

Simulación Numérica 3D de una Vivienda de Adobe Bajo Cargas Permanentes.

Jatziri Yunuén Moreno Martínez*, Diego Octavio Andrade Rodríguez, Alfredo Guido Hernández Arturo Galván Chávez

Programa de Licenciatura en Ingeniería Civil
Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra
jatziri.moreno@ugto.mx

Recibido: 29 de octubre de 2021

Aceptado: 10 de febrero de 2022

RESUMEN

Aproximadamente el 50% de la población de países en desarrollo vive en casas hechas de tierra, incluyendo la mampostería de adobe, este material es sustentable, económico, con buen aislamiento térmico y facilidad de la autoconstrucción. Sin embargo, es un material poco resistente comparado a otros materiales como el concreto o el acero. Actualmente no se cuenta con información en los reglamentos de construcción en México que pueda aportar o hacer recomendaciones para llevar a cabo el diseño de estructuras con mampostería de adobe. El objetivo del trabajo es predecir la respuesta estructural de una vivienda de adobe a construir en Guerrero, México con diseño arquitectónico bajo cargas permanentes considerando un sistema de techumbre de madera y teja. Se realizó un modelo de elementos finitos en 3D tomando en cuenta las propiedades mecánicas del adobe obtenidas de la literatura, se empleó el modelo de daño de Willam Warnke el cual tiene la capacidad de agrietarse en tensión y aplastarse en compresión, así como el criterio de fluencia de Drucker Prager para las deformaciones plásticas. Los resultados indican que la vivienda no presenta agrietamiento o aplastamiento. El esfuerzo máximo alcanzado en compresión corresponde al 15% de su resistencia a compresión y el esfuerzo máximo de tensión al 42% de su resistencia a tensión. Por lo tanto, la vivienda cuenta con reserva de capacidad de resistencia brindando seguridad estructural bajo condiciones de cargas permanentes.

Palabras claves: adobe, propiedades mecánicas, simulación numérica, modelos de elemento finito, cargas permanentes.

ABSTRACT

Approximately 50% of the population in developing countries live in earthen dwellings, including adobe masonry, it is a sustainable material, inexpensive, with an excellent thermal insulation and easily self-built. However, it is a material that is not very resistant compared to other materials such as concrete or steel. Nowadays, it is not possible to get official recommendations to work with this material because there is not available design information for adobe masonry in Mexico's construction regulations. The aim of this paper consists to simulate the structural behavior of an adobe dwelling built in Guerrero, Mexico with architectural design under permanent loads, considering the weight generated by the wood and tile roof system. A 3D finite element model was carried out, taking into account adobe's mechanical properties subtracted from literature and including William Warnke's damage model which has the capacity of cracking in tension and crushing in compression, so as Drucker Prager's yielding criterion was used for plastic deformations. Results show that no cracking or crushing occur in the dwelling. The maximum compressive stress obtained in the numerical model corresponds to 15% of its compressive resistance and the maximum tensile stress corresponds to 42% of its tensile resistance. Therefore, the dwelling has a resistance capacity reserve, being capable to offer structural security under these permanent load conditions.

Keywords: adobe, mechanical properties, numerical simulation, finite element model, permanent loads.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la vivienda ha sido uno de los elementos más indispensables en la vida del ser humano, sin ésta, sería probablemente imposible asegurar la supervivencia, protegiendo al hombre de todo aquello que habita en el exterior. Los peligros y amenazas referentes al clima y la fauna circundante se ven mermados al tener un sitio en el cual refugiarse.

Sin embargo, las necesidades y habilidades del ser humano han ido evolucionando y por ende la vivienda *per se*; que desde hace ya mucho tiempo el fin de ésta dejó de ser sólo el de proporcionar seguridad, si no también comodidad y estética (Aguiluz-León, et al., 2018).

Pero al mismo tiempo, en muchas partes del mundo, se ha descuidado el ámbito ambiental y sustentable debido a los modernos métodos constructivos en viviendas, los cuáles contemplan materiales no ecológicos y que tanto su manufactura como desecho generan cicatrices al planeta.

Además, en México no sólo existe el problema del impacto ambiental generado por materiales industrializados para la construcción de viviendas, sino también la vulnerabilidad presente en comunidades económicamente marginadas, comúnmente localizadas en zonas rurales. En las cuales, al construir sus ‘moradas’ con materiales naturales, la estabilidad de la estructura y su comportamiento puede comprometerse ante movimientos sísmicos (Serrano, et al., 2016a; Catalán, et al., 2020) e incluso ante las propias cargas permanentes debido a la ambigüedad sobre la resistencia de los materiales (Catalán, et al., 2019).

En búsqueda de aminorar ambas problemáticas, y tomando en cuenta que la tierra como material de construcción es uno de los más antiguos y con mayor influencia en el mundo (Varum, et al., 2015); en el presente trabajo se estudió el adobe como material de construcción. Esto toma gran importancia ya que del 30-50% de la población mundial vive o trabaja en construcciones de tierra (Macabuag et al., 2012; Varum et al., 2013; Catalán, et al., 2020), y aproximadamente el 50% de la población en países en desarrollo (incluyendo la mayoría de la población rural y al menos el 20% de la población urbana y suburbana) vive en viviendas de tierra (Catalán, et al., 2020).

Se sabe, además, que la mampostería de adobe posee la gran ventaja de que la materia prima siempre está presente en el sitio (Moreno, 2011), al estar básicamente conformada por tierra, paja y agua para los muros, y para el sistema de techo en estas viviendas se suele utilizar madera. Entre otras de sus ventajas son sus propiedades térmicas, acústicas y mecánicas (Corrêa, et al., 2006; Corrêa, et al., 2015; Moreno-Martínez, et al., 2017).

Por otro lado, cabe mencionar que este material cuenta con varias desventajas comparado con otros materiales usados en las edificaciones, como la capacidad de resistencia ante esfuerzos o cargas externas, y durabilidad al estar expuesto a un grado de intemperización alto, es por esto que es uno de los materiales más vulnerables dentro de la construcción (Catalán, et al., 2019; Catalán, et al., 2020), y que al menos en México, no se cuenta con cuadros normativos para su debido empleo.

Sin embargo, gracias a investigaciones con mayor profundización acerca del adobe, se han podido conocer las propiedades mecánicas de este material (Serrano, et al., 2016b; Catalán, et al., 2019; Catalán, et al., 2020). Al caracterizar el material y utilizar esas piezas de adobe para la construcción de una estructura en particular es posible incluir sus propiedades mecánicas en modelos numéricos y realizar su análisis estructural que determine qué tan factible es construir con este material, como puede ser para el caso de estudio de este trabajo para viviendas que cuenten con un diseño arquitectónico bajo cargas permanentes.

En la tabla 1, se muestra un compendio de trabajos experimentales realizados para obtener propiedades mecánicas del adobe realizados en diferentes partes del mundo. Destaca el trabajo de Catalán-Quiroz, et al. (2019), el cual tiene la anterioridad más reciente de los trabajos identificados. Sin embargo, no existe suficiente información reciente sobre la construcción de viviendas de adobe cuyo diseño arquitectónico sea bajo cargas permanentes considerando un sistema de techumbre de madera y teja.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es realizar una simulación numérica basada en el método de elementos finitos de una vivienda de adobe con diseño arquitectónico que se construiría en Guerrero, México; de tal forma que se pueda predecir su comportamiento estructural bajo cargas permanentes generadas por el peso los materiales de esa región y con base en los resultados, demostrar si la vivienda resistiría las acciones solicitadas y si sería capaz de

brindar seguridad estructural a sus ocupantes. El trabajo numérico presentado en este estudio toma las propiedades mecánicas de Catalán-Quiroz, et al. (2019) en estado de Guerrero, México y considerando que la vivienda se sería construida en dicha región con la mano de obra de la misma.

Tabla 1: Propiedades mecánicas del adobe

Fuente/Autor	País	f^*m (MPa)		E (MPa)		f^*t (MPa)		c (MPa)	ϕ (°) –
Saroza et al., 2008	Cuba	1		-		-		-	-
Iriarte y Alberto, 2010	Perú	0.8		45.9		0.5	2	-	-
Moreno, 2011	México (D.F.)	0.25	1.6	25.77		-		-	-
Silveira et al., 2012	Portugal	1.32		225		0.17		-	-
Eslami et al., 2012	Australia-Irán	1.12		214		0.015		-	-
Feng et al., 2013	China	0.88	0.95	32	34	-		-	-
Arroyo et al., 2013	México (Guerrero)	0.58		210		0.15		-	-
Rodríguez-Díaz et al., 2014	Cuba	1.54		-		-		-	-
Mantilla Calderón et al., 2018	Perú (Cajamarca)	2.18		-		0.79		-	-
Chantaca de Jesús et al., 2021	México (Edo. de México)	0.37		-		-		-	-
Policarpo Catalán, 2013	México (D.F.)	1.21		236.24		0.05		-	-
R. Clifton y L. Davis, 1979	E.U.A (Washington, D.C)	2.15		-		0.23		-	-
F. Vicente y E. Torrealva, 2014	México (D.F)	0.36	0.76	48.4	106	-		0.04	34.38
Varum et al., 2015	Portugal	0.7	2.15	87	448	0.13	0.4	-	-
Catalán-Quiroz, et al., 2019	México (Guerrero)	1.2		236.2		0.052		-	-

2. METODOLOGÍA

Primeramente, se eligió un prototipo de vivienda de adobe expuesto por Aguiluz, et al. (2018) diferente a los comúnmente usados en simulaciones numéricas para evaluar su respuesta estructural, contemplando un diseño arquitectónico en la misma. Para caracterizar la mampostería de adobe se utilizó el trabajo de Catalán-Quiroz, et al. (2019) en el que se llevaron a cabo pruebas experimentales en piezas de adobe típicas construidas en Guerrero, México (Catalán-Quiroz, et al. 2019), teniendo pensado construir la vivienda con esos adobes artesanales de esa región. Es importante señalar que, los adobes fabricados para ese trabajo experimental fueron fabricados con mano de obra de Guerrero. Una vez definidas las piezas de adobe a utilizar y con ello las propiedades mecánicas elásticas e inelásticas del material a utilizar en el prototipo, se simuló el prototipo en el software ANSYS 2021 versión para estudiantes (Mechanical APDL 2021 R1), realizando un modelo de elementos finitos 3D para evaluar la respuesta estructural bajo cargas permanentes (peso propio de la vivienda) y obtener los mapas de esfuerzos desarrollados por dicha sollicitación. Estos resultados se compararon con las resistencias reportadas en este material, las cuales fueron utilizadas en el modelo, dadas en el trabajo de Catalán-Quiroz, et al. (2019), como se muestra en la sección 3.

2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE VIVIENDA

El diseño arquitectónico de la vivienda se obtuvo después de una amplia búsqueda en la literatura, se observó que generalmente en los artículos sobre investigación del adobe y del comportamiento estructural de éste, las viviendas se construían muy similares: carecen de una fachada estética, con dimensiones pequeñas, geometría sencilla y limitada, refuerzo con dinteles de madera en puertas y ventanas, así como los techos generalmente de teja.

La vivienda propuesta para ser modelada fue basada en el proyecto arquitectónico presentado por Aguiluz, et al. (2018), siendo diferente a las viviendas típicas regionales, de la cual se elaboró el modelo 3D muy aproximado a las dimensiones reales. En la Figura 1 se puede observar una comparación en 3D de la vivienda junto a una de geometría típica.

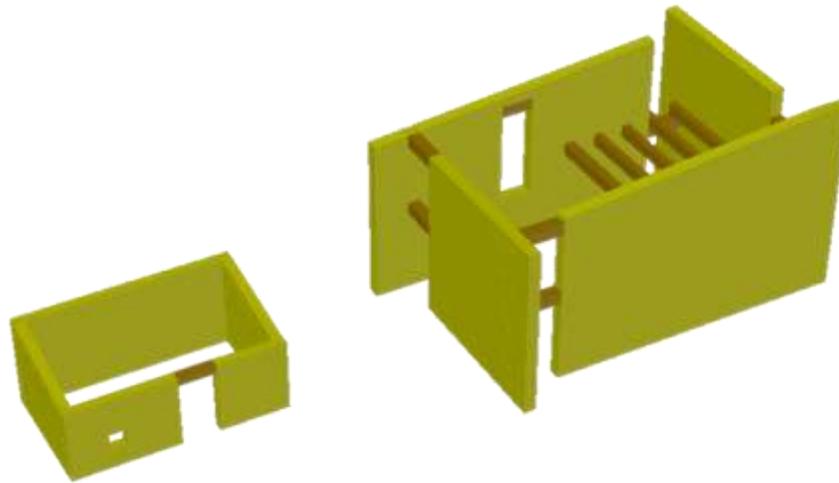


Figura 1: Comparación de viviendas de adobe, a) Vivienda típica y b) Vivienda propuesta para la simulación

La vivienda cuenta con una base de piedra braza como cimentación, la cual sobresale de la superficie del terreno; con esto se evitará el riesgo de humedad en los muros y en el sistema de piso. Las dimensiones en metros y plantas de la vivienda, así como las dimensiones de los bloques de adobe son mostrados en la Figura 2, proponiendo la elaboración de las piezas de adobe con los materiales comúnmente utilizados en Guerrero: tierra, paja y agua de acuerdo con el trabajo de Catalán-Quiroz, et al. (2019).

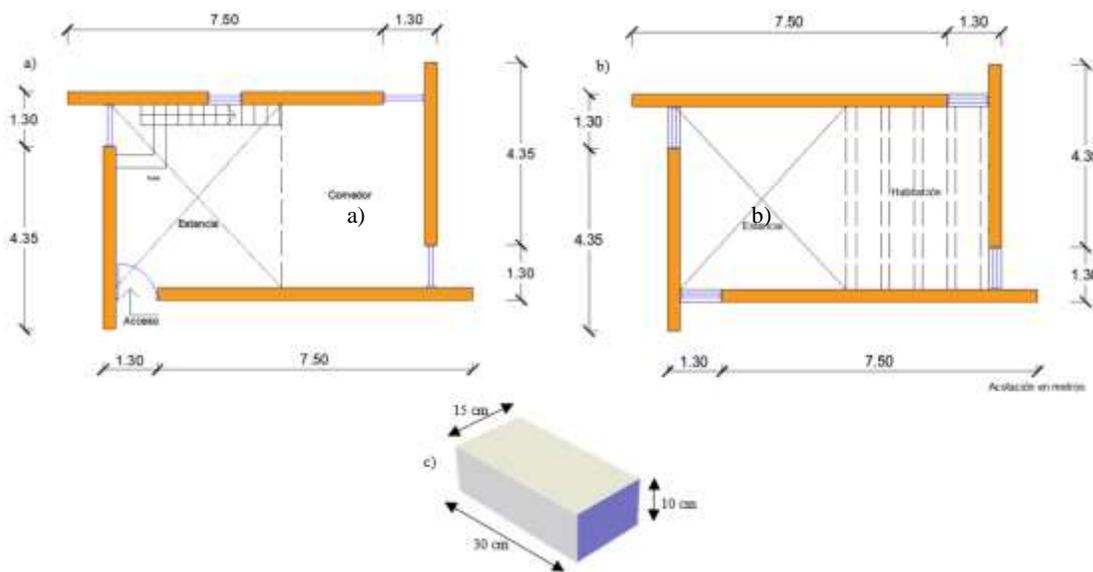


Figura 2: vivienda de adobe con diseño arquitectónico, a) Planta baja, b) Planta de entres piso y c) Dimensiones del bloque

Por otro lado, los muros con pendiente tienen alturas de 4.84 m a 4.18 m, y 4.95 m a 4.36 m, los dos restantes cuentan con alturas de 4.95 m y 4.25 m.

2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ADOBE

Se utilizaron las siguientes propiedades mecánicas elásticas e inelásticas para caracterizar el adobe: módulo de elasticidad ($E = 236.2$ MPa), resistencia a la compresión ($f^*m = 1.2$ MPa) y resistencia a la tensión por flexión ($f^*t = 0.052$ MPa); las cuales fueron obtenidas mediante pruebas de laboratorio de piezas elaboradas en Guerrero, México y estudiadas en laboratorios de la Universidad Nacional Autónoma de México y de la Universidad de Guanajuato (Catalán-Quiroz, et al. 2019). De acuerdo con ese estudio, los ensayos fueron adaptaciones de las normas pues no existe a la fecha una norma para obtener propiedades mecánicas de la mampostería de adobe a diferencia de la mampostería de tabique barro rojo recocido, mampostería comúnmente utilizada en edificaciones. Por ejemplo, en el caso de los ensayos de compresión, de acuerdo con Catalán-Quiroz, et al. (2019) se construyeron 9 pilas de mampostería de adobe sometidas a compresión, las propiedades geométricas y parámetros de ensaye se definieron tomando en cuenta los requisitos del anteproyecto de la norma mexicana: determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro y concreto (ONNCCE, 2005), obteniendo la resistencia a compresión axial (f^*m) y módulo de elasticidad (E) del adobe de dichos ensayos. Las pilas construidas tuvieron una relación de altura/espesor aproximadamente igual a 4, ensayadas a una velocidad de carga de 10 kN/min con 3 ciclos de precarga del orden del 15% de la carga máxima esperada, de esta manera se fijó una carga máxima 0.5 kN para los 3 ciclos de precarga y en el cuarto ciclo se llevó a la falla el espécimen.

Por otro lado, el peso volumétrico de la mampostería de adobe utilizado fue de $\gamma = 1.35E-05$ N/mm³. Asimismo, se definieron la cohesión ($c = 0.15$ MPa), el ángulo de dilatación ($\psi = 36.09^\circ$), el ángulo de fricción ($\phi = 39.09^\circ$), y la relación de Poisson ($\nu = 0.43$) de acuerdo con Pereda (2011).

2.3. MODELO NUMÉRICO

Una vez definido el prototipo de la vivienda a modelar (vivienda a escala natural) que considera un diseño arquitectónico, tal como se muestra en la figura 3. Con el prototipo diseñado, se realizó una simulación numérica basada en el método de elementos finitos. La simulación es útil para representar el sistema físico, expresado matemáticamente, es decir, simular la realidad, lo que facilitó evaluar el comportamiento estructural de la vivienda de adobe tras aplicar las presiones en los muros y largueros generados por las cargas permanentes de los elementos que componen la techumbre de la misma.

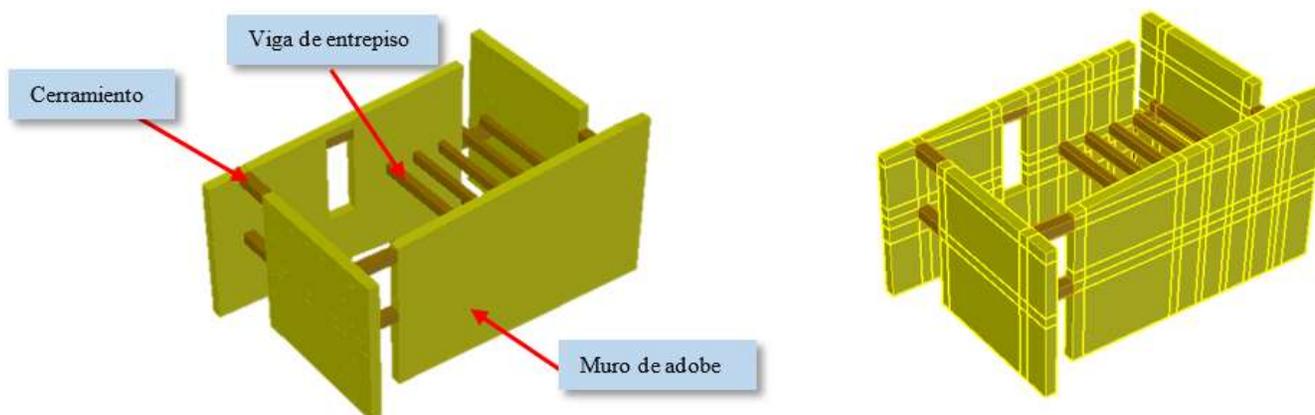


Figura 3: Modelo en 3D y de sólidos

Primero se elaboró un modelo en 3D en el programa AutoCAD 2019, versión estudiantil, extrayendo la geometría de la vivienda en varios sólidos asegurando la continuidad entre sus nodos, como se puede apreciar en la Figura 3, con el fin de exportarlo al software de análisis utilizado y generar la malla de elementos finitos.

El software utilizado para elaborar el modelo numérico es el ANSYS 2021 versión para estudiantes (Mechanical APDL 2021 R1), modelo basado en el método de elementos finitos.

Para modelar las piezas de adobe se utilizó un elemento isoparamétrico que permite modelar materiales cuasi-frágiles presentando este elemento tres grados de libertad por nodo, conocido como SOLID65, el aspecto más importante de éste es la habilidad de incluir diferentes propiedades no-lineales del material. El elemento SOLID65 tiene la capacidad de agrietarse en tensión y aplastarse en compresión (William y Warnke, 1975), así como considerar deformaciones plásticas del material con el criterio de fluencia de Drucker Prager. El elemento permite integrar propiedades mecánicas elásticas e inelásticas en materiales cuasi-frágiles.

El propósito de utilizar el elemento SOLID65 obedece a que existen diversas publicaciones tanto de estructuras de concreto, mampostería de tabique, mampostería histórica, entre otras; donde se ha utilizado este elemento Solid65, obviamente considerando las propiedades mecánicas elásticas e inelásticas correspondientes a cada material, a pesar de que estos materiales son estrictamente anisotrópicos la hipótesis de reducir su matriz constitutiva para considerar isotropía en el material es válida, siendo calibrados con ensayos experimentales, como se puede observar en diversas estudios (Chávez y Meli 2012; Galván, et al. 2019).

Como se mencionó, se requiere incorporar hipótesis y leyes constitutivas en el programa, de forma que se introdujeron comandos capaces de involucrar las propiedades mecánicas del adobe para el modelo numérico.

El modelo realizado consta de 219 sólidos, para la malla de elementos finitos se optó por manejar un tamaño de elemento de 100 mm de longitud con el fin de no tener problemas de esbeltez en los elementos y lograr resultados confiables. Lo anterior arrojó una cantidad de 37,302 elementos finitos como se observa en la Figura 4.

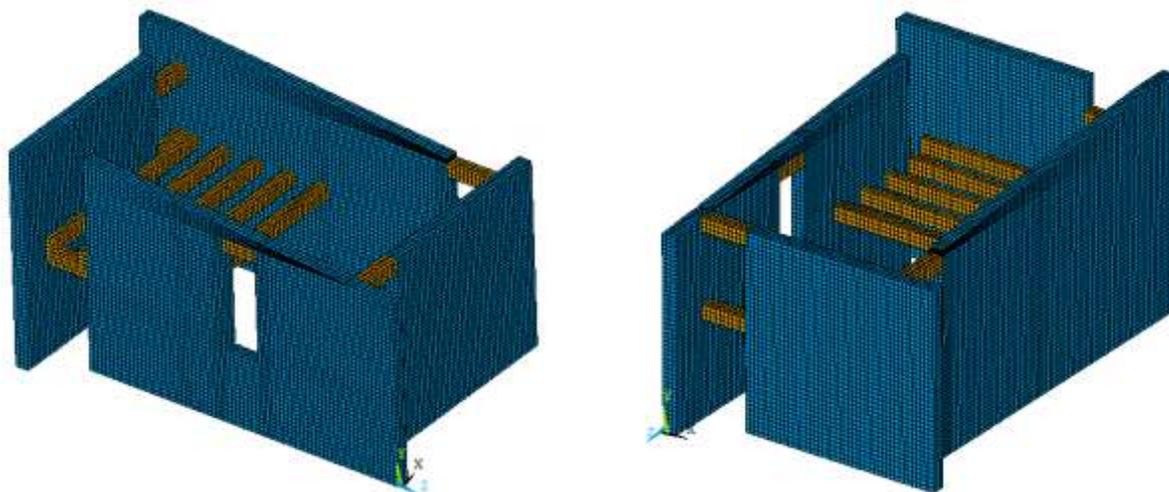


Figura 4: Modelo de elementos finitos de la vivienda

Por otro lado, las solicitaciones de carga aplicadas en el modelo numérico consideran solamente las cargas permanentes. La techumbre de la vivienda se modeló con las presiones correspondientes al área tributaria para cada muro de adobe, siendo ésta de madera y teja, dejando pendiente en las partes necesarias de la edificación sobre las que se coloca la techumbre.

Siguiendo el mismo criterio, se simuló el entrepiso con una viga madrina y cuatro largueros de madera, sometidos a presiones de acuerdo con el área tributaria; también se incluyeron los cerramientos de puertas y ventanas igualmente de madera.

Las presiones consideradas para los muros, viga y largueros se muestran en la Figura 5, así como las condiciones de frontera. La techumbre considera 4 traves principales a cada 90cm, la cual fue representada mediante presiones sobre la parte superior de los muros, como se puede observar en esa misma figura con diferentes colores que van desde azul hasta rojo para indicar su intensidad. Mientras que las cargas ejercidas por el peso de los muros y los largueros se calculan directamente en el programa al colocar el peso volumétrico del material.

También se pueden observar las condiciones de frontera que se encuentran en la parte inferior del modelo computacional de color cian en esta misma figura, que representan la cimentación de la vivienda en forma de apoyos fijos que restringen todos los grados de libertad, es decir, se restringen desplazamientos lineales y angulares.

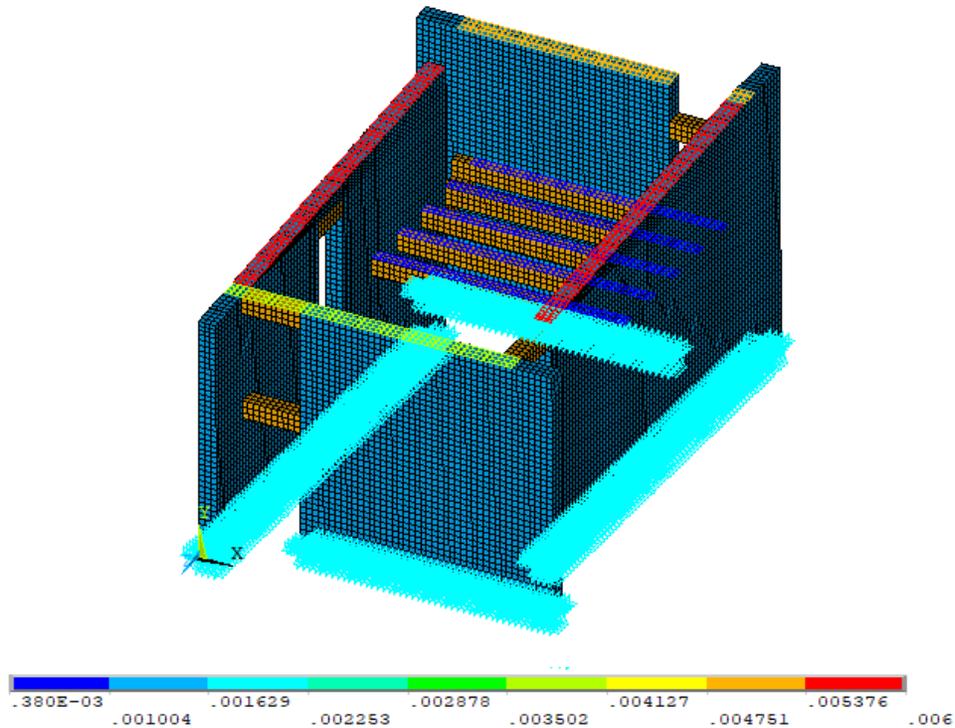


Figura 5: Modelo numérico, condiciones de frontera y presiones, unidades en MPa

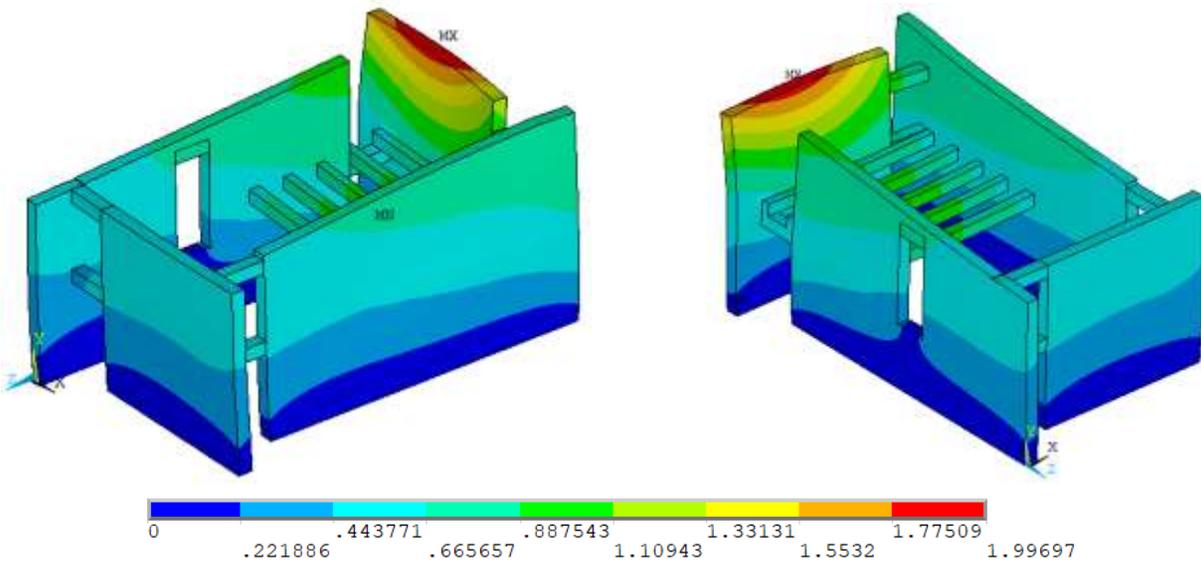


Figura 6: Mapa de suma de desplazamientos totales, unidades en mm

3. RESULTADOS

Los resultados del modelo numérico bajo cargas permanentes son mostrados en esta sección mediante mapas de esfuerzos en la dirección vertical (dirección Y), y mapa de suma de los desplazamientos totales, en unidades del sistema internacional (MPa y mm respectivamente).

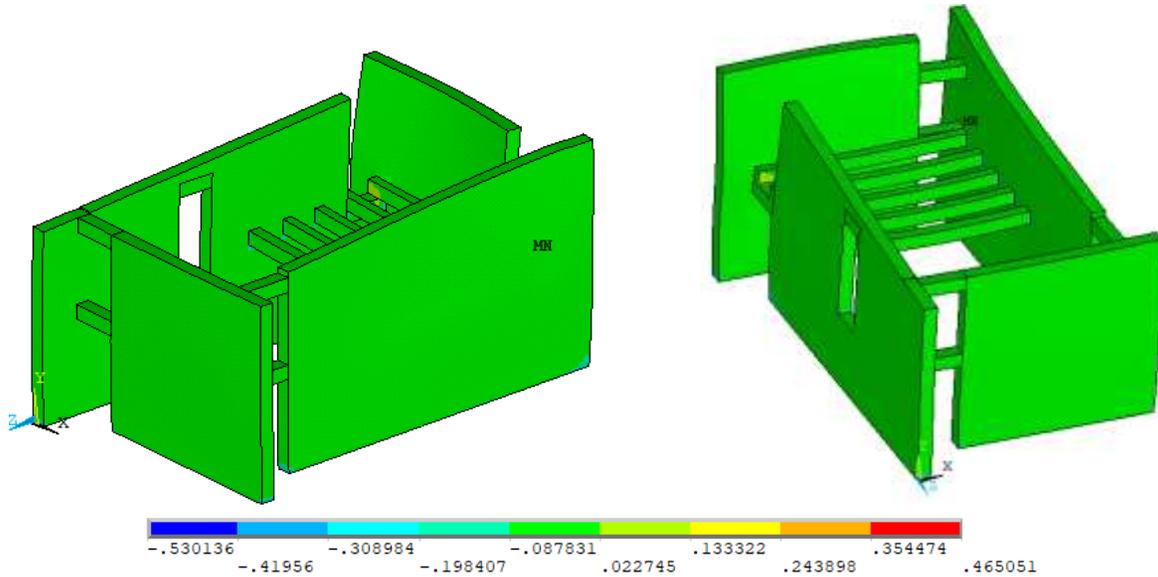


Figura 7: Mapa de esfuerzos en dirección Y (material adobe y madera), unidades en MPa

Además, en la Tabla 2 se realizó una comparación entre las resistencias del adobe y los esfuerzos alcanzados en el modelo numérico; es decir, entre la resistencia a la compresión y a la tensión por flexión, y los esfuerzos máximos de compresión y tensión que se desarrollaron en la simulación, con lo que posteriormente se obtuvo la capacidad de resistencia desarrollada por el material de adobe.

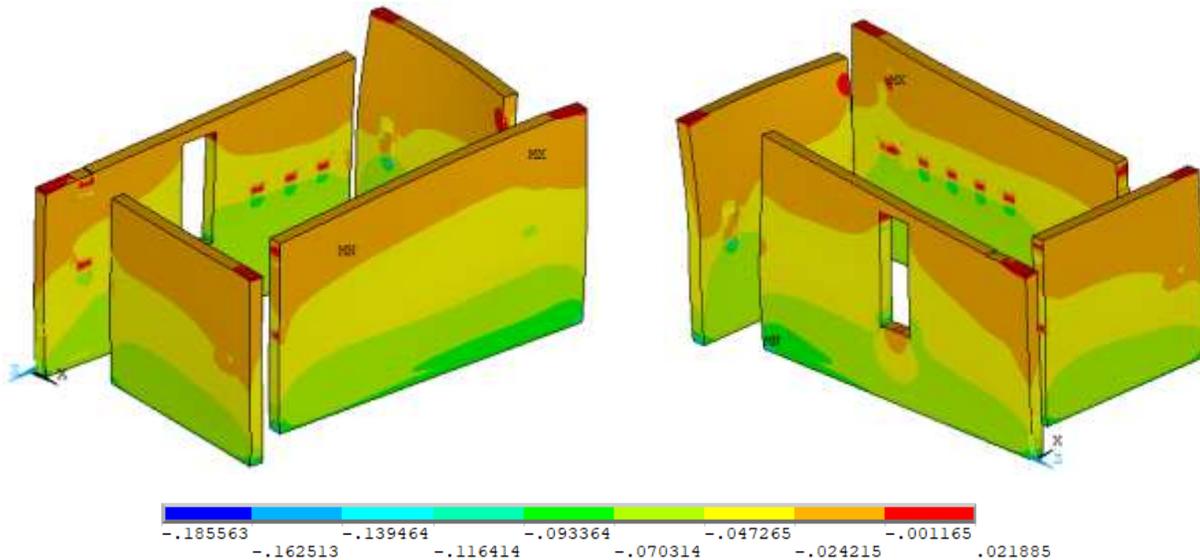


Figura 8: Mapa de esfuerzos en dirección Y exclusivamente en el material adobe, unidades en MPa

Se puede apreciar en la Figura 6 que los puntos de mayor desplazamiento ocurren en la parte superior del muro transversal derecho, con un valor de 1.99 mm; por el contrario, en la parte inferior de la vivienda no ocurren desplazamientos debido a la consideración de la restricción dada por la cimentación.

En cuanto a los mapas de esfuerzos, los valores con signo negativo denotan esfuerzos a compresión y positivos a tensión. Se puede observar en la Figura 7 que la distribución se reparte mayormente de color verde entre esfuerzos a compresión de 0.087 MPa y a tensión de 0.022 MPa aproximadamente, esto, debido a que al mostrar el mapa de esfuerzos tomando en cuenta ambos materiales (adobe y madera) no se distingue a detalle los esfuerzos en el adobe, es por eso que en la Figura 8 se puede observar la respuesta únicamente del adobe.

En la Figura 8, referente a los mapas de esfuerzos en dirección Y (esfuerzos verticales) producidos en los elementos de adobe, es posible apreciar que el esfuerzo va desde -0.1856 MPa, marcado de color azul, (esfuerzo a compresión) a 0.0219 MPa, marcado de color rojo, (esfuerzo a tensión). Cada uno de estos esfuerzos de trabajo se comparó con su respectiva resistencia del material: resistencia a la compresión $f^*m = 1.2$ MPa y resistencia a la tensión $f^*t = 0.052$ MPa; datos dados en la sección 2.2, valores obtenidos de los ensayos de laboratorio de Catalán-Quiroz, et al. (2019).

Se distingue en la Figura 8 que el esfuerzo de compresión máximo ocurre en la esquina inferior derecha del muro longitudinal trasero, y el máximo a tensión se presenta en el muro longitudinal frontal, en la unión del cerramiento.

Finalmente, como se pudo observar en la Tabla 2, se obtuvo la capacidad de resistencia desarrollada por el material de adobe como una relación de esfuerzos, es decir, dividiendo el esfuerzo máximo generado en el modelo entre la resistencia del material, tanto para compresión como para tensión.

Tabla 2. Resistencias y esfuerzos máximos del material

Parámetro	Resistencia del material (MPa)	Esfuerzos máximos generados en el modelo (MPa)	Relación de esfuerzos (%)
compresión	1.2	0.1856	15%
tensión	0.052	0.0219	42%

4. DISCUSIÓN

Los requerimientos de vivienda, además de proporcionar seguridad estructural, comodidad y estética contemplan en la actualidad la incorporación de un diseño sustentable. Para lograr esto se utilizan materiales ecológicos, razón por la cual se siembra la duda sobre si estos cumplen con la seguridad estructural que se debe brindar a los ocupantes, incluso para cargas permanentes. Además, al realizar viviendas no convencionales, es decir con diseño arquitectónico contemplando diferentes geometrías a las tradicionalmente presentadas con mampostería de adobe, el cual es considerado como material vulnerable, la incertidumbre es mayor. Por esta razón, en el presente trabajo se ha empleado como herramienta la simulación numérica basada en el Método de Elementos Finitos de una vivienda no convencional de adobe bajo cargas permanentes para demostrar que los esfuerzos generados con esta sollicitación son menores que las resistencias de la mampostería de adobe típica elaborada en el estado de Guerrero y por lo tanto se puede construir la vivienda arquitectónica presentada usando este material ecológico con la mano de obra de ese lugar. Claramente, el modelo numérico indica que las resistencias tanto a compresión como a tensión de las piezas de adobe no son alcanzadas, por lo que la vivienda no se aplastará ni se agrietará bajo su peso propio y puede ser construida con este material.

Los resultados tanto en desplazamientos como esfuerzos son presentados mediante mapas los cuales presentan un comportamiento lógico debido a las cargas gravitacionales aplicadas. Alcanzando el valor mayor de desplazamiento de aproximadamente 2 mm en la parte superior del muro transversal derecho debido a la conexión de éste mediante los largueros hacia los muros longitudinales. Asimismo, el esfuerzo máximo de tensión se presenta en el muro

longitudinal frontal, en la unión del cerramiento y el esfuerzo de compresión máximo ocurre en la esquina inferior derecha del muro longitudinal trasero.

La simulación numérica 3D de la vivienda, bajo cargas permanentes, basada en el método de elementos finitos ayuda a predecir su respuesta estructural y a demostrar que tomando en cuenta geometrías menos tradicionales para viviendas construidas con este material en Guerrero, éstas no sufren daño por peso propio. Como recomendación para el análisis bajo fuerzas gravitacionales, si bien en este trabajo se considera un comportamiento inelástico para la mampostería de adobe, al observar los resultados es posible definir la respuesta considerando un comportamiento del material elástico-lineal, reduciendo el esfuerzo computacional del modelo numérico, teniendo modelos más “sencillos” y arrojando resultados confiables.

5. CONCLUSIONES Y ESTUDIOS A FUTURO

De acuerdo con los resultados numéricos obtenidos de la vivienda en estudio, los esfuerzos máximos desarrollados son aproximadamente el 15% de su resistencia a compresión y el 42% de su resistencia a tensión lo que significa que no sufren los muros de adobe aplastamiento ni agrietamiento bajo esta condición de carga, brindando una seguridad estructural por peso propio al considerar esta geometría de vivienda diferente a la que usualmente se utiliza en viviendas de adobe tradicionales de México, es decir, su respuesta estuvo lejos de sufrir daño, considerando las propiedades mecánicas reportadas en anteriores trabajos en Guerrero, México. Lo que lleva a considerar que se pueda implementar un sistema de techo con otros materiales de características más resistentes. Por ejemplo, un sistema de losa maciza de concreto, provocando una mejor conectividad entre los muros, y así mejorar la rigidez de la vivienda, e incluso brindar una mayor protección ante efectos de intemperie.

Las viviendas de adobe son estructuras muy vulnerables debido a las “bajas” resistencias que posee este material, lo cual añade importancia al presente trabajo tras haber analizado el comportamiento estructural exclusivamente bajo cargas permanentes, resta por realizar ahora el estudio, pero considerando diferentes combinaciones de carga que incluyan además de cargas permanentes, cargas variables y cargas accidentales.

Dentro de las dificultades y limitaciones a lo largo de la metodología, se encontró que el comportamiento del adobe es más complejo de estudiar que el de otros materiales en la construcción, como el concreto, acero, madera, etc., debido principalmente a la falta de normativas y regulaciones en el país para el uso de mampostería de adobe. Precisamente, dicha limitación ha sido de especial interés para numerosos investigadores en obtener las propiedades mecánicas, mayormente porque no existe un control en la elaboración de piezas de adobe en función de la región.

Definitivamente queda mucho camino por recorrer en la investigación del adobe, ya que actualmente se sigue construyendo viviendas con este material sin tomar en cuenta recomendaciones en el proceso constructivo que brinden seguridad al ocupante, y fomentar el uso de materiales amigables al medio ambiente.

6. AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad de Guanajuato Campus Celaya- Salvatierra, Programa Educativo de la Licenciatura en Ingeniería Civil.

7. REFERENCIAS

- Aguiluz León, J., Ramírez Rodríguez, M., & Gutiérrez Martínez, R. (2018). “Vivienda para autoconstrucción. Uso de bloques de tierra comprimida”. Universidad Autónoma del Estado de México.
<http://hdl.handle.net/20.500.11799/98638>
- ANSYS Inc. (2021). Release 18.1 Mechanical APDL Documentation. (*student version*).
- Arroyo, R., Sánchez, S., & Catalán, P. (2013). “Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México”. *Ingeniería Revista Académica*, Vol. 17, No. 3, pp. 167-177.
- Autocad 22.0. (2019). Autodesk, Inc. (*student version*).

- 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.
- Catalán Quiroz, P., Moreno-Martínez, J. Y., Galván, A., & Arroyo Matus, R. (2019). “Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe”. *Acta Universitaria*, Vol. 29. <http://doi.org/10.15174/au.2019.1861>
- Catalán-Quiroz, P., Moreno-Martínez, J. Y., Galván, A., & Arroyo-Matus, R. (2020). “Shaking table tests on strengthened adobe dwellings typical of Mexico”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, Vol. 173, No. 10, pp. 761-779.
- Chantaca de Jesús, E. (2021). “Mejoramiento integral del sistema constructivo de adobe de viviendas rurales afectadas por los sismos del 2017 en Ecatingo, Estado de México”. (Tesis de Maestría) Universidad Autónoma de México.
- Chávez, M. & Meli, R. (2012). “Shaking table testing and numerical simulation of the seismic response of a typical Mexican colonial temple”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol 41, pp. 233-253.
- Clifton, J. R., & Davis, F. L. (1979). “Mechanical Properties of Adobe”. National Bureau of Standards Technical Note 996.
- Corrêa, A.A.R., Teixeira V.H., Lopes S.P. & Oliveira M.S. (2006). “Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do adobe (tijolo de terra crua)”. In: *Ciência e Agrotecnologia* Vol. 3. No. 3. Lavras: Editora da UFLA; 2006. pp. 503–15.
- Corrêa, A.A.R., Mendes, L.M., Barbosa, N.P., De Paula Protásio, T., De Aguiar Campos, N. & Tonoli, G.H.D. (2015). “Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobes”. *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 250-256.
- Eslami, A., Ronagh, H., Mahini, S., & Morshed, R. (2012). “Experimental investigation and nonlinear FE analysis of historical masonry buildings - A case study”. *Construction and Buildings Materials*, Vol. 35, pp. 251-260.
- Feng, W., Gang, L., Hong-Nan, L., & Jin-Qing, J. (2013). “Strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry”. *Materials and Structures*, Vol. 46, pp. 1449-1457.
- Galván, A., Peña, F. & Moreno, J. (2017). “Effect of TBM advance in the structural response of segmental tunnel lining”. *Int. J. Geomech.*, Vol. 17, No. 9, 04017056.
- Iriarte, G., & 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.
- Macabuag, J., Guragain, R. & Bhattacharya S (2012). “Seismic retrofitting of non-engineered masonry in rural Nepal”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, Vol. 165, No. 6, pp. 273–286.
- Mantilla Calderón, J. C., & Mosqueira Moreno, M. Á. (2018). “Variación de las propiedades físico mecánicas del adobe al incorporar viruta y caucho”. (Tesis de licenciatura) Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Moreno Bajasas, J. A., & Martínez Vásquez, J. 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 de la Universidad del Ejército y Fuerza Aérea, México.
- Moreno-Martínez, J. Y., Galván-Chávez, A., Catalán-Quiroz, P., & Gutierrez-Villalobos, J. M. (2017). “Análisis estructural por peso propio de una vivienda de adobe típica mediante modelos de elementos finitos”. *Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable*, Vol. 3, No. 8, pp. 17-22.

- Pereda, J. F. (2011). “Comportamiento de muros de mampostería confinada con distintas configuraciones”. México, CDMX, Instituto de Ingeniería.
- Rodríguez-Díaz, M., Saroza-Horta, B., Ruíz-Sánchez, P., Barroso-Valdés, I., Ariznavarreta-Fernández, F., & González-Coto, F. (2014). *Dyna*, Vol.81, pp. 145-152.
- Saroza, B., Rodríguez, M., Menéndez, J., & 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, pp. 41-47.
- Serrano, M., Blondet, M., Rubiños, A., & Mattsson, E. (2016a). “Sustainable dissemination of earthquake resistant construction in the Peruvian Andes”. *Sustainability: Science, Practice, & Policy* Vol. 12, No.1, pp. 22–33.
- Serrano, S., Barreneche, C., & Cabeza L.F. (2016b). “Use of by-products as additives in adobe bricks: mechanical properties characterisation”. *Construction and Building Materials* Vol. 108, pp. 105–111.
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., & Almeida, J. (2012). “Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions”. *Construction and Building Materials*, Vol. 28, pp. 36-44.
- Varum, H., Tarque, N., Silveira, D. et al. (2013). “*Structural behavior and retrofitting of adobe masonry buildings*”. In *Structural Rehabilitation of Old Buildings. Building Pathology and Rehabilitation* (Costa A, Guedes JM and Varum H (eds)). Springer, Berlin, Germany, Vol. 2, pp. 37–75.
- Varum, H., Costa, A., Fonseca, J., & Furtado, A. (2015). “Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction”. *Procedia Engineering*, pp. 714-721.
- Vicente, E. F., & Torrealva, D. E. (2014). “Mechanical properties of adobe masonry of historical buildings in Peru”. *International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*.
- William, K. J., & Warnke, E. D. (1975). “Constitutive model for the Triaxial Behavior of Concrete”. *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*, 19(174).