modelos de elementos finitos que incorporaron los criterios de Drucker Prager para contemplar la no linealidad del material, así como los parámetros de William Warnke para ver el agrietamiento o aplastamiento en la vivienda. Se analizó el comportamiento estructural de la vivienda bajo cargas gravitacionales, tanto por el peso que genera el techo de teja típico de estas viviendas, así como por el peso que generaría una losa en el techo de la vivienda; también se analizó la vivienda con malla de acero como refuerzo, y posteriormente se analizó el comportamiento de una vivienda de adobe de dos niveles. Se realizó finalmente el análisis modal de ambas viviendas para comparar las frecuencias y periodos generados en cada una. Con esto, se obtienen resultados que indican que una vivienda de adobe típica del estado de Guanajuato no sufre agrietamiento o aplastamiento bajo la acción de cargas estáticas.

Abstract

A numerical simulation of the structural behavior of typical adobe houses in the state of Guanajuato, Mexico, was carried out in the search for a sustainable and economic construction of new housing and rehabilitation of existing adobe housing. Finite element models were used that incorporated the criteria of Drucker Prager to contemplate the non-linearity of the material, as well as the parameters of William Warnke to see the cracking or crushing in the house. The structural behavior of the house under gravitational loads was analyzed, both by the weight generated by the roof tile typical of these houses, as well as by the weight that would generate a slab in the roof of the house; the housing with steel mesh was also analyzed as reinforcement, and later the behavior of a two levels adobe house was analyzed. Finally, the modal analysis of both

houses was made to compare the frequencies and periods generated in each one. With this, results are obtained that indicate that a typical adobe house of the state of Guanajuato does not undergo cracking or crushing under the action of gravitational charges.

Índice

Resumen	iv
Abstract	iv
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	x
1. Planteamiento del problema	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivo general	3
1.4. Objetivos particulares.....	3
1.5. Alcances del proyecto	4
2. Estado del arte	5
2.1. Antecedentes	5
2.1.1. Adobe como material constructivo.....	6
2.1.2. Impacto ambiental generado por la construcción	7
2.1.3. Situación social y económica en México	8
2.2. Investigación sobre adobe.....	10
3. Propiedades mecánicas de los materiales	18
3.1. Propiedades mecánicas del adobe.....	18
3.2. Propiedades mecánicas de la malla de acero	20

3.3. Propiedades mecánicas de la madera	21
4. Descripción del modelo	22
4.1. Vivienda de adobe de un nivel	24
4.1.1. Vivienda elaborada de adobe. MVA	26
4.1.2. Vivienda con dintel de madera. MVD.....	26
4.1.3. Vivienda con losa de concreto. MVL	27
4.1.4. Vivienda con malla de acero. MVAR	27
4.2. Vivienda de adobe de dos niveles. MVDN.....	28
4.3. Análisis modal.....	30
5. Resultados	33
5.1. Vivienda de adobe de un nivel	33
5.1.1. Vivienda elaborada de adobe. MVA	33
5.1.2. Vivienda con dintel de madera. MVD.....	35
5.1.3. Vivienda con losa de concreto. MVL	37
5.1.4. Vivienda con malla de acero. MVAR	39
5.2. Vivienda de adobe de dos niveles. MVDN.....	40
5.3. Análisis modal.....	43
Conclusiones y recomendaciones	47
Investigaciones futuras	49
Referencias	50

Índice de figuras

Figura 1. Curva esfuerzo-deformación de la malla de acero	20
Figura 2. Viviendas de adobe ubicadas en el estado de Guanajuato	24
Figura 3. Vivienda de adobe utilizada en los análisis	25
Figura 4. Modelo de sólidos de la vivienda.....	25
Figura 5. Modelo de elementos finitos de la vivienda	26
Figura 6. Trabes de madera en entrepiso de la vivienda.....	28
Figura 7. Escalera considerada de la vivienda.	29
Figura 8. Modelo de sólidos de la vivienda de dos niveles	29
Figura 9. Modelo de elementos finitos de la vivienda de dos niveles	30
Figura 10. Mapa de esfuerzos en dirección “Y” del MVA	33
Figura 11. Suma de desplazamientos totales del MVA	34
Figura 12. Mapa de esfuerzos en dirección “Y” del MVD	35
Figura 13. Mapa de esfuerzos en dirección “Y” del MVD sobre el dintel	36
Figura 14. Suma de desplazamientos totales del MVD	36
Figura 15. Mapa de esfuerzos en dirección “Y” del MVL.....	37
Figura 16. Suma de desplazamientos totales del MVL.....	38
Figura 17. Mapa de esfuerzos en dirección “Y” del MVAR.....	39
Figura 18. Suma de desplazamientos totales del MVAR.....	40
Figura 19. Mapa de esfuerzos en dirección “Y” del MVDN.....	41

Figura 20. Mapa de esfuerzos en dirección “Y” del MVDN sobre vigas de entepiso....	41
Figura 21. Suma de desplazamientos totales del MVDN	42
Figura 22. Primer modo de vibrar de la vivienda de un nivel.....	43
Figura 23. Primer modo de vibrar de la vivienda de dos niveles	44
Figura 24. Segundo modo de vibrar de la vivienda de dos niveles.....	44
Figura 25. Espectro de diseño por efectos de sitio.....	46

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del adobe obtenidas de la literatura.....	19
Tabla 2. Propiedades mecánicas del adobe asignadas a los modelos	19
Tabla 3. Propiedades mecánicas de la malla de acero	20
Tabla 4. Propiedades mecánicas de la madera.....	21
Tabla 5. Estratigrafía del suelo	32
Tabla 6. Resultados del MVA	34
Tabla 7. Resultados del MVD y comparación con MVA	37
Tabla 8. Resultados del MVL y comparación con MVD.....	38
Tabla 9. Resultados del MVAR y comparación con MVL	39
Tabla 10. Resultados del MVDN y comparación con MVAR	42
Tabla 11. Resumen de resultados de los modelos.....	43
Tabla 12. Frecuencias y periodos de vibrar de las viviendas	45

Capítulo 1. Planteamiento del problema

1.1. Introducción

En los últimos años el tema ambiental y sustentable ha tomado mucha fuerza en todos los campos, y en la ingeniería civil no ha sido la excepción. Se sabe que la producción de materiales industrializados genera un alto impacto ambiental, y esto ha generado la búsqueda de materiales alternativos que no generen consecuencias negativas al ambiente. Al tema ambiental se le suma el tema de la economía de las personas, que son cada vez más aquellos que entran en crisis económicas y tienen problemas para solventar sus gastos diarios.

Para comprender el comportamiento estructural de cualquier edificación, es de suma importancia conocer las propiedades mecánicas de los materiales con la que está construida, conociendo estos datos, mediante modelos numéricos se puede predecir su comportamiento dependiendo de las solicitaciones a las que esté sometida.

En el presente trabajo se realizó un análisis de una vivienda típica de adobe ubicada en el estado de Guanajuato, sometida a cargas gravitacionales, con el fin de proveer de un hogar seguro a las personas de bajos recursos, y buscando además de volver a utilizar el adobe por ser un material sustentable.

El contenido de este trabajo se estructura de la siguiente manera:

Primeramente, se presentan el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos generales y particulares, y los alcances del trabajo en el capítulo 1.

Una vez introducido el tema de investigación se presenta el estado del arte en el capítulo 2, que incluye algunos antecedentes y características del adobe, se mencionan aquellos trabajos de investigación relacionados con este, y se explica parte de la situación económica, social y ambiental que enfrenta nuestro país.

En el capítulo 3 se presentan las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en los modelos numéricos, del adobe, de la madera y de la malla de acero.

Enseguida, en el capítulo 4 se presenta la descripción de los modelos, en donde se mencionan todas las consideraciones tomadas en cuenta para el desarrollo de cada uno de ellos.

En el último capítulo se presentan los mapas de esfuerzos y los desplazamientos generados en la vivienda de adobe, y todos los resultados y comparaciones de los modelos elaborados.

Para terminar, se presentan las conclusiones y recomendaciones, y las posibles investigaciones futuras que se derivan del presente trabajo.

1.2. Justificación

Una buena apreciación del comportamiento mecánico de cualquier material a estudiar nos permite hacer un uso adecuado de él, dentro de las condiciones en las que trabaja de manera segura, esto se logra detectando los posibles daños en la estructura; con ello se pondrá mayor atención en esas zonas débiles proporcionándoles un refuerzo adecuado.

El material que se estudia es el adobe, para que pueda ser una alternativa razonable y confiable a materiales como el concreto y el acero, tanto para construcción de vivienda nueva, como para refuerzo o restauración de vivienda existente.

En el caso de construcción de vivienda nueva, el uso del material de adobe suele ser más económico y tiene también la ventaja de ser un material sustentable, por lo que no se comprometen los recursos para generaciones futuras.

En el caso de vivienda existente, hay un gran número de casas construidas con adobe alrededor del mundo, y muchas de ellas, por la degradación natural del material con el paso de los años, o por sufrir el efecto de algún desastre, necesitan

de algún tipo de restauración porque se encuentran en malas condiciones y representan un peligro para la vida de quienes las habitan.

1.3. Objetivo general

Analizar un modelo no lineal de una vivienda típica de adobe ubicada en el estado de Guanajuato, para conocer su respuesta a la acción de cargas gravitacionales, tomando en cuenta sus propiedades mecánicas.

1.4. Objetivos particulares

- Identificar las características de una vivienda típica de adobe en el estado de Guanajuato.
- Crear un modelo confiable de la vivienda de adobe, mediante la incorporación razonable de modelos constitutivos y propiedades mecánicas de los materiales.
- Realizar los análisis de la vivienda elaborada únicamente de adobe; de una vivienda incluyendo el dintel de madera típico sobre el vano de la puerta; de una vivienda con una losa de concreto como sistema de techo; de una vivienda con malla de acero como refuerzo sobre los muros de la vivienda; y de una vivienda de adobe de dos niveles.
- Revisar los desplazamientos máximos generados en la vivienda.
- Comprobar si se genera agrietamiento o aplastamiento en el material por la acción de las solicitaciones a las que se somete cada vivienda.
- Realizar el análisis modal de las viviendas de adobe de un nivel y de dos niveles.
- Comparar las frecuencias y periodos de ambas viviendas.
- Observar el movimiento generado para el modo fundamental de vibrar de las viviendas.

- Obtener un espectro de diseño por efectos del sitio, con el que se pueda observar con cuál de los periodos de las viviendas se tendrían mayores pseudo-aceleraciones.

1.5. Alcances del proyecto

- Los modelos numéricos contemplan la no linealidad del material.
- Los modelos se realizan en tres dimensiones.
- Para la resolución de los análisis se utilizó el Método de Elemento Finito.
- En los análisis se consideraron los efectos por cargas gravitacionales y se realizó un análisis modal.
- Los valores de las propiedades mecánicas de los materiales se obtuvieron de la literatura.

Capítulo 2. Estado del arte

2.1. Antecedentes

El adobe es un tipo de mampostería que consiste en bloques elaborados de tierra, arena, fibras vegetales y agua. Al igual que la elaboración de la mayoría de los materiales no hechos en planta, pueden variar sus componentes en cuanto a agregados y proporciones.

El proceso constructivo del adobe consiste en realizar la mezcla de tierra arenosa y arcillosa con agua, en ocasiones se agregan fibras vegetales o de otro tipo, se cubre y deja reposar por una noche, para dar tiempo que el agua se incorpore a los demás ingredientes, al siguiente día se le da forma y se compacta relleno de moldes de madera rectangulares o de cualquier forma que nos sea útil, luego se colocan en el piso, se desprenden del molde, se secan al sol hasta que estén lo suficientemente secos para poder manipularlos, y finalmente, se apilan de canto para terminar de secarse y ser transportados.

El adobe, como cualquier material de construcción, tiene sus ventajas y desventajas para su uso. A continuación, se mencionan algunas de ellas. (Lewis, 2011 y Ecocosas, 2012):

Ventajas:

- Tiene baja conductividad térmica. Lo que le permite mantenerse a temperatura templada en temporadas con clima muy caluroso, o en situaciones de clima muy frío.
- No se incendia.
- Requiere poco mantenimiento.
- Es reciclable.
- Su producción se logra con el 3% de la energía utilizada en la producción de los bloques modernos.
- Actúa como filtro mejorando la calidad de aire en el interior de la construcción

Desventajas:

- Permite construir estructuras con geometría y dimensiones limitadas.
- Tiene baja resistencia a tensión y a compresión.
- No existe producción en serie del material, por lo que podrían elevarse costos de traslados si no se elabora en el lugar donde se construirá la estructura.

2.1.1. Adobe como material constructivo

La construcción con adobe es casi tan antigua como la historia de la civilización, sus propiedades son tan favorables, que pueblos distantes entre sí y con culturas completamente distintas construyeron con adobe desde sus humildes chozas hasta palacios y ciudades enteras. El adobe está hecho del material más abundante que existe y aquel cuyo nombre hemos escogido para nuestro planeta, La Tierra (Lewis, 2011).

La construcción tradicional de viviendas de tierra se realiza informalmente, sin asesoría técnica. Por ello, la calidad de estas construcciones es generalmente baja. En zonas sísmicas donde se construye con tierra, cada vez que ocurre un terremoto colapsan muchas construcciones, causando considerables pérdidas (Blondet *et al.*, 2011).

La ubicación en la que se construye una vivienda de adobe es muy importante, ya que se necesita proteger de incidencias del tiempo, de flora y fauna, de soleamiento, de humedad e incluso del propio terreno. No es recomendable que este cerca de una barranca (puede ser afectada por erosión), de una ladera (puede ser afectada por caída de troncos o material), o de tierras con exceso de humedad (puede hundirse el terreno) (García, 2011).

Para que una construcción de adobe sea redituable, se debe hacer con tierra local (García, 2011). De lo contrario generaría costos de traslado del material desde su lugar de producción, y elevaría los costos de la vivienda.

Al igual que para las estructuras de mampostería, en el adobe es de suma importancia el espesor del muro de la vivienda, se sabe que un espesor mayor permitirá una mayor seguridad estructural, logrando construir viviendas de mayores dimensiones, mismas que generarían una mayor comodidad y una mejor calidad de vida para aquellas personas que las habitan.

La presencia de viviendas de adobe en ciudades de todo el mundo genera un área de oportunidad, ya que es importante asegurar la integridad estructural de estas viviendas, que en caso de no brindarla, generaría pérdidas humanas y daños económicos.

Parte fundamental para lograr construir viviendas seguras es el tener conocimiento del comportamiento estructural de ellas, asimismo debería tenerse una estandarización o una normativa que regule las dimensiones y propiedades del material con que se elaborarán las viviendas. Algunos países ya desarrollaron normas de construcción con tierra, entre ellos están Francia, Italia, España, Alemania, Suiza, Brasil, Perú, Estados Unidos de América, Turquía, entre otros, (Moreno, 2011) sin embargo en México no se han desarrollado este tipo de compendios, lo único que se ha trabajado son algunos artículos de investigadores en instituciones del país que comienzan a obtener las propiedades mecánicas y entender el comportamiento del adobe.

2.1.2. Impacto ambiental generado por la construcción

La construcción de pueblos y ciudades consume el 50% de todos los recursos mundiales y genera gran cantidad de residuos (Arguello y Burgos, 2008).

El problema que trae consigo el uso de materiales como el concreto y el acero en la construcción abarca los siguientes puntos clave: alto impacto generado en el proceso de fabricación del material, resaltando el desperdicio y contaminación de agua; dificultad para reciclar el material; generación de emisiones contaminantes en la atmósfera.

En contraste, para el caso del adobe, en su proceso de construcción se puede afirmar que no se generan impactos ambientales considerables, ya que por lo general el material no incluye sustancias tóxicas, para su producción y transportación se incorpora mucho menos energía y, a su vez, sus posibilidades de reciclaje son únicas ya que la tierra puede ser reincorporada a la naturaleza en cualquier momento (Arista *et al.*, 2016).

Por ello, se puede considerar al adobe como un material notablemente menos dañino para el medio ambiente, y además, mediante la búsqueda de un refuerzo adecuado, la vivienda de adobe se convierte en una opción viable para que la construcción con adobe resurja como un material importante, desde luego que con sus respectivas limitantes, principalmente en el tema de su resistencia y en restricciones en cuanto a geometrías modernas que no cuentan con una simetría.

2.1.3. Situación social y económica en México

Una de las causas por las que gran cantidad de gente no construye o adquiere viviendas con materiales industrializados, probados en cuanto a su buena resistencia como el concreto y el acero, es la falta de recursos. Mucha gente vive al día y apenas es capaz de solventar sus gastos más indispensables, por lo que es muy complicado que gasten una gran cantidad de dinero en vivienda.

Según el CONEVAL, Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, institución que estima la pobreza y sus componentes a nivel nacional, en 2014 la población en situación de pobreza en México fue de 55.3 millones de personas. Al mismo tiempo, la población en pobreza extrema fue de 11.4 millones de personas, lo que equivale a un 44%, y un 9% respectivamente de la población total del país (CONEVAL, 2015).

El Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los trabajadores, INFONAVIT, es una institución mexicana que tiene como objetivo otorgar créditos a los trabajadores para que adquieran su propia vivienda. Sin embargo, para pedir un crédito Infonavit se debe tener una relación laboral, en la que el patrón debe realizar el pago de las

aportaciones del IMSS/Infonavit. Para quienes tienen un salario entre \$2,131 (1 salario mínimo) y hasta \$6,000, en promedio pueden solicitar un crédito Infonavit de entre \$200,000 y hasta \$300,000. (Casas Infonavit, 2017), y en la actualidad, aproximadamente seis de cada diez empleos en México son de carácter informal, es decir, que se labora en micronegocios no registrados y además son trabajadores que laboran sin la protección de la seguridad social. Esta cifra representa un reto significativo para la política de vivienda en tanto que dichos trabajadores no cuentan con acceso a financiamiento para vivienda como prestación laboral, lo cual limita sus posibilidades de obtener créditos hipotecarios y, por tanto, de acceder a una vivienda del mercado formal (SEDATU, 2013).

Esto abre las puertas a la opción de construir viviendas económicas para que más personas tengan acceso a un hogar digno y seguro; la opción de las viviendas de adobe tomará fuerza en ese aspecto siendo una opción viable para todos aquellos que así lo requieran.

Además de la creación de viviendas nuevas, existe una necesidad de dar mantenimiento y restauración a viviendas que cumplieron su vida útil, y que ya no aseguran una estabilidad estructural o una funcionalidad adecuada.

La necesidad de ampliación de vivienda creció de dos millones en el año 2000, a cuatro millones en 2010, hecho que responde en buena medida al crecimiento poblacional en zonas urbanas y a la insuficiencia de espacio de las viviendas que se construyeron en dicho periodo. Por su parte, la necesidad de mejoramientos se ha mantenido constante en términos absolutos, en alrededor de los 3.5 millones de viviendas (SEDATU, 2013).

Por tanto, el estudio del adobe, el entendimiento de su comportamiento, junto con la fabricación de piezas de buena calidad y un adecuado proceso constructivo generará grandes beneficios en la sociedad del país, mejorando la calidad de vida de muchas personas, principalmente de aquellas con bajos recursos.

2.2. Investigación sobre adobe

La construcción con tierra es de los temas menos estudiados, y por tanto, de los menos entendidos. La construcción con tierra es muy antigua, y el tener hoy en día construcciones de pie elaboradas de este material es evidencia clara de su durabilidad (Morel *et al.*, 2013).

Se realizó una compilación de investigaciones referentes al estudio del adobe, sus propiedades mecánicas, la adición de diferentes refuerzos, su comportamiento ante cargas dinámicas y simulaciones numéricas de mampostería en general.

Aquellos investigadores que se enfocaron a la obtención de las propiedades mecánicas del adobe son: (Quagliarini y Lenci, 2010; Piattoni *et al.*, 2011; Vega *et al.*, 2011; Silveira *et al.*, 2012; Eslami *et al.*, 2012; Silveira *et al.*, 2013; Arroyo *et al.*, 2013; Illampas *et al.*, 2014).

Se investigaron las propiedades mecánicas de ladrillos de adobe de los antiguos romanos, variando los porcentajes de tierra, arena y paja. Incluyeron fibras naturales que previenen el agrietamiento, y mencionan que la inclusión de un estabilizador natural ayuda en la viabilidad de la mezcla. Se obtuvo una buena resistencia a la compresión en todos los especímenes (Quagliarini y Lenci, 2010).

Se investigaron las propiedades mecánicas de ladrillos de tierra, variando su composición, en porcentajes de tierra, arena y paja; y variando el tamaño de los especímenes. Se llegó a la conclusión de que a mayor contenido de arena se obtenía un mayor módulo de elasticidad, pero disminuía la resistencia a la compresión de las piezas (Piattoni *et al.*, 2011).

Se ha realizado la caracterización mecánica de adobes tradicionales en el norte de España. Se obtuvieron los esfuerzos a la compresión y los esfuerzos a la tensión del material. Como conclusiones se llegó a que estos adobes pueden ser usados como un material de construcción adecuado (Vega *et al.*, 2011).

Se han estudiado las propiedades mecánicas de ladrillos de adobe de casas en Aveiro, Portugal. Llegaron a que los resultados varían considerablemente debido a la

libertad de producción de los adobes. Con los resultados obtenidos se podrá llevar a cabo la rehabilitación de construcciones de adobe en malas condiciones, así como para calibrar modelos numéricos (Silveira *et al.*, 2012).

Se ha llevado a cabo la investigación del comportamiento de edificios históricos de albañilería en la ciudad de Yazd, Irán. Se realizaron pruebas experimentales para la caracterización de los materiales, encontrando una baja resistencia a la tensión de los elementos. Después, se usaron las propiedades obtenidas en las pruebas en un análisis no lineal de elementos finitos para ver cómo fallan los edificios históricos, incluyendo un análisis sísmico. Como conclusiones se llegó a que el pequeño esfuerzo a la tensión de los materiales resulta en una baja resistencia lateral de la estructura (Eslami *et al.*, 2012).

Se ha realizado una caracterización del adobe utilizado en Aveiro, Portugal, realizando diferentes procedimientos de pruebas a compresión a los especímenes. Se obtuvieron resultados muy similares para especímenes cilíndricos y para especímenes cúbicos. Se determinó también el comportamiento esfuerzo-deformación de los especímenes, esto para apoyar el modelo numérico del comportamiento de este material (Silveira *et al.*, 2013).

Se realizó la caracterización mecánica de adobe en viviendas en el sur de México. Concluyendo que la resistencia mecánica de la mampostería de adobe es baja; su resistencia a la compresión disminuye en 50% en presencia de humedad; las viviendas de adobe presentan un nivel de vulnerabilidad elevado, principalmente aquellas que se encuentran en zonas sísmicas; es urgente rehabilitar este tipo de viviendas mediante mallas o aplanados de mortero (Arroyo *et al.*, 2013).

Se ha hecho investigación de la respuesta de ladrillos de adobe sometidos a cargas a compresión. Con los resultados experimentales se formuló un modelo constitutivo que describe la respuesta esfuerzo-deformación del adobe. Se llegó a la conclusión de que la respuesta a la compresión del adobe depende de su geometría y de sus dimensiones (Illampas *et al.*, 2014).

Los investigadores que han realizado pruebas del adobe con diferentes refuerzos son: (Vega *et al.*, 2011; Younoussa *et al.*, 2013; Taallah *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2015; Laborel-Préneron *et.al.*, 2016; Bartolomé y Quiun, 2015).

Se han realizado y probado especímenes de adobe con dos diferentes porcentajes de contenido de paja. Se concluye que el adobe reforzado es un material de construcción adecuado (Vega *et al.*, 2011).

Se investigaron las propiedades de fibra 'Hibiscus cannabinus' usadas en la fabricación de bloques de adobe. Se concluyó que con la adición de esta fibra se ayuda a homogeneizar la microestructura de los especímenes reduciendo el tamaño de los poros; se reduce la propagación de grietas y beneficia la resistencia a la flexión (Younoussa *et al.*, 2013).

Se han investigado las propiedades mecánicas de bloques de tierra con fibras de palma buscando utilizar materia prima local y reducir el costo de las casas construidas. Sin embargo, se concluyó que tienen un efecto adverso para los bloques de tierra, ya que disminuye su resistencia a tensión y a compresión (Taallah *et al.*, 2014).

Se investigó el adobe reforzado con partículas de bambú, buscando mejorar su resistencia y reduciendo la absorción de agua del material. Se concluyó que agregando un 6% de partículas de bambú se incrementa la resistencia a la compresión del adobe en un 90% (Ribeiro *et al.*, 2015).

Se ha estudiado la incorporación de diferentes agregados de fibras, y en diferentes proporciones, para mejorar las propiedades de bloques de tierra, se notó que se incrementa su resistencia a la tensión, así como el aislamiento al sonido; aunque disminuye su capacidad de absorción de agua (Laborel-Préneron *et.al.*, 2016).

Se reforzaron muros de viviendas de adobe mediante mallas de alambre electrosoldadas de modo que simulen vigas y columnas de confinamiento. Mencionan que viviendas de adobe reforzadas tuvieron un buen comportamiento

estructural frente a los terremotos de 2001 y 2007 ocurridos en Perú (Bartolomé y Quiun, 2015).

Los investigadores que han estudiado el comportamiento del adobe frente a sismos o cargas dinámicas son: (Delgado, 2006; Turanli y Saritas, 2010; Iriarte y Alberto, 2010; Catalán, 2013; Velarde, 2014; Sathiparan y Meguro, 2015; Romero y Zhindón, 2017).

Se estudió el comportamiento sísmico del adobe confinado de dos pisos. Los ensayos se realizaron en una mesa vibratoria. Se concluyó que las zonas de debilidad deben ser materia de estudio en proyectos futuros (Delgado, 2006).

Se ha investigado experimentalmente el uso de mallas de yeso en muros de adobe y aditivos, sometiéndolos a carga de compresión diagonal. Concluyeron que el uso combinado de aditivos y mallas mejoran significativamente su comportamiento estructural, mejorando su capacidad de carga última, mejorando su resistencia y su capacidad de absorción de energía, esto sin afectar el aspecto económico en su construcción (Turanli y Saritas, 2010).

Se ha estudiado la destrucción o agrietamiento de viviendas de tierra debido a vibraciones, se utilizó una mesa vibratoria para simular un sismo. Determinaron un valor de aceleración hasta el cual la estructura de tierra no presenta daños (Iriarte y Alberto, 2010).

Se estudió el comportamiento de una vivienda de adobe sometida a sismo, se habla de un elevado número de viviendas de adobe construidas en el sur de nuestro país, estando localizadas en una zona de alta sismicidad. De igual manera se realizó el estudio del comportamiento de la vivienda de adobe reforzada con una malla de acero y con mortero. Como conclusiones se llegó a que la vivienda de adobe reforzada sufre considerablemente menos daño que la vivienda de adobe sin refuerzo. Por ello, se debería estar trabajando en el refuerzo de las viviendas de adobe existentes, para aumentar la seguridad de muchas personas que tienen sus hogares elaborados con este material (Catalán, 2013).

Se estudió la estabilidad estructural de viviendas de adobe de dos pisos en Lima, evaluando su comportamiento ante sismos; se han dado cuenta que los espesores de los muros en viviendas construidas eran exagerados, tratando de prevenir el efecto de sismos; se notó que la debilidad en la unión de los muros es grande y el techo no funciona como diafragma; la falla por volteo en el segundo piso de la vivienda es una falla potencial; para mejorar el comportamiento de las viviendas deberá reducirse el desplazamiento lateral y mejorar la unión entre muros (Velarde, 2014).

Se compararon casas de adobe con techo en forma de arco y con refuerzo mediante una malla de polipropileno. Se evaluó el efecto sísmico de una casa a escala en una mesa vibratoria. Se concluyó que la malla añadida permite mantener la integridad de la casa incrementando su ductilidad, brindando mayores posibilidades de sobrevivir ante sismos o terremotos extremos (Sathiparan y Meguro, 2015).

Se ha realizado una evaluación sísmica de paredes de adobe, partiendo de que estas fallan debido a la mala unión entre paredes, y entre la pared y el piso; se confirmaron que los mecanismos de falla de las paredes están ligados a las conexiones entre paredes ortogonales, también se determinó que el espesor de la pared juega un papel muy importante ante los modos de falla (Romero y Zhindón, 2017).

Algunos investigadores más han realizado simulaciones numéricas del comportamiento de mampostería: (Roeder, 2004; Truong-Hong y Laefer, 2008; Iriarte y Alberto, 2010; Lizárraga, 2011; Campos-Rodríguez *et al.*, 2012; Eslami *et al.*, 2012; Velarde, 2014; Lizárraga y Pérez, 2016; Lizárraga, 2017).

Se desarrollaron herramientas numéricas para el análisis no lineal de estructuras de mampostería de ladrillo. Mismas que pueden aplicar a estructuras de mampostería o a estructuras en general construidas con materiales con características cuasi-frágiles (Roeder, 2004).

Se modelaron ladrillos y edificios de ladrillo, utilizaron un elemento sólido isoparamétrico de 8 nodos (denominado como elemento SOLID65 en el software

comercial ANSYS). Se evaluó el agrietamiento y el aplastamiento mediante los parámetros del modelo constitutivo de William-Warnke. Para considerar el comportamiento plástico se usó el criterio de Drucker-Prager (Truong-Hong y Laefer, 2008).

Se ha realizado el análisis estructural y sísmico de viviendas de adobe tanto para viviendas de un piso, como para viviendas de dos pisos. Se determinó que las casas de tierra solo deben tener un piso debido a que no están diseñadas para resistir sismos (Iriarte y Alberto, 2010).

Se modelaron muros de mampostería confinada ante carga lateral y carga axial. Se utilizó el criterio de fluencia Drucker-Prager para representar las propiedades inelásticas de la mampostería. Se explica en qué consiste agregar el modelo Drucker-Prager en el programa ANSYS (Lizárraga, 2011).

Se ha definido un modelo numérico para determinar la ubicación de agrietamiento en muros de mampostería provocados por hundimientos diferenciales. Se utilizó el elemento SOLID65 para modelar en 3D (Campos-Rodríguez *et al.*, 2012).

Se implementaron las propiedades obtenidas en pruebas experimentales en un análisis no lineal de elementos finitos, aplicando carga lateral para ver cómo fallan los edificios históricos sin refuerzo de mampostería en Yazd, Irán, se incluyó un análisis sísmico. Se confirmó la baja resistencia a la tensión de la mampostería, y se comenta que esto resulta a una baja resistencia lateral de la estructura (Eslami *et al.*, 2012).

Se realizaron modelos matemáticos de viviendas de adobe de dos pisos para determinar la concentración de esfuerzos, así como la probabilidad de colapso de las viviendas. Se evaluaron tres situaciones que varían en la conexión de los muros (Velarde, 2014).

Se ha realizado una modelación no lineal de muros de mampostería simple y confinada. Se consideraron propiedades elásticas de la mampostería, y se asignó un comportamiento no lineal a los elementos de contacto (Lizárraga y Pérez, 2016).

Se realizó un modelo numérico de muros de mampostería confinada sobre elementos flexibles, para lo cual se apoyó en el programa Diana. Se utilizó el modelo de agrietamiento de Rankine buscando representar adecuadamente la falla por tensión diagonal de la mampostería (Lizárraga, 2017).

En síntesis, los autores coinciden en que el adobe por naturaleza tiene baja resistencia a compresión, y aún más a tensión, sin embargo, con una buena proporción de los materiales que lo componen, un espesor adecuado de los muros, o un refuerzo añadido al adobe, se puede utilizar como material de construcción, teniendo presente que son vulnerables principalmente a cargas dinámicas.

Además de la investigación que se realiza en Universidades, en el caso de instituciones gubernamentales se ha decidido enfocar parte de su estudio a edificaciones de adobe.

En México, el INAH, Instituto Nacional de Antropología e Historia, se ocupa y preocupa de la conservación y recuperación de construcciones de tierra que tienen muchos años de vida y forman parte de patrimonio cultural del país. En 2016, el INAH impartió cursos, que incluyeron conferencias magistrales y talleres prácticos, y brindó capacitación sobre la aplicación de técnicas tradicionales de construcción con tierra.

Se tienen registros en los que el INAH protege aquellas construcciones que se han declarado “Monumento histórico”, muchas de ellas datan de muchos años de antigüedad y están elaboradas de mampostería de adobe. Un caso de esto ocurrió en 2016, cuando se comenzó a derrumbar una antigua casona del siglo XIX con antecedentes del siglo XVIII, catalogada como monumento histórico, que se ubicaba en la esquina de la calle de Purísima con la Plaza Juárez, sitio donde murió asesinado el general Francisco Villa, en el Centro Histórico de Parral, Chihuahua.

Esta institución, mediante recursos provenientes del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN), ha atendido también edificios de carácter histórico afectados por lluvia o

algún otro desastre natural. Aquellos edificios elaborados de adobe son vulnerables a este tipo de fenómenos naturales y por tanto son atendidos con regularidad.

Otro ejemplo de sus acciones es que después del sismo ocurrido en México el 19 de septiembre de 2017, el INAH, junto con el gobernador del estado de Morelos, acordaron la instalación de una planta de producción de bloques de adobe para llevar a cabo la reconstrucción de fachadas y viviendas en centros históricos.

Capítulo 3. Propiedades mecánicas de los materiales

Las propiedades mecánicas utilizadas en un análisis numérico tienen una gran relevancia e influencia en los resultados que arroja, es por ello que, es importante su correcta asignación en los modelos desarrollados.

3.1. Propiedades mecánicas del adobe

Las propiedades mecánicas del adobe que se usaron en los modelos analizados en el presente trabajo se obtuvieron de la literatura. Se realizó una comparación, que se muestra en la Tabla 1, de los valores encontrados en la literatura, estos varían considerablemente, por ejemplo, se encontró una variación en el módulo de elasticidad de hasta 10 veces más de un autor a otro, esto puede ocurrir por las diferencias en la composición del adobe, o por el proceso de elaboración de las piezas.

Los valores utilizados para los modelos son de las siguientes magnitudes: el valor del módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tensión se utilizaron del orden de 210 MPa, 0.58 MPa y 0.15 MPa respectivamente (Arroyo *et al.*, 2013); el módulo de Poisson ν se utilizó de un valor de 0.30 (Catalán, 2013); el valor del peso volumétrico y del adobe fue de una magnitud de $1.5 \text{ E-}05 \text{ N/mm}^3$ (Moreno J., 2011).

Es importante señalar que el valor de ν del adobe fue una propiedad que no fue común encontrar en la literatura, sin embargo, se realizó un análisis paramétrico para observar qué propiedades mecánicas afectaban en mayor medida los resultados de los análisis, y se notó que este valor no cambia significativamente los resultados obtenidos.

Tabla 1. Propiedades del adobe obtenidas de la literatura

Autores	País	f^*m (MPa)	E (MPa)	f^*t (MPa)
Saroza <i>et al.</i> , 2008	Cuba	1.00	-	-
Iriarte y Alberto, 2010	Perú	0.80	45.90	0.50 – 2
Moreno, 2011	México (D.F.)	0.25 - 1.60	25.77	-
Silveira <i>et al.</i> 2012	Portugal	1.32	225	0.17
Eslami <i>et al.</i> , 2012	Australia - Irán	1.12	214	0.015
Feng <i>et al.</i> , 2013	China	0.88 - 0.95	32 - 34	-
Arroyo <i>et al.</i> , 2013	México (Guerrero)	0.58	210	0.15
Rodríguez-Díaz <i>et al.</i> , 2014	Cuba	1.54	-	-

Dónde: f^*m = resistencia a la compresión, E = módulo de elasticidad, f^*t = resistencia a la tensión

Las propiedades inelásticas del adobe se calcularon a partir de las propiedades elásticas del material con las ecuaciones E-1 y E-2 (Lizárraga, 2011):

El resumen de propiedades mecánicas del adobe asignadas a los modelos se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del adobe asignadas a los modelos

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad E	210	MPa
Coefficiente de Poisson ν	0.30	-
Resistencia a la compresión f^*m	0.58	MPa
Resistencia a la tensión f^*t	0.15	MPa
Cohesión c	0.15	-
Ángulo de fricción ϕ	36.09	°
Ángulo de dilatación ψ	36.09	°
Peso volumétrico γ	1.5 E-05	N/mm ³

La ecuación E-1 se utilizó para calcular la cohesión, mientras que la ecuación E-2 se utilizó para el cálculo del ángulo de fricción del material.

$$c = \frac{\sqrt{f^*m * f^*t}}{2} \quad [E-1]$$

$$\phi = a \sin\left(\frac{f_c + f_t}{f_c + f_t}\right) \quad [E-2]$$

3.2. Propiedades mecánicas de la malla de acero

Como parte del análisis de la vivienda de adobe, se analizó un modelo que incluía un refuerzo que consiste en una malla de acero sobre los muros de la vivienda. Las propiedades utilizadas para este acero se obtuvieron también de la literatura (Aceros para la construcción, 2017) los cuales cumplen con la norma ASTM A-497, que abarca el tema de las mallas electrosoldadas como refuerzo. El resumen de las propiedades del acero se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de la malla de acero

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad E	2.1×10^5	MPa
Esfuerzo de fluencia f_y	490	MPa
Esfuerzo último f_u	490	MPa
Deformación de fluencia ϵ	0.0023	-
Deformación última ϵ_u	0.005	-

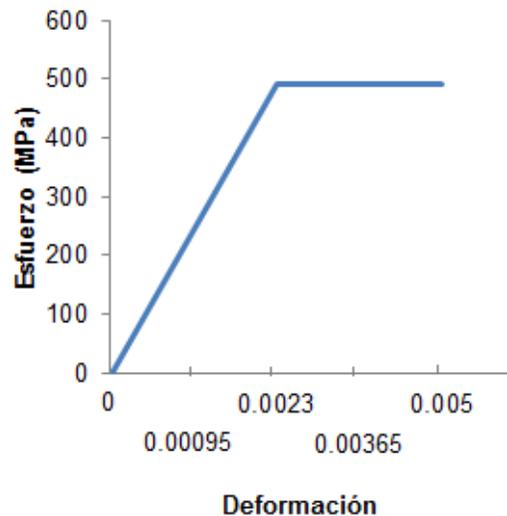


Figura 1. Curva esfuerzo-deformación de la malla de acero

En la Figura 1 se muestra la curva esfuerzo-deformación del acero de acuerdo con las propiedades definidas, habiendo considerado un comportamiento elastoplástico perfecto del acero.

3.3. Propiedades mecánicas de la madera

Se utilizó madera para incluir el dintel en la vivienda, elemento típico de las casas de adobe que se coloca en la parte superior de la puerta de la vivienda.

Un tipo de madera que se utilizaba en el estado de Guanajuato para uso estructural en zonas rurales, por sus buenas características de resistencia, es aquella extraída del árbol del mezquite. Se consideró este tipo de madera para las propiedades del dintel añadido. Las propiedades mecánicas de la madera que se utilizaron fueron elásticas, el resumen de los valores se muestra en la Tabla 4 (Sotomayor *et al.*, 2003).

Tabla 4. Propiedades mecánicas de la madera

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad $E=$	13660.6127	MPa
Peso volumétrico $\gamma=$	0.000007	N/mm ³
Coefficiente de Poisson $\nu=$	0.4	-

Capítulo 4. Descripción del modelo

Un modelo numérico es la representación de un sistema físico, expresado en forma matemática, que nos permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento, estas expresiones matemáticas se resuelven mediante equipo de cómputo. Para el desarrollo de cualquier modelo se deben contemplar una serie de hipótesis con el fin de predecir el comportamiento real de los elementos, aunque siempre estará latente la existencia de factores que nos impidan representar de manera absoluta la realidad.

Los modelos numéricos se resolvieron con el método numérico Newton-Raphson modificado, el cual depende de un número de incrementos de carga para llegar a una solución lo bastante aproximada. Es indispensable definir un incremento de carga adecuado ya que de lo contrario la resistencia resultada en el modelo será sobreestimada.

Las ecuaciones constitutivas son formulaciones matemáticas que describen el comportamiento de un material ante sollicitaciones, caracterizan las propiedades físicas del medio continuo objeto de estudio, en otras palabras, con ellos se define cómo se deforma cada material ante la aplicación de esfuerzos.

El primer modelo constitutivo que se incorporó al modelo numérico fue aquel desarrollado por William Warnke, el cual fue creado para el concreto, sin embargo se puede aplicar para el caso de materiales cuasi-frágiles (Truong-Hong y Laefer, 2008 y Eslami *et al.*, 2012), y es apto para la mampostería de adobe, la característica principal de este modelo es que permite que el elemento con el que trabaja, SOLID65, falle por agrietamiento a tensión y por aplastamiento a compresión. Este elemento se distingue por ser un hexaedro de 8 nodos, ser isotrópico, y permitir la no linealidad de su comportamiento.

Para la incorporación de esta hipótesis se introducen en el programa de análisis comandos que involucran valores de resistencia a la compresión f^*m , resistencia a la tensión f^*t , coeficiente de transferencia de cortante para una grieta abierta βt , y

coeficiente de transferencia de cortante para una grieta cerrada βc . El aplastamiento se define como un completo deterioro de la integridad estructural del material. La presencia de agrietamientos se representa con una modificación de la relación esfuerzo-deformación introduciendo un plano de debilidad en la dirección normal de la grieta (ANSYS, 2017).

Asimismo, para contemplar la no linealidad del comportamiento del adobe, así como para considerar su respuesta a cortante, se utilizó el modelo constitutivo de Drucker-Prager, el cual describe la etapa plástica del material bajo siguientes hipótesis de la teoría plástica:

El criterio de fluencia, mediante la función de fluencia se representa el límite del estado elástico. Cuando es menor que cero, el material se encuentra en su etapa elástica (Lizárraga, 2011).

La regla de flujo establece las condiciones en las que ocurre la deformación plástica (Lizárraga, 2011). Describe la evolución de las deformaciones plásticas. Cuando no se genera un incremento del material mientras está fluyendo, la regla de fluencia es no asociativa. Para el modelo realizado se consideró la regla de flujo asociativa, por tanto, la función de flujo es tomada como la función de fluencia, y el ángulo de fricción interna es igual al ángulo de dilatación.

La superficie de fluencia se describe en términos de los esfuerzos principales, se representa como un cono cilíndrico en el espacio de tensión principal, y permite precisar el límite elástico del material, así como dónde se presenta el comportamiento inelástico de este.

En el programa ANSYS el modelo Drucker-Prager consiste en introducir los parámetros de cohesión c , ángulo de fricción interna ϕ , y ángulo de dilatación ψ .

Para el modelo realizado, la cohesión y el ángulo de fricción interna se obtuvieron con las ecuaciones E-1 y E-2 mostradas en el capítulo 3.

4.1. Vivienda de adobe de un nivel

Los primeros modelos se realizaron de una vivienda de adobe de un nivel típica del estado de Guanajuato.

Para la realización de los modelos se realizó una visita de campo a zonas aledañas a Celaya en busca de viviendas construidas de adobe. Se encontraron viviendas con características similares: dimensiones pequeñas, geometría limitada, sistema de techo que consiste en tejas de barro, refuerzo de madera sobre el vano de las puertas, se encuentran en general en malas condiciones. En la Figura 2 se muestran algunas viviendas de adobe en el estado de Guanajuato que se identificaron, y posteriormente, en la Figura 3 aparece aquella de la cual se obtuvieron las dimensiones utilizadas para el desarrollo de los modelos en el presente trabajo; esta vivienda se encuentra ubicada en la comunidad de los Galvanes (salida a San Miguel de Allende) en el municipio de Celaya, Gto.

Las características geométricas de la vivienda son: altura de 2.3 m de la parte de atrás; el techo está construido a “un agua” con material de teja, por lo que la altura del frente es menor con un valor de 1.8 m, siendo la pendiente del techo de 16%; de fondo la vivienda tiene 3.05 m; el frente tiene una longitud de 5.15 m. Las



Figura 2. Viviendas de adobe ubicadas en el estado de Guanajuato

dimensiones de la puerta son de $1.6 \times 0.9 \text{ m}^2$, y de la ventana de $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$. Las dimensiones de los tabiques de adobe son aproximadamente de $7 \times 25 \times 45 \text{ cm}^3$, siendo el espesor de los muros de 25 cm.



Figura 3. Vivienda de adobe utilizada en los análisis

La vivienda cuenta con una pequeña cimentación a base de piedra, por ello, se hizo la suposición de que la parte inferior de la vivienda es suficientemente rígida, por lo que se restringieron los desplazamientos y rotaciones en todas las direcciones.

Se realizó un modelo que consta de 44 sólidos, que se muestra en la Figura 4, cuidando que todos los nodos coincidieran para evitar problemas de conectividad, y de forma tal para lograr el correcto desarrollo de la malla de elementos finitos de la vivienda.

La malla consiste en elementos finitos tridimensionales. El tamaño de los elementos en la malla utilizada fue de 90 mm de longitud. La relación de aspecto de los elementos debe ser tal que no se tengan elementos esbeltos. Esto dio lugar al modelo de 13,875 elementos finitos que aparece en la Figura 5.

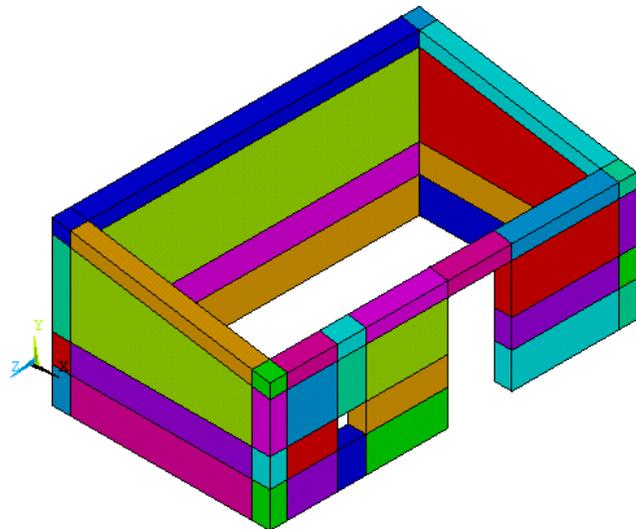


Figura 4. Modelo de sólidos de la vivienda

Para el análisis se consideró el peso propio de los materiales que componen la vivienda, para ello, se incluyó en forma de presión el techo que consiste en la teja sobre la vivienda. La presión ejercida sobre los muros frontal y posterior fue de 0.0044 MPa, y la presión sobre los muros laterales fue de 0.0033 MPa.

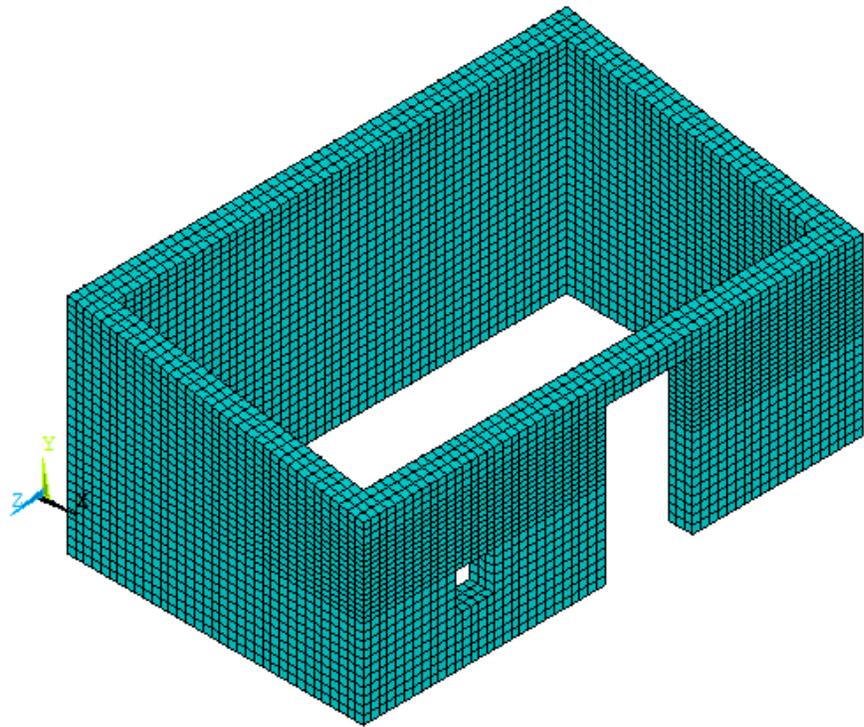


Figura 5. Modelo de elementos finitos de la vivienda

4.1.1. Vivienda elaborada de adobe. MVA

Primeramente, se analizó el modelo de la vivienda considerando que está hecha completamente de adobe, sin algún elemento de otro material como refuerzo. Se aplicó la presión ejercida por la teja y se asignaron las propiedades del Capítulo 3.1.

4.1.2. Vivienda con dintel de madera. MVD

Posteriormente se analizó el modelo asignando a la vivienda un dintel, elemento típico observado en este tipo de casas en la visita de campo. Este dintel se colocó sobre el vano de la puerta, y bajo las propiedades mecánicas establecidas en el Capítulo 3.3 del presente trabajo, además se asignaron las propiedades del Capítulo 3.1 para el resto de la vivienda de adobe.

Las dimensiones del dintel se consideraron de 10 cm de peralte y 25 cm de ancho, este espesor es el mismo que el de los muros.

4.1.3. Vivienda con losa de concreto. MVL

El siguiente modelo se analizó añadiendo otro tipo de techo que consiste en una losa de concreto de 5 cm de espesor. Se calculó la presión ejercida por la losa y se sumó a la presión ejercida por la teja para asignar una presión total al modelo de 0.0097 MPa sobre los muros frontal y posterior, y de 0.0072 MPa sobre los muros laterales.

En lo que puede contribuir la colocación de una losa en el techo de una vivienda de adobe, es proporcionar rigidez a la estructura y proveer una cubierta impermeable que evite la presencia de goteras; el mantener la teja junto con la losa es con el fin de conservar el material que sirve como aislante térmico y acústico, además de seguir la tendencia visual de viviendas de adobe.

4.1.4. Vivienda con malla de acero. MVAR

Al siguiente modelo se le incorporó una malla de acero de refuerzo, que en una vivienda real se ha aplicado sobre los muros de la vivienda, y posteriormente se cubre de mortero, para ello, la malla se añadió al modelo como acero disperso, que es aquel que equivale a una cuantía de acero sin estar físicamente en los elementos, se considera que se agrega pulverizado. Las propiedades utilizadas para este acero se mencionan en el capítulo 3.2. La cuantía de acero considerada en el modelo es una cuantía mínima, aquella definida para mampostería en las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal (NTC-M, 2004).

El objetivo de agregar la malla de acero es la búsqueda de un mejor comportamiento de la vivienda de adobe, sabiendo que diferentes autores la han utilizado como refuerzo con el fin de soportar cargas dinámicas, siendo un sistema económico y simple de aplicar para viviendas existentes (Arroyo et al., 2013; Bartolomé y Quiun, 2015; Catalán, 2013).

4.2. Vivienda de adobe de dos niveles. MVDN

Para este modelo se agregó un nivel adicional a la vivienda. Para ello se hicieron las siguientes consideraciones:

La altura hasta el primer nivel se consideró de 1.90 m. El entrepiso está conformado por un sistema que consta de 8 traves de madera de dimensiones de 10 cm de espesor y 20 cm de peralte separadas a una distancia de 49 cm, estas distancias están determinadas de tal forma

que queda un espacio para la escalera de 92 cm en un costado de la vivienda. Las dimensiones de este sistema de entrepiso se basaron de una vivienda construida de tal forma en el municipio de Jaral del Progreso, Gto, la cual se encuentra actualmente en uso, y se muestra en la Figura 6. Las dimensiones de la escalera considerada para la vivienda se



Figura 6. Traves de madera en entrepiso de la vivienda

muestran en la Figura 7. Las traves de madera si se modelaron, caso contrario al piso, que consiste en tablas del mismo material de 2.54 cm de espesor, que se incluyó en el modelo aplicando su peso como presión sobre las traves modeladas. La presión ejercida sobre las dos traves exteriores fue de 0.0029 MPa, la presión sobre las traves interiores fue de 0.0032 MPa.

Para el segundo nivel se usaron las mismas dimensiones de las características geométricas descritas para la vivienda de un nivel, especificadas en el apartado 4.1. Se consideró también que la vivienda consta de una ventana con dimensiones de $40 \times 40 \text{ cm}^2$ en el segundo nivel. Y el sistema de techo se considera una teja típica de las viviendas de adobe más una losa de concreto de 5 cm de espesor, cuyos pesos se incorporaron como presión en los muros de este segundo nivel. La presión asignada fue de un valor de 0.0072 MPa sobre los muros laterales, y de 0.0097 MPa sobre los muros frontal y posterior.

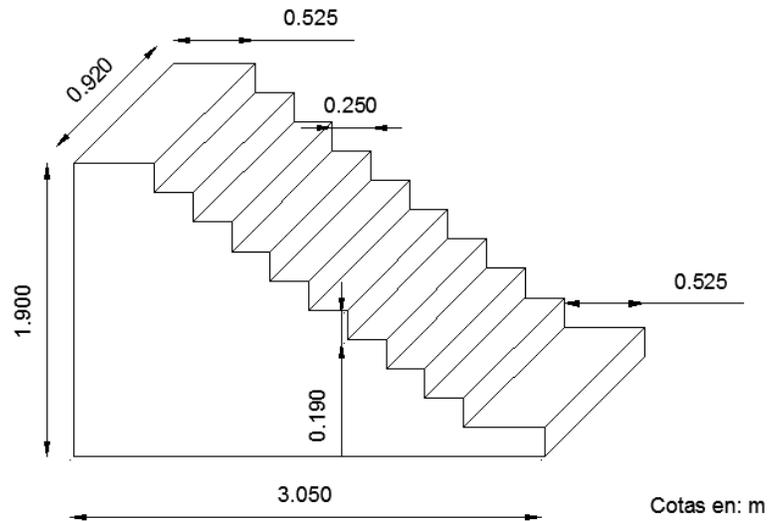


Figura 7. Escalera considerada de la vivienda

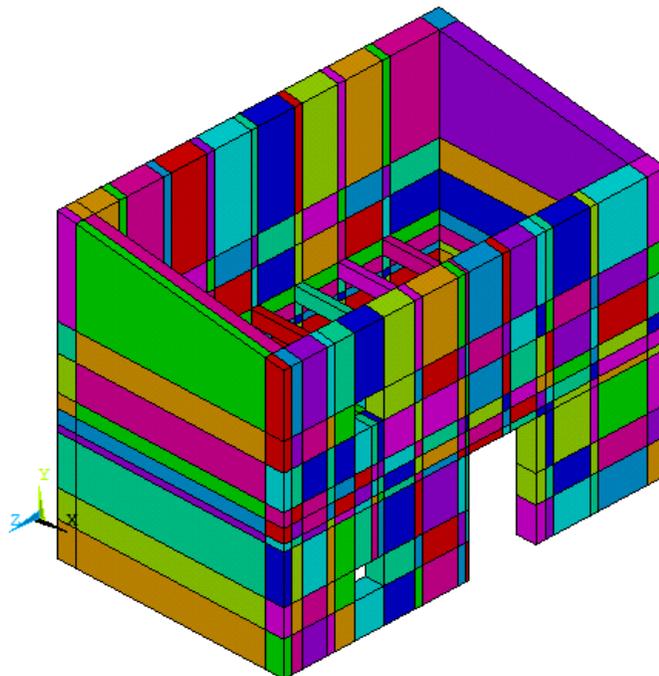


Figura 8. Modelo de sólidos de la vivienda de dos niveles

Se realizó el modelo de sólidos de la vivienda de dos niveles de tal forma que coincidan los nodos y los sólidos para el correcto mallado del modelo, dicho modelo que consta de 377 sólidos y se muestra en la Figura 8, y posteriormente se realizó el modelo de elementos finitos, que se muestra en la Figura 9, y que consiste en una malla de 33,663 elementos tridimensionales de 90 mm de longitud. En color amarillo aparecen aquellos elementos de madera, de color azul oscuro los elementos de adobe que

corresponden al primer nivel de la vivienda, y de color azul claro los elementos de adobe que corresponden al segundo nivel de la vivienda.

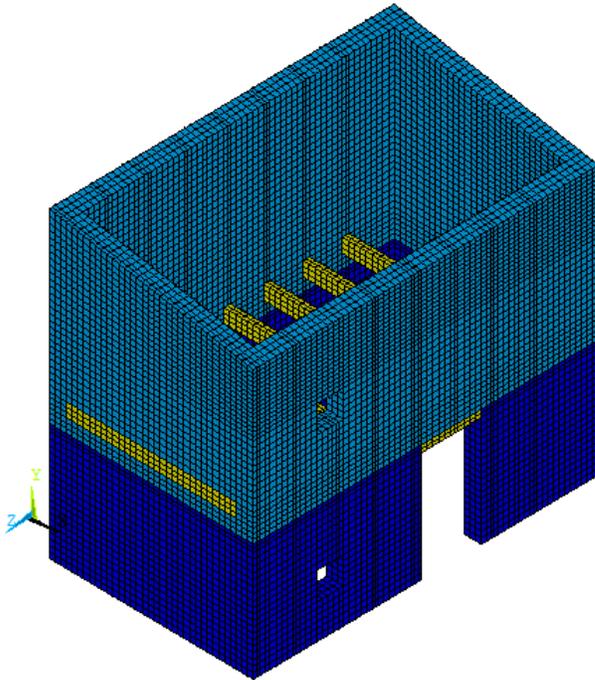


Figura 9. Modelo de elementos finitos de la vivienda de dos niveles

Cabe mencionar que la vivienda de dos niveles se modeló considerando la vivienda elaborada de adobe incluyendo el dintel de madera en la parte superior del vano de la puerta, y se consideró que tenga acero de refuerzo en los muros; las propiedades mecánicas asignadas son las descritas en el capítulo 3, en el apartado del material que corresponde.

4.3. Análisis modal

La dimensión del daño que puede ocasionar un sismo sobre una vivienda depende de tres factores: las características del sismo, las características de la edificación y la respuesta del terreno.

La frecuencia de las ondas de aceleración es un aspecto determinante en la cantidad de daños que sufre una estructura. Todas las estructuras poseen una frecuencia natural de vibración. Si esta frecuencia natural es similar a la frecuencia de las ondas de aceleración del sismo se pueden sufrir daños muy severos, puesto que se presenta el fenómeno conocido como resonancia. Normalmente las construcciones pequeñas poseen una frecuencia natural alta, como consecuencia, son más

vulnerables a sismos que se hayan originado cerca, debido a que estos se asocian también con ondas sísmicas de alta frecuencia. Por otro lado, los edificios altos poseen frecuencias naturales bajas, por consiguiente, son más vulnerables a sismos que se hayan originado lejos debido a que se asocian con ondas sísmicas de baja frecuencia.

El análisis dinámico que se realizó en el presente trabajo es un análisis modal, el cual consiste en determinar las frecuencias naturales y modos de vibrar de las viviendas. Se realizó para una vivienda de un nivel, utilizando aquella correspondiente al MVAR, y para una vivienda de dos niveles, utilizando aquella correspondiente al MVDN. Se obtuvo el modo fundamental de vibrar y además los diez primeros modos de vibrar para ambas viviendas, y se compararon para ver en qué porcentaje aumentan. El procedimiento llevado a cabo fue obtener las frecuencias directamente del programa de análisis ANSYS y calcular el periodo que le corresponde a cada una de ellas.

Además, se describe el comportamiento y movimiento que provoca el modo fundamental de vibrar de cada una de las viviendas.

Un espectro de diseño representa una envolvente de los máximos efectos de un sismo, se puede obtener el espectro de diseño para las distintas zonas en el país mediante la incorporación de la estratigrafía del terreno en donde se levantará la edificación, y con esto, se pueden obtener aceleraciones específicas del sitio, aunque cabe señalar que mediante este método no se representa la condición energética de la estructura.

Contar con un espectro de aceleraciones propio del sitio nos permite estimar fuerzas inerciales, que se obtienen al multiplicar la pseudo-aceleración por el peso de los elementos que conforman la estructura, estas fuerzas aumentan proporcionalmente al presentarse mayores aceleraciones, por lo que mediante este método se estimó en cuál de las viviendas se tiene un mayor riesgo de colapso por generarse fuerzas inerciales mayores.

Tabla 5. Estratigrafía del suelo

Estrato	h (m)	ρ (kg/m³)	v (m/s)
Terreno medio	2.4	1151	90
Terreno firme	17.4	1033	180

Donde h es el espesor del estrato del terreno, ρ es la densidad del terreno y v es la velocidad de propagación de onda.

La estratigrafía considerada para la obtención del espectro de diseño por efectos de sitio se muestra en la Tabla 5, y fue obtenida de un estudio geotécnico realizado en el municipio de Celaya; la herramienta utilizada para el cálculo del espectro fue el programa de diseño sísmico desarrollado por la CFE: PRODISIS v.4.1.

Capítulo 5. Resultados

Los resultados presentados para cada modelo son el mapa de esfuerzos en dirección “Y”, y la suma de desplazamientos totales en la vivienda por la acción de las solicitaciones a las que están sometidas. Se realizó una comparación entre los modelos en la que se incluyen los valores del esfuerzo máximo a compresión, el esfuerzo máximo a tensión y el desplazamiento máximo, mostrando en qué porcentaje aumentan los valores respecto al modelo anterior; en caso de aparecer un valor negativo significa que se sufrió un decremento. El resumen de todos los resultados de los modelos se muestra en la Tabla 11. Los mapas de esfuerzos y de desplazamientos presentados en todos los modelos se presentan en escala real, y en unidades del sistema internacional (MPa y mm respectivamente).

5.1. Vivienda de adobe de un nivel

5.1.1. Vivienda elaborada de adobe. MVA

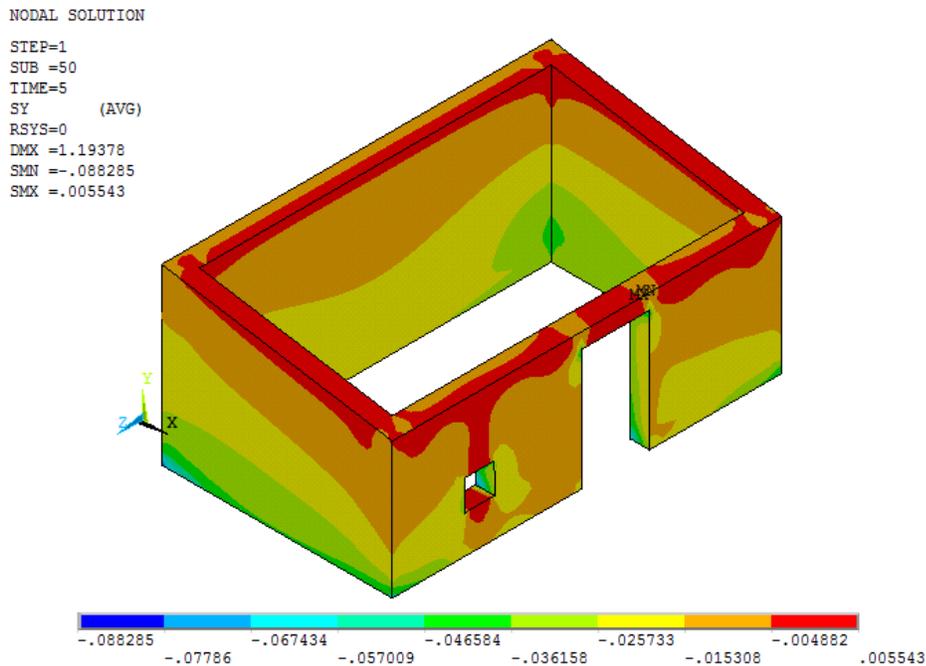


Figura 10. Mapa de esfuerzos en dirección “Y” del MVA

Para el modelo MVA, los esfuerzos a tensión se concentran en la parte superior de la vivienda, así como en el muro alrededor del vano de la ventana, aparecen en color rojo en la Figura 10. El resto de la vivienda presenta esfuerzos a

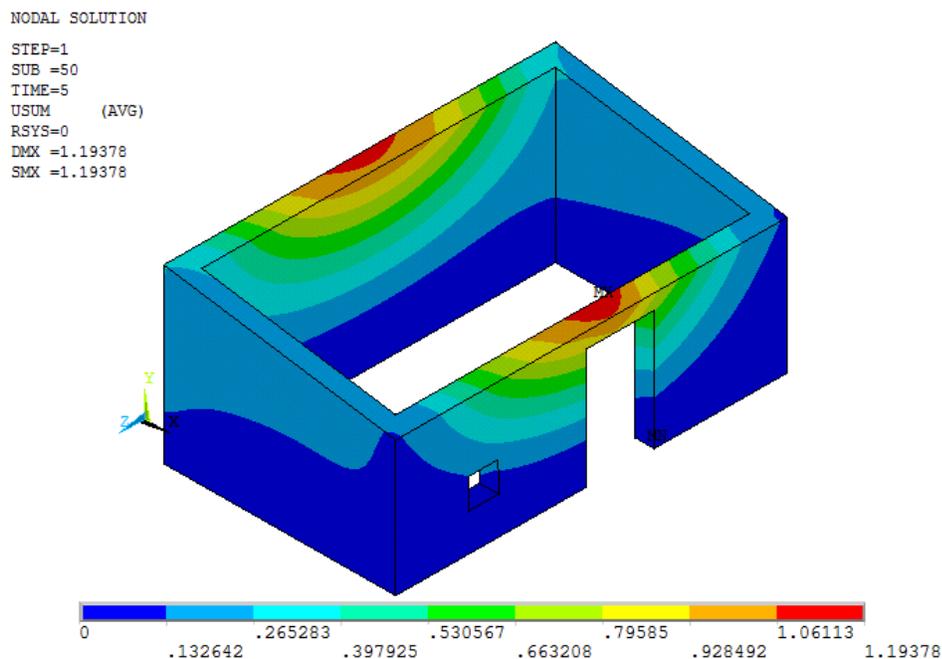


Figura 11. Suma de desplazamientos totales del MVA

esquina donde se unen el muro frontal a la parte alta del vano de la puerta.

En cuanto a los desplazamientos, el mayor fue de 1.1938 mm, y ocurre en la parte superior y en el centro del muro frontal, justo sobre el vano de la puerta, Figura 11. La parte inferior de la vivienda se mantiene completamente sin desplazamientos.

En la Tabla 6 se muestran los resultados del modelo MVA.

Tabla 6. Resultados del MVA

Propiedad	MVA
Esfuerzo a compresión máximo (MPa)	0.0883
Esfuerzo a tensión máximo (MPa)	0.0055
Desplazamiento máximo (mm)	1.1938

Los esfuerzos presentes en la vivienda son menores que las resistencias a tensión y compresión del adobe, por lo tanto, los agrietamientos y aplastamientos presentes en la estructura son nulos. En este modelo el adobe trabaja a 15% de su resistencia compresión y a un 3% de su resistencia a tensión.

5.1.2. Vivienda con dintel de madera. MVD

Los esfuerzos presentes en el modelo MVD se notan distribuidos de forma más uniforme que en el modelo MVA, disminuyen los esfuerzos a tensión en el techo de la vivienda, Figura 12. Se notan mayores esfuerzos de tensión sobre los muros laterales y en la parte superior e inferior del vano de la puerta y la ventana. El valor del esfuerzo máximo a tensión está presente sobre el vano de la puerta, con un valor de 0.0231 MPa, este se genera sobre el dintel de madera, se aprecia en la Figura 13. El resto de la vivienda queda sometida a compresión con un valor máximo de 0.0999 MPa distinguiendo este esfuerzo mayor en las esquinas y en la unión entre muros.

Ambos valores de esfuerzos a tensión y compresión se encuentran alejados de las resistencias a tensión y compresión del adobe, con magnitudes de 0.15 MPa y 0.58 MPa respectivamente, por lo que tampoco en el modelo MVD la vivienda sufren agrietamientos o aplastamientos.

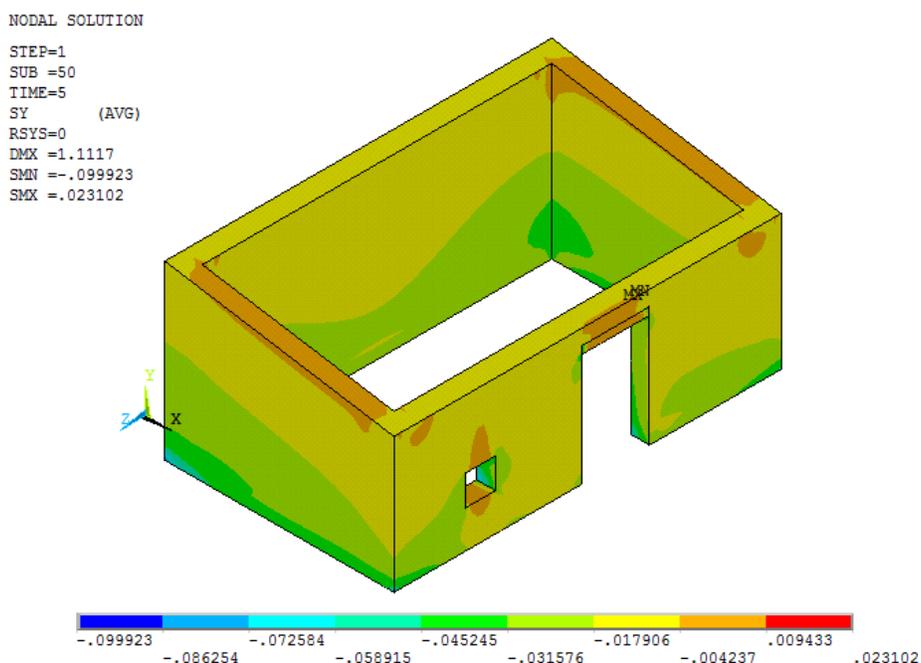


Figura 12. Mapa de esfuerzos en dirección "Y" del MVD

En comparación a los esfuerzos presentes en el MVA, en este MVD el esfuerzo a tensión máximo aumentó 320%, sin embargo, se presentó en el dintel de madera, material que tiene una mayor resistencia a tensión que el adobe; mientras que el esfuerzo a compresión máximo aumentó 13%.

En cuanto a los desplazamientos, Figura 14, el máximo se presenta en la parte superior en el centro del muro posterior de la vivienda, con un valor de 1.1117 mm. Como es de esperarse, en la parte superior del vano de la puerta el desplazamiento disminuyó por la incorporación del dintel de madera. Toda la parte inferior de la vivienda se mantiene inmóvil. En comparación con el modelo MVA el desplazamiento máximo disminuyó 7%, pero en el punto particular donde se coloca el dintel, disminuye un 27%.

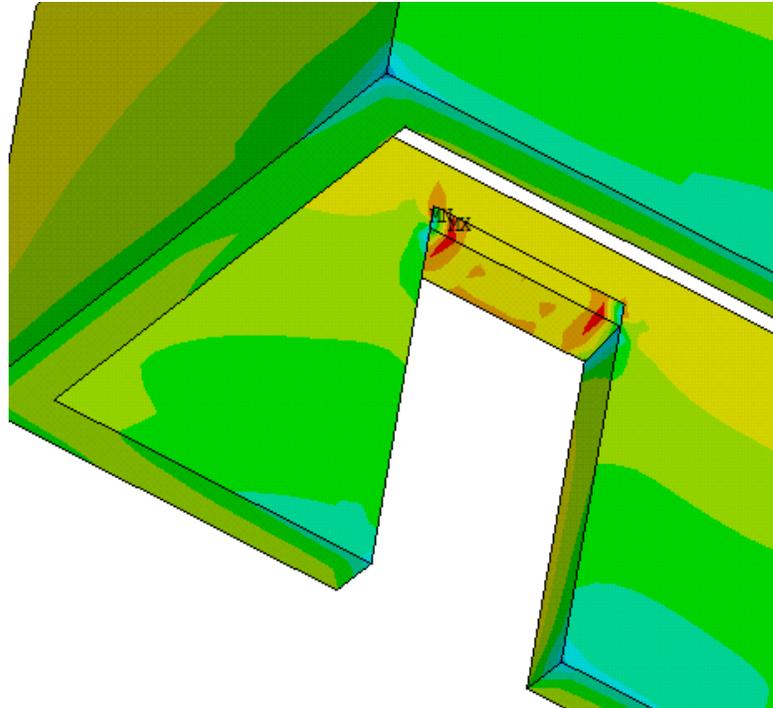


Figura 13. Mapa de esfuerzos en dirección "Y" del MVD sobre el dintel

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =50
 TIME=5
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 DMX =1.1117
 SMX =1.1117

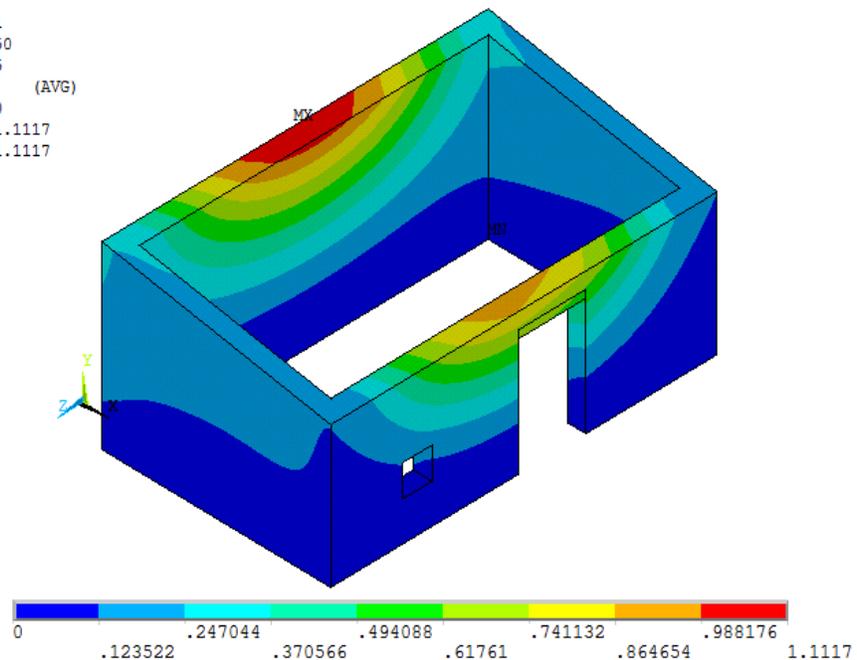


Figura 14. Suma de desplazamientos totales del MVD

Tabla 7. Resultados del MVD y comparación con MVA

Propiedad	MVA	MVD	% de aumento
Esfuerzo a compresión máximo (MPa)	0.0883	0.0999	13
Esfuerzo a tensión máximo (MPa)	0.0055	0.0231	320
Desplazamiento máximo (mm)	1.1938	1.1117	-7

En el modelo MVD el adobe trabaja a 17% de su resistencia a compresión y a 6% de su resistencia a tensión.

5.1.3. Vivienda con losa de concreto. MVL

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =50
TIME=5
SY (AVG)
RSYS=0
DMX =2.35443
SMN =-.177773
SMX =.044018

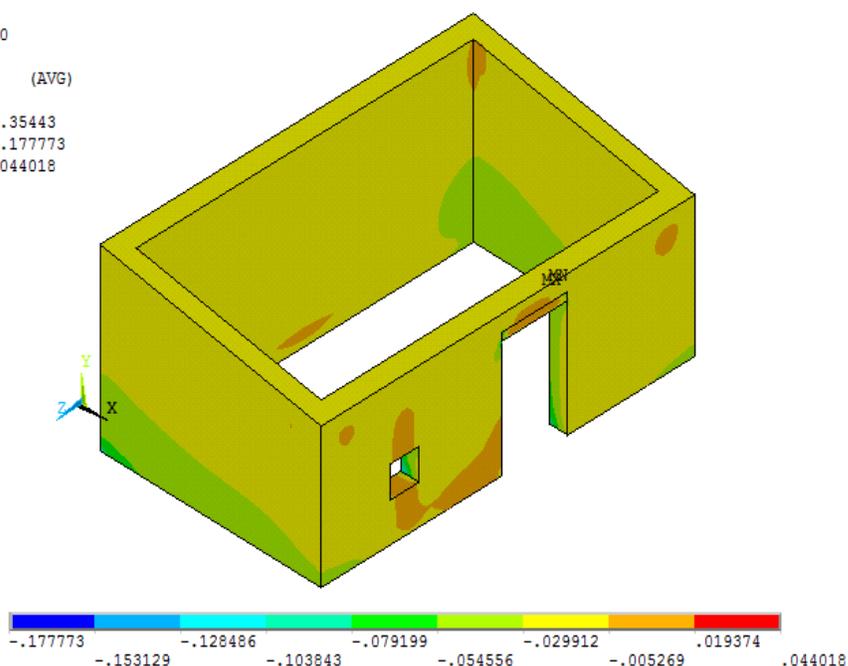


Figura 15. Mapa de esfuerzos en dirección "Y" del MVL

mientras que el resto de la vivienda se mantiene en compresión con un valor máximo de 0.1777 MPa, presente en la unión del muro de adobe con el dintel de madera.

Para el modelo MVL, se uniformizaron los esfuerzos presentes en los muros y en el techo. Lógicamente los valores de esfuerzos máximos aumentaron por la adición de la presión generada por la losa. El mayor esfuerzo en tensión se observa en la parte superior del vano de la puerta, Figura 15, con un valor de 0.0440 MPa,

En el modelo MVL aumenta el esfuerzo máximo a compresión 78% con respecto al MVD, el esfuerzo máximo a tensión aumenta 90% con respecto al MVD.

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =50
TIME=5
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =2.35443
SMX =2.35443
```

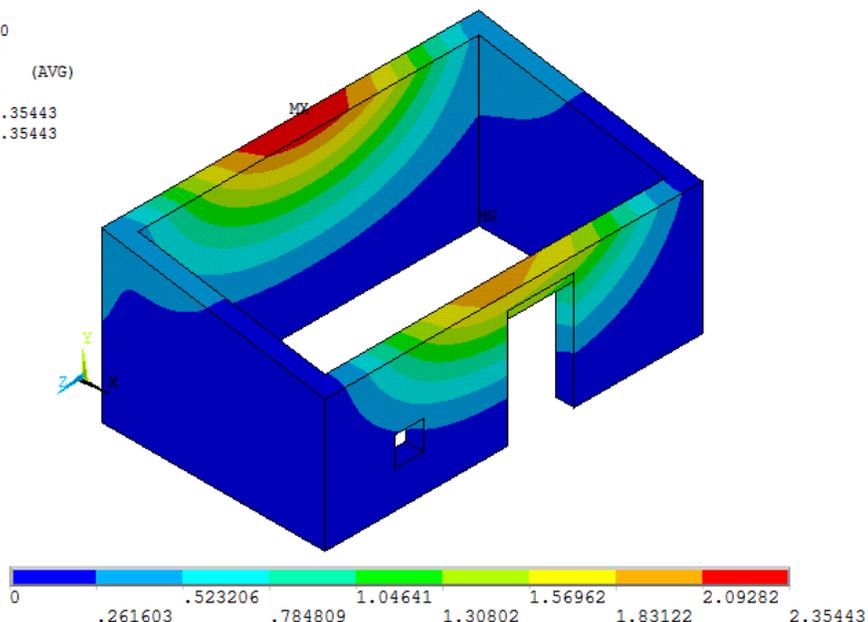


Figura 16. Suma de desplazamientos totales del MVL

En cuanto a los desplazamientos, en el MVL se genera un desplazamiento máximo de 2.3544 mm en la parte superior en la parte central del muro posterior de la vivienda. Lo que equivale a un incremento del 112% respecto al MVD, Figura 16.

Tabla 8. Resultados del MVL y comparación con MVD

Propiedad	MVD	MVL	% de aumento
Esfuerzo a compresión máximo (MPa)	0.0999	0.1777	78
Esfuerzo a tensión máximo (MPa)	0.0231	0.0440	90
Desplazamiento máximo (mm)	1.1117	2.3544	112

Aun agregando la losa de concreto como sistema de techo adicional, y en conjunto con la presión ejercida por la teja, los esfuerzos tanto en compresión y tensión son menores que las resistencias del material; en compresión el adobe trabaja a 30% de su resistencia, mientras que en tensión trabaja a 13% de su resistencia.

5.1.4. Vivienda con malla de acero. MVAR

En el caso del modelo MVAR, los mayores esfuerzos a tensión se presentan en la parte superior del vano de la puerta, con un valor máximo de 0.0440 MPa, mientras que el mayor esfuerzo a compresión es de 0.1777 MPa y se presenta también en la parte superior del vano de la puerta, en la unión del muro con el dintel, Figura 17.

La incorporación de la malla de acero no generó cambios en la respuesta de la vivienda bajo las cargas estáticas a las que se encuentra sometida, esto probablemente ocurrió debido a que la cantidad de acero que se incorporó es mínima y no provoca diferencias significativas, y/o porque el material se mantiene trabajando en su etapa elástica.

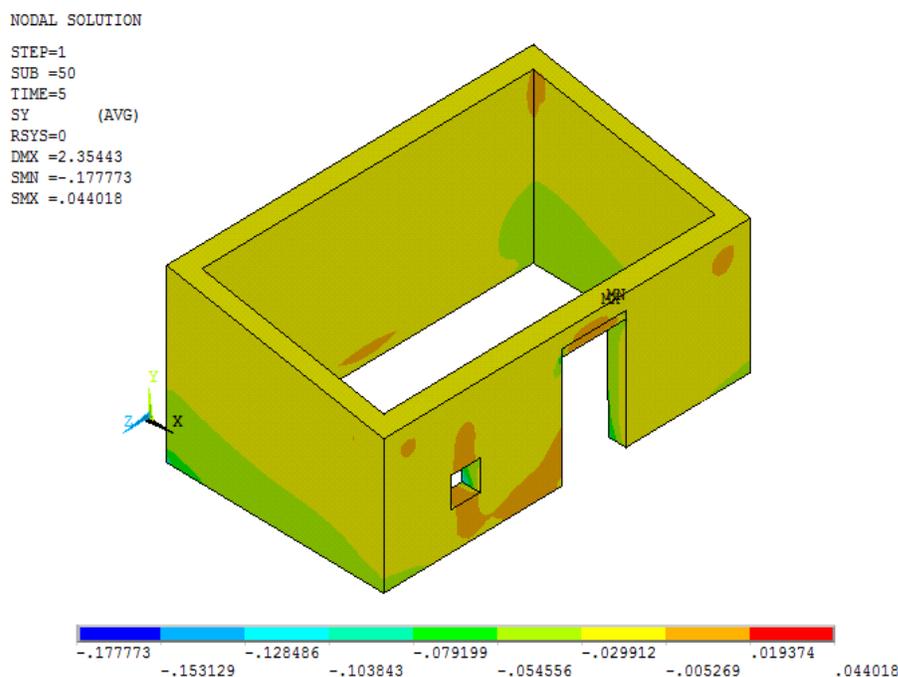


Figura 17. Mapa de esfuerzos en dirección "Y" del MVAR

El mayor desplazamiento se presenta en la parte superior y central del muro posterior, con un valor de 2.3544 mm, Figura 18.

En la Tabla 9 se muestran los resultados del modelo MVAR y su comparación con el MVL.

Tabla 9. Resultados del MVAR y comparación con MVL

Propiedad	MVL	MVAR	% de aumento
Esfuerzo a compresión máximo (MPa)	0.1777	0.1777	0
Esfuerzo a tensión máximo (MPa)	0.0440	0.0440	0
Desplazamiento máximo (mm)	2.3544	2.3544	0

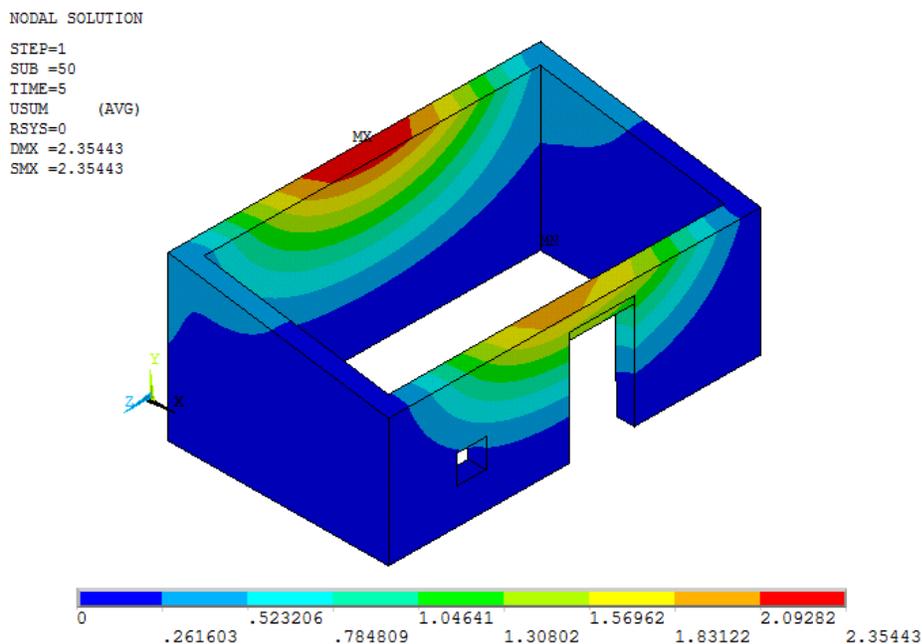


Figura 18. Suma de desplazamientos totales del MVAR

Para el MVAR no se presentan tampoco agrietamientos ni aplastamientos en la vivienda, y el adobe se encuentra trabajando a un 30% de su resistencia a compresión y a 13% de su resistencia a tensión.

5.2. Vivienda de adobe de dos niveles. MVDN

En la mayor parte de la vivienda del modelo MVDN se generan esfuerzos a compresión, Figura 19.

El esfuerzo máximo a tensión que se presentó fue de 0.0788 MPa, ubicado en las vigas de madera que conforman el entrepiso de la vivienda, mientras que el máximo esfuerzo a compresión fue de 0.3763 MPa, y se encuentra en la unión de las vigas de entrepiso con el muro de adobe, se aprecia en la Figura 20.

En comparación con la vivienda de un nivel (MVAR) los esfuerzos máximos a compresión aumentaron 112% para la vivienda de dos niveles, mientras que el esfuerzo a tensión máximo aumentó 80%.

Al igual que en el MVL y en el MVAR se presentan en general esfuerzos uniformes en la vivienda, siendo mayores en compresión en la parte baja de la vivienda, puesto que van aumentando conforme se va acumulando el peso del material.

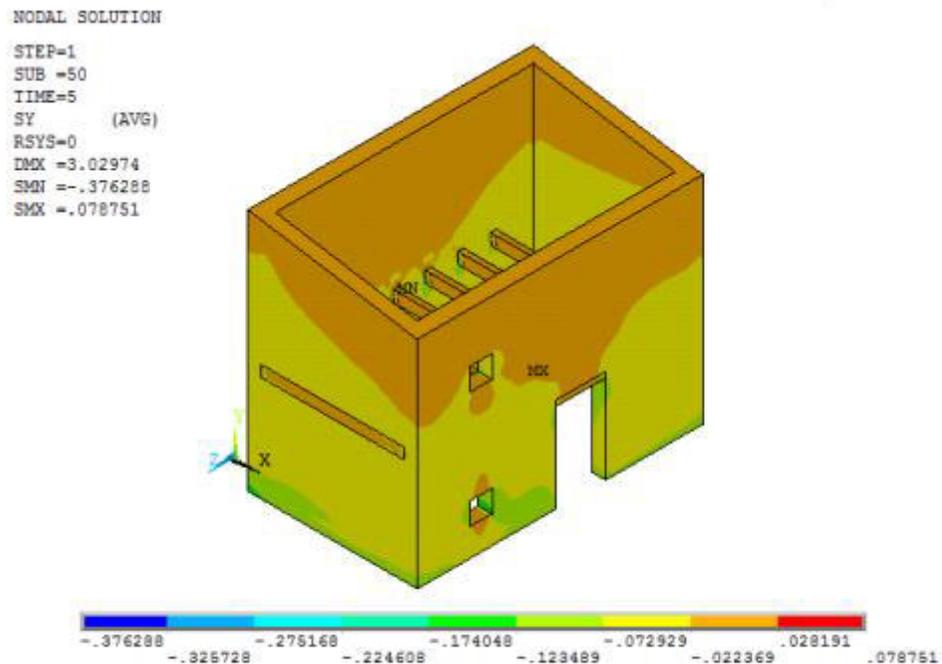


Figura 19. Mapa de esfuerzos en dirección "Y" del MVDN

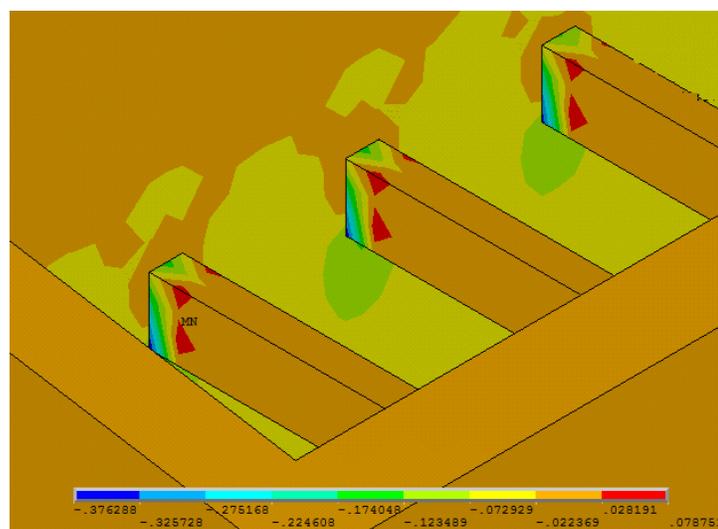


Figura 20. Mapa de esfuerzos en dirección "Y" del MVDN sobre vigas de entepiso

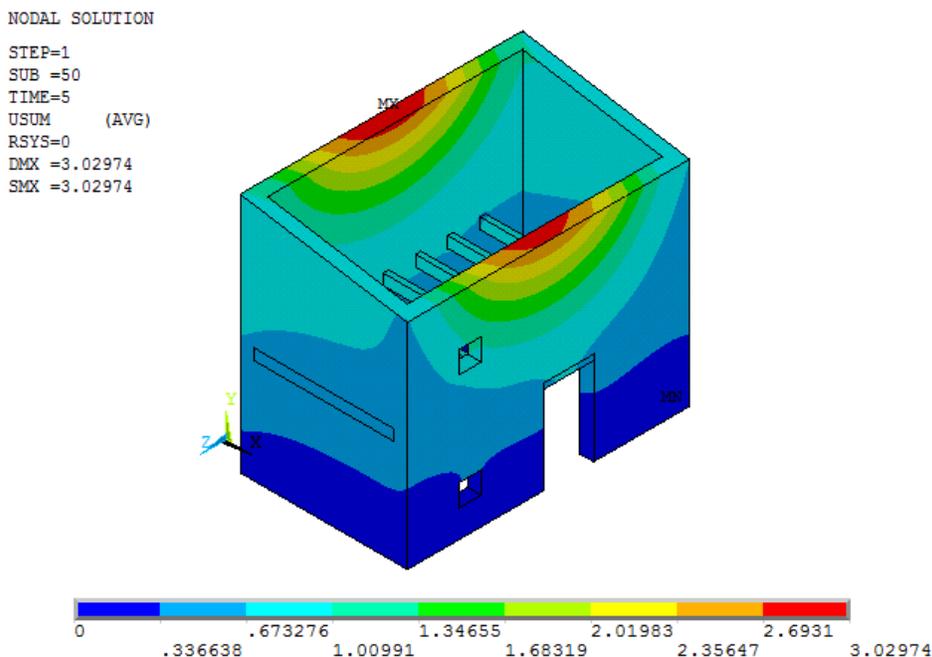


Figura 21. Suma de desplazamientos totales del MVDN

En cuanto a los desplazamientos para el MVDN, estos aumentan 29% respecto a la vivienda de un nivel (MVAR), y específicamente este máximo desplazamiento ocurre en la parte superior y central de los

muros frontal y posterior de la vivienda, material de adobe; es importante recalcar que la ubicación del desplazamiento máximo se mantuvo constante en todos los modelos, Figura 21. Mientras que de igual manera la parte inferior de la vivienda permaneció inmóvil. En la Tabla 10 se muestran los resultados del MVDN y la comparación con el MVAR.

Tabla 10. Resultados del MVDN y comparación con MVAR

Propiedad	MVAR	MVDN	% de aumento
Esfuerzo a compresión máximo (MPa)	0.1777	0.3763	112
Esfuerzo a tensión máximo (MPa)	0.0440	0.0788	80
Desplazamiento máximo (mm)	2.3544	3.0297	29

La inclusión de un nivel más en la vivienda hace pensar que se sobrepasarán los valores de las resistencias del adobe, sin embargo, el material se encuentra trabajando a 60% de su resistencia a compresión y a 20% de su resistencia a tensión, por lo que no se generan aplastamientos o agrietamientos.

Tabla 11. Resumen de resultados de los modelos

Propiedad	MVA	MVD	MVL	MVAR	MVDN
Esfuerzo a compresión máximo (MPa)	0.0883	0.0999	0.1777	0.1777	0.3763
Esfuerzo a tensión máximo (MPa)	0.0055	0.0231	0.0440	0.0440	0.0788
Desplazamiento máximo (mm)	1.1938	1.1117	2.3544	2.3544	3.0297

En la Tabla 11 se muestran los resultados de todos los modelos, se puede destacar que en ninguno de ellos los esfuerzos presentes sobrepasan las resistencias del material, por lo que una vivienda típica de adobe no sufre daños bajo la acción de cargas gravitacionales.

5.3. Análisis modal

El periodo fundamental de vibrar obtenido para la vivienda de un nivel fue de 0.1945 s (5.1424 Hz), y presenta un movimiento en dirección transversal, generando flexión en los muros frontal y posterior, notoriamente mayor en el posterior, en el muro frontal apenas se distingue movimiento, Figura 22.

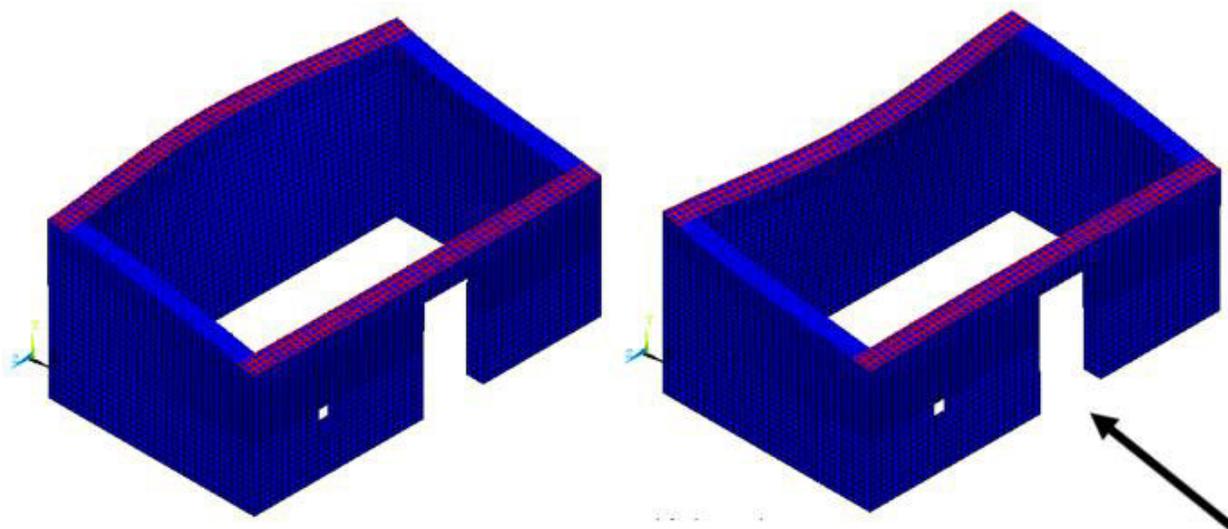


Figura 22 . Primer modo de vibrar de la vivienda de un nivel

El periodo fundamental de vibrar obtenido para la vivienda de dos niveles fue de 0.2595 s (3.85 Hz), y genera un movimiento en dirección transversal, cuyo comportamiento genera flexión en los muros frontal y posterior, siendo el movimiento de ambos muros en el mismo sentido, Figura 23.

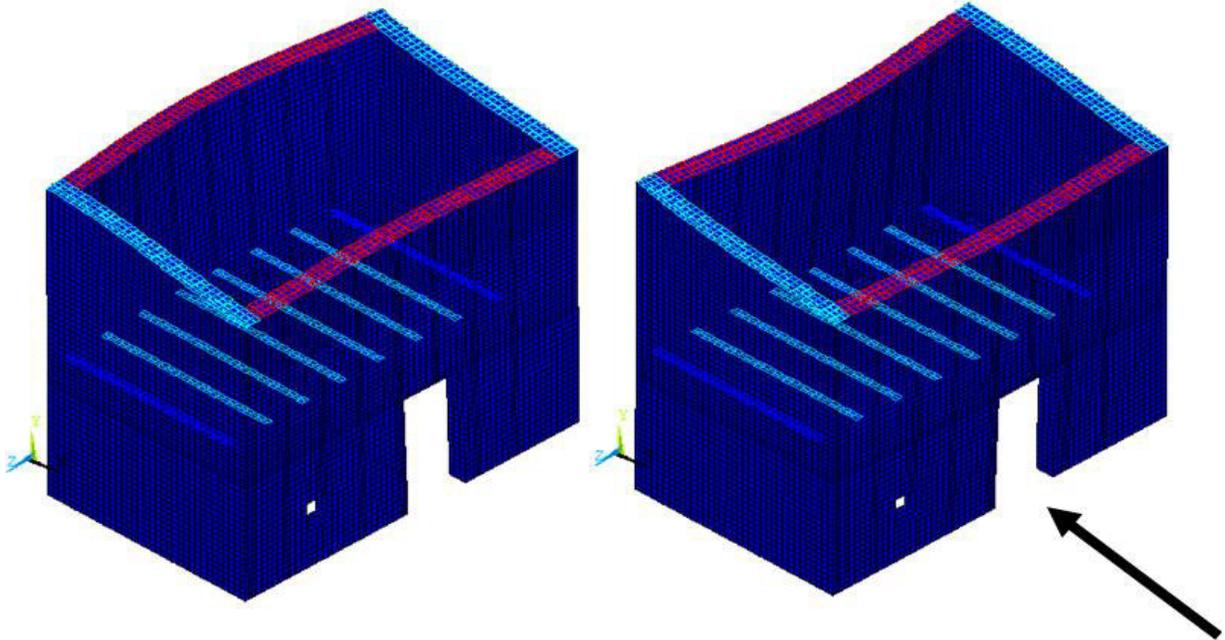


Figura 23 . Primer modo de vibrar de la vivienda de dos niveles

El segundo periodo de vibrar para la vivienda de dos niveles fue de 0.2035 s (4.91 Hz) con un movimiento en dirección transversal, generándose flexión en los muros frontal y posterior, pero siendo en sentido opuesto el movimiento de los muros, Figura 24.

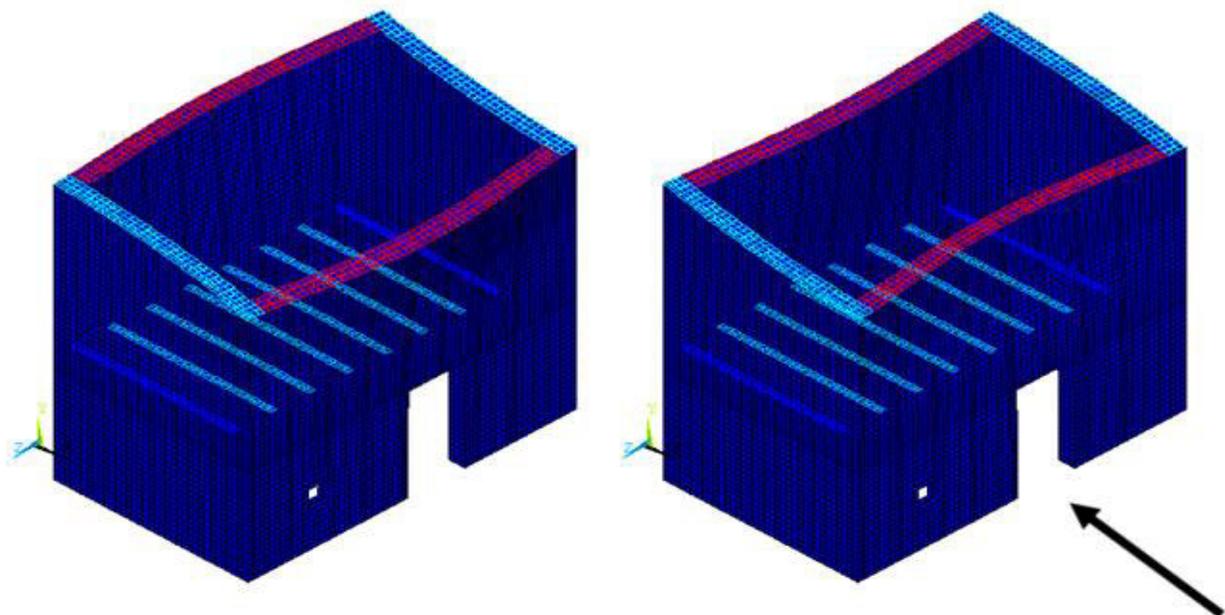


Figura 24 . Segundo modo de vibrar de la vivienda de dos niveles

Tabla 12. Frecuencias y periodos de vibrar de las viviendas

Modo	Vivienda un nivel		Vivienda dos niveles		% Aumento
	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	
1	5.1424	0.1945	3.8541	0.2595	33.4267
2	6.8097	0.1468	4.9142	0.2035	38.5719
3	9.1893	0.1088	6.8131	0.1468	34.8769
4	11.1080	0.0900	7.2956	0.1371	52.2562
5	11.4860	0.0871	8.3136	0.1203	38.1592
6	13.5750	0.0737	9.7995	0.1020	38.5275
7	18.2180	0.0549	9.9062	0.1009	83.9050
8	19.1960	0.0521	10.1790	0.0982	88.5843
9	20.1920	0.0495	10.7940	0.0926	87.0669
10	21.8600	0.0457	13.3750	0.0748	63.4393

En la Tabla 12 se muestran las frecuencias y periodos de los diez primeros modos de vibrar de las viviendas de un nivel y de dos niveles, y se equiparan para ver en qué porcentaje aumentan respecto a los de la otra vivienda. En comparación, en la vivienda de dos niveles se tienen periodos 35% más grandes que en la vivienda de un nivel para los modos fundamentales de vibrar. Sin embargo, considerando los diez modos obtenidos, el promedio en el aumento del periodo para la vivienda de dos niveles es de 55%.

En cuanto al espectro de diseño por efectos de sitio obtenido, se muestra en la Figura 25, el eje de las abscisas corresponde al periodo T en segundos, y el eje de las ordenadas corresponde a las pseudo-aceleraciones S_a normalizadas a la aceleración de la gravedad. El valor del periodo de la vivienda de un nivel (0.1945 s) dentro del espectro cae en un valor de pseudo-aceleración de 0.70, mientras que el valor del periodo de la vivienda de dos niveles (0.2595 s) cae en el valor de pseudo-aceleración de 0.85.

Estos valores de pseudo-aceleración permiten interpretar que en la vivienda de dos niveles se estarían generando fuerzas 21% más grandes que en la vivienda de un nivel, y por tanto tendrá mayor riesgo de colapso.

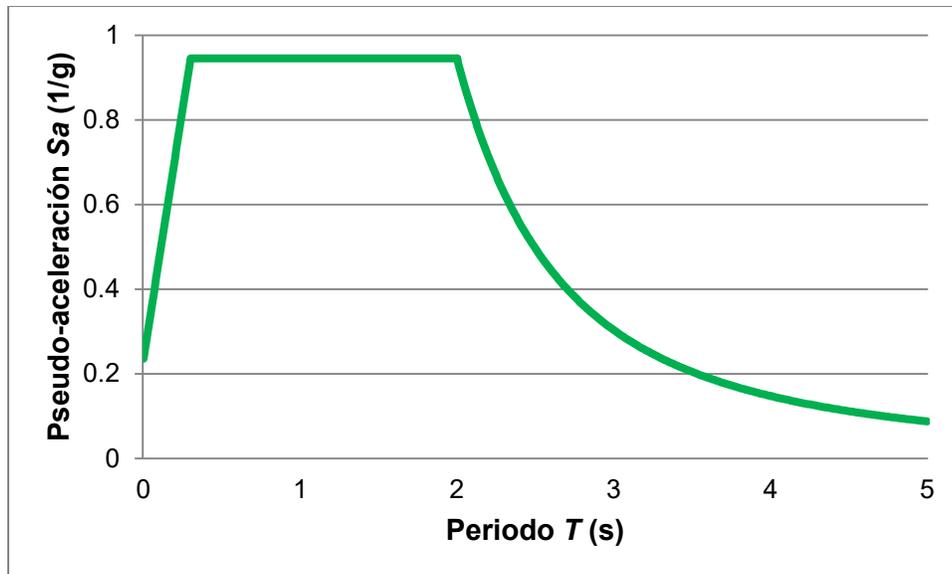


Figura 25. Espectro de diseño por efectos de sitio

Conclusiones y recomendaciones

Se han realizado recientemente investigaciones sobre el comportamiento mecánico del adobe, buscando mejorar y garantizar la resistencia y la seguridad de construcciones ya existentes, así como de las nuevas que se levantarán de este material.

Al analizar las viviendas, se nota que la incorporación del dintel de madera a la vivienda (MVD) provoca que los desplazamientos máximos en la vivienda disminuyan un 7% con respecto a la vivienda de adobe sin ningún tipo de refuerzo (MVA), pero en el punto particular donde se coloca el dintel, sobre la puerta de la vivienda, el desplazamiento disminuye un 27%.

En la vivienda en la que se agrega una losa de concreto al sistema de techo (MVL) se duplican los esfuerzos a compresión, a tensión, así como el desplazamiento máximo presentes en la vivienda.

El agregar la malla de acero como refuerzo en los muros de la vivienda (MVAR) no genera diferencia en su respuesta estructural bajo la acción de cargas gravitacionales.

Al agregar un nivel más a una vivienda de adobe (MVDN), se duplican los esfuerzos máximos a compresión y a tensión presentes, mientras que el desplazamiento máximo aumenta en un 30% con respecto a una vivienda de adobe de un nivel (MVAR).

Una vivienda de adobe típica del estado no sufre agrietamiento ni aplastamiento bajo la acción de cargas gravitacionales.

En la vivienda de dos niveles aumenta el periodo fundamental de vibrar un 35% respecto a la vivienda de un nivel, por lo que es el mismo porcentaje en que disminuye su frecuencia.

El modo fundamental de vibrar tanto para la vivienda de un nivel como para la vivienda de dos niveles genera un movimiento similar, en dirección transversal,

generándose flexión en los muros longitudinales en el mismo sentido, pero notándose un mayor movimiento en el muro posterior de las viviendas.

En una vivienda de adobe de dos niveles se presentarían un 3.5% mayores pseudo-aceleraciones que en la vivienda de un nivel, dentro del espectro de diseño por efectos de sitio, lo que generaría el aumento de las fuerzas inerciales y riesgo de colapso.

Una estandarización de los componentes del adobe y de su proceso constructivo podría garantizar la homogeneidad de sus propiedades y de su comportamiento estructural; esto se puede lograr con el desarrollo de una normativa que regule todos los aspectos de la construcción con mampostería de adobe.

Investigaciones futuras

Incluir en los modelos numéricos propiedades mecánicas de los materiales obtenidas de pruebas experimentales realizadas a piezas de adobe fabricadas en el estado de Guanajuato.

Desarrollar un análisis dinámico que complemente el estudio y entendimiento del comportamiento de viviendas de adobe, dado que varios autores coinciden a que viviendas de este tipo son vulnerables a cargas dinámicas, y es probable que sufran algún tipo de daño bajo la acción de este tipo de solicitaciones.

Realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica en este tipo de viviendas.

Referencias

- [1] Aceros para la construcción. G&J Empresas de acero. Colombia, 2017
- [2] ANSYS Inc., (2017), Release 17.0 Mechanical APDL Documentation
- [3] Arguello T., y Burgos A. (2008). Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10x10 Con Techo-Chiapas del CYTED. Informes de la Construcción Vol.60 Pag.25-34
- [4] Arista G., Aguillón J., y Cataño A. (2016). La edificación con tierra y su pertinencia en la construcción de vivienda contemporánea. Repositorio UACJ. Instituto de Arquitectura Diseño y Arte. Departamento de Arquitectura. Primer Coloquio sobre Arquitectura de Tierra. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- [5] Arroyo R., Sánchez S., y Catalán P. (2013). Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México. Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán Vol.17 Num.3 Pag. 167-177
- [6] Bartolomé A., y Quiun D. (2015). Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe típicas del Perú. Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V., Vol.30 Num.1 Pag.71-81
- [7] Blondet M., Vargas J., Tarque N., y Iwaki C. (2011). Construcción sismoresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Informes de la Construcción Vol.63 Pag. 41-50
- [8] Campos-Rodríguez L., Rodríguez-Rocha R., y Flores-Méndez E. (2012). Modelación numérica de muros de mampostería sujetos a hundimiento. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Acapulco, Guerrero 2012. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- [9] Casas Infonavit. (2017). Obtenido de <http://www.casasinfonavit.com.mx/> Recuperado el 24 de Junio de 2017.

-
- [10] Catalán P. (2013). Comportamiento sísmico de la vivienda de adobe basado en pruebas en mesa vibradora de dos modelos a escala. Tesis de Maestría. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [11] Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social CONEVAL. (2015). Dirección de información y comunicación social. Comunicado de Prensa No.005. 23 de Julio de 2015. México, DF.
- [12] Delgado, E. (2006). Comportamiento Sísmico de un Módulo de Adobe de Dos Pisos con Refuerzo Horizontal y Confinamiento de Concreto Armado. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [13] Ecocosas. (2012). Obtenido de <https://ecocosas.com/arq/el-adobe/> Recuperado el 13 de Marzo de 2017.
- [14] Eslami A., Ronagh H., Mahini S., y Morshed R. (2012). Experimental investigation and nonlinear FE analysis of historical masonry buildings - A case study. *Construction and Buildings Materials* Vol. 35. Pag. 251-260.
- [15] Feng W., Gang L., Hong-Nan L., y Jin-Qing J. (2013). Strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry. *Materials and Structures* Vol.46 Pag. 1449-1457.
- [16] García E. (2011). Ecofraccionamiento Huaxcorral. Vivienda sostenible de adobe. Tesis de Licenciatura. Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [17] Illampas R., Ioannis I., y Charmpis D. (2014). Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation. *Construction and Buildings Materials* Vol.53 Pag. 83-90.
- [18] Iriarte G., y Alberto F. (2010). Control de vibraciones para casas de tierra en Perú. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Universidad Nacional de Ingeniería.

-
- [19] Laborel-Préneron A., Aubert J., Magniont C., Tribout C., y Bertron A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials* Vol.111 Pag. 719-734.
- [20] Lewis, M. (2011). Construcción con adobe en el siglo XXI. *Revista Real Estate* Enero 2011. *Arquitectura sustentable*.
- [21] Lizárraga J. (2011). Comportamiento de muros de mampostería confinada con distintas configuraciones. Tesis de Maestría. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [22] Lizárraga J. (2017). Comportamiento de muros de mampostería confinada sobre elementos flexibles. Tesis de Doctorado. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [23] Lizárraga J., y Pérez J. (2016). Modelación no lineal de muros de mampostería empleando elementos de contacto. *Revista de Ingeniería Sísmica* No.93 Pag.41-59.
- [24] Morel J., Aubert J., Millogo Y., Hamard E., y Fabbri A. (2013). Some observations about the paper "Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction" by Pacheco-Torgal and S. Jalali. *Construction and Building Materials* Vol.44 Pag. 419-421.
- [25] Moreno J. (2011). Estudio de las propiedades mecánicas del adobe mejorado con diferentes materiales para su empleo como material alternativo en la dirección general de ingenieros. Tesis de Licenciatura. Escuela Militar de Ingenieros Pedagógica. Campo Militar No.1-B, Popotla, D.F.
- [26] NTC-M (2004). "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", Gobierno del Distrito Federal.
- [27] Piattoni Q., Quagliarini E., y Lenci S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials* Vol.25 Pag. 2067-2075.

-
- [28] Quagliarini E., y Lenci S (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage* Vol. 11 Pag. 309-314.
- [29] Ribeiro A., Marin L., Perazzo N., Protásio T., Campos N., y Denzin G., (2015). Incorporation of bamboo particles and “synthetic termite saliva”. *Construction and Building Materials* Vol. 98 Pag. 250-256.
- [30] Rodríguez-Díaz M., Saroza-Horta B., Ruíz-Sánchez P., Barroso-Valdés I., Ariznavarreta-Fernández F., y González-Coto F. (2014). Some recommendations for the construction of walls using adobe bricks. *Dyna* Vol.81 Pag. 145-152 .
- [31] Roeder G. (2004). Simulación numérica del comportamiento mecánico de la mampostería. Tesis de Doctorado. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [32] Romero B., y Zhindón P. (2017). Evaluación sísmica de casas de mampostería de tierra. Trabajo de titulación. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Cuenca.
- [33] Saroza B., Rodríguez M., Menéndez J., y Barroso I. (2008). Estudio de la resistencia a compresión simple del adobe elaborado con suelos procedentes de Crescencio Valdés, Villa Clara, Cuba. *Informes de la Construcción* Vol.60 Pag. 41-47.
- [34] Sathiparan N., y Meguro K. (2015). Strengthening of adobe houses with arch roofs using tie-bars and polypropylene band mesh. *Construction and Building Materials* Vol.82 Pag. 360-375.
- [35] Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU). Comisión Nacional de Vivienda. Programas Nacionales de Desarrollo Urbano y de Vivienda 2013 - 2018 (2013) México.

-
- [36] Silveira D., Varum H., y Costa A. (2013). Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks. *Construction and Building Materials*. Vol 40 Pag.719-728.
- [37] Silveira D., Varum H., Costa A., Martins T., Pereira H., y Almeida J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials* Vol.28 Pag. 36-44.
- [38] Sotomayor J., Herrera M., y Cruz de León J. (2003). Clasificación Mecánica De La Madera De 100 Especies Mexicanas. XII World Forestry Congress, 2003 Québec City, Canada.
- [39] Taallah B., Guettala A., Guettala S., y Kriker A. (2014). Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials* Vol.59 Pag.161-168.
- [40] Truong-Hong L., y Laefer D. (2008). Micro vs. macro models for predicting building damage underground movements. *The International Conference on Computational Solid Mechanics*. Hochiminh City, Vietnam.
- [41] Turanli L., y Saritas A. (2010). Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh. *Construction and Building Materials* Vol.25 Pag. 1747-1752.
- [42] Vega P., Juan A., Guerra M., Morán J., Aguado P., y Lamas B. (2011). Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain. *Construction and Building Materials* Vol.25 Pag. 3020-3023.
- [43] Velarde G. (2014). Análisis de vulnerabilidad sísmica de viviendas de dos pisos de adobe existente en Lima. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica Del Perú.
- [44] Younoussa M., Jean-Claude M., Jean-Emmanuel A., y Khosrow G. (2013). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials* Vol.52 Pag. 71-78.