



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIVIENDA CONSTRUÍDA CON SISTEMA
MODULAR DE PLACAS PORTANTES ANTE CARGA SÍSMICA IMPULSIVA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero e Ingeniera Civil

AUTORES: José Fernando Fonseca Bautista
 Andrea Liset Chuchuca Sumba
TUTOR: Carlos Alexis Ayala Moya

Quito - Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, José Fernando Fonseca Bautista con documento de identificación N° 1726601915 y Andrea Liset Chuchuca Sumba con documento de identificación N° 1722759907; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 11 de agosto del 2023

Atentamente,



José Fernando Fonseca Bautista
1726601915



Andrea Liset Chuchuca Sumba
1722759907

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, José Fernando Fonseca Bautista con documento de identificación N° 1726601915 y Andrea Liset Chuchuca Sumba con documento de identificación N° 1722759907; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Análisis del comportamiento de una Vivienda construida con Sistema modular de Placas portantes ante Carga Sísmica impulsiva”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de agosto del 2023

Atentamente,



José Fernando Fonseca Bautista

1726601915



Andrea Liset Chuchuca Sumba

1722759907

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Alexis Ayala Moya con documento de identificación N° 1712968971, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIVIENDA CONSTRUIDA CON SISTEMA MODULAR DE PLACAS PORTANTES ANTE CARGA SÍSMICA IMPULSIVA**, realizado por José Fernando Fonseca Bautista con documento de identificación N° 1726601915 y por Andrea Liset Chuchuca Sumba con documento de identificación N° 1722759907, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de agosto del 2023

Atentamente,



Ing. Carlos Alexis Ayala Moya, MSc.

1712968971

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIVIENDA CONSTRUÍDA CON SISTEMA MODULAR DE PLACAS PORTANTES ANTE CARGA SÍSMICA IMPULSIVA

ANALYSIS OF A BEHAVIOR OF A HOUSE BUILT WITH A MODULAR SYSTEM OF BEARING PLATES BEFORE IMPULSIVE SEISMIC LOAD

Andrea Chuchuca-Sumba¹, José Fonseca-Bautista^{2,3} Carlos Ayala-Moya

Resumen

El presente artículo académico muestra una propuesta constructiva con una configuración estructural que consiste en un sistema auto portante que es relativamente liviano al compararlo con las construcciones convencionales de hormigón armado y que será analizado bajo distintos parámetros, como el ensayo en el cual se verifica la capacidad a carga vertical de la estructura, mismo que está descrito en la ACI 318-19. Este ensayo consiste en aplicar cargas en las áreas de la cubierta que se espera sean las más cargadas. Además, se someterá al ensayo de carga lateral en el que la estructura debe resistir total o parcialmente en el rango elástico y disipar suficiente energía por deformación o por rozamiento, para la demanda del sismo de diseño expresada por la componente horizontal de la masa de la vivienda por una aceleración proporcionada.

El análisis de los resultados de los ensayos realizados en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional CIV, determinará si el sistema constructivo de paneles portantes cumple con los parámetros sismo resistentes mencionados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción vigente.

Palabras Clave: carga vertical, carga lateral, deflexiones, deformación inelástica, rigidez.

Abstract

This academic paper shows a construction proposal with a structural configuration consisting of a self-supporting system that is relatively light when compared to conventional reinforced concrete constructions and that will be analyzed under different parameters, such as the test in which the vertical load capacity of the structure is verified, which is described in ACI 318-19. This test consists of applying loads in the areas of the deck that are expected to be the most loaded. In addition, it will be subjected to the lateral load test in which the structure must resist totally or partially in the elastic range and dissipate sufficient energy by inelastic deformation or by friction, for the design earthquake demand expressed by the horizontal component of the self-weight and by a proportionate acceleration.

The analysis of the results of the tests carried out at the Housing Research Center of the National Polytechnic School will determine if the construction system of load bearing panels complies with the seismic resistant parameters mentioned in the Ecuadorian Construction Standard in force.

Keywords: vertical load, lateral load, deflections, inelastic deformation, stiffness.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

³ Docente de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: jfonsecab1@est.ups.edu.ec, achuchucas@est.ups.edu.ec, cavalam@ups.edu.ec

1. Introducción

Debido al gran número de edificaciones que han sido construidas con materiales no adecuados o que no cumplen con las exigencias de las normas para la construcción, se ha considerado la necesidad de plantear opciones que puedan cumplir con los requerimientos de la normativa ecuatoriana de la construcción (NEC). Una de estas opciones consiste en una vivienda construida en base al sistema modular de placas y, para garantizar su adecuado comportamiento sismorresistente se han realizado diferentes ensayos en el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional.

El sistema está conformado por paneles de hormigón prefabricados ubicados dentro de perfiles que cumplen la función de paredes, una cubierta a dos aguas conformada por planchas de eternit, vigas metálicas tipo C.

Se realizaron ensayos previos a los que se analiza actualmente. Uno de ellos inicia en el año 2003 utilizando el código ecuatoriano de la construcción del año 2001 (CEC 2001), que consistía en una vivienda de un piso conformada por placas de hormigón que se encontraban entre perfiles de lámina galvanizada. La vivienda ocupaba un área de 42 m². Sobre las paredes se encontraban apoyadas unas vigas de madera que sostenían la cubierta a dos aguas de la vivienda. El sistema fue ensayado mediante la inclinación de la plataforma sobre la cual estaba construida la vivienda, con un ángulo de 13°. Dicha plataforma únicamente tenía la función de inclinarse, mas no de deslizarse. La carga lateral era un porcentaje de la componente horizontal del peso de la estructura que en este caso fue de 0.22.

En el año 2016, se realizó un ensayo para un sistema de 2 pisos. La vivienda estaba constituida de forma diferente en el primer y segundo piso. El primer piso estaba construido con estructura metálica y el segundo piso, estaba conformado de la misma manera que el sistema empleado en el año 2003, cambiando únicamente las vigas de madera, por vigas metálicas. Al aplicar los ensayos referentes a las propiedades mecánicas y físicas de los materiales empleados en la construcción de la vivienda y la respuesta frente a la aplicación de

carga vertical, se analizó y evaluó la propuesta de este sistema constructivo, a través del proyecto técnico experimental.

Los sistemas constructivos deben cumplir con diferentes solicitaciones ante carga lateral y vertical. En caso de tratarse de una construcción no convencional, se requiere un informe técnico del desempeño del sistema constructivo emitido por el CIV como se indica en el numeral 2.3 “Requisitos de diseño” de la NEC_SE_VIVIVENDA.

En noviembre del 2022 y febrero del 2023, con la actualización de la normativa ecuatoriana de la construcción (NEC 2015), se realizaron nuevos ensayos de una vivienda de un piso, mismos que consistían en: ensayo de las placas (compresión y tensión diagonal), ensayo estático aplicando carga vertical en la cubierta, ensayo de inclinación de la vivienda y el dinámico que consiste en generar el movimiento de la vivienda con la aplicación de una aceleración externa, produciendo una aceleración máxima al impactarse con los neumáticos que se encuentran junto al muro de reacción. La casa se encuentra anclada a una plataforma, misma que funciona como losa de cimentación, mediante perfiles U y bajo la cual hay unas ruedas que deslizan en unos rieles debidamente engrasados para facilitar el ensayo dinámico.

En cuanto al ensayo de inclinación, se puede observar los ángulos, componente horizontal del peso obtenido y el coeficiente sísmico para cada uno de ellos, en la tabla 1.

Tabla 1. Componente del peso al inclinar la vivienda.

Ángulo de Inclinación °	Componente horizontal Del Peso (KN)	Coefficiente sísmico
0	0	0
2.5	2.68	0.04
5	5.36	0.09
7.5	8.03	0.13
10	10.69	0.17
12.5	13.32	0.22
15	15.93	0.26
17.5	18.51	0.30
20	21.05	0.34
22.5	23.55	0.38
25	26.01	0.42

En este ensayo se proporcionó la carga lateral de 26.01 KN que corresponden a un coeficiente sísmico de 0.42. No se presentó ninguna afectación

en la estructura y el desplazamiento medido por el transductor (LVDT) fue de 0.018m y la deriva inelástica resultante fue $\Delta M=0.00525$ que es menor a la establecida por la NEC ($\Delta M=0.01$).

Para el presente artículo, se comparará los resultados de los desplazamientos obtenidos mediante el ensayo dinámico a carga lateral, los de un modelo computacional y un análisis numérico en Matlab. Para este efecto a través del método de Newmark, se determinará un coeficiente de rigidez para toda la estructura, empleando como dimensión del ancho efectivo, el proporcionado mediante el cálculo basado en el modelo de celosía planteado por Panagiotou. El ensayo se aplicó al prototipo que se observa en la figura 1.



Figura 1. Ensayo dinámico a carga lateral

2. Metodología

2.1. Descripción del Sistema Estructural

La edificación está conformada por placas prefabricadas de hormigón simple de 3cm de espesor, unidos por perfiles de galvalume de varias geometrías, y con una cubierta de eternit a dos aguas. Los perfiles de galvalume empleados se observan en la figura 2.

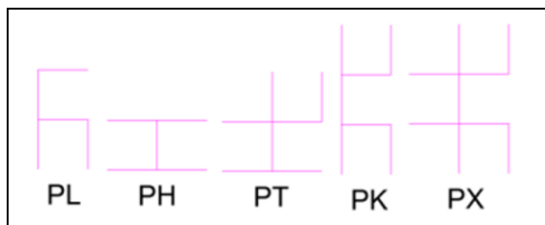


Figura 2. Perfiles empleados en la estructura

2.1.1. Distribución Arquitectónica

El proceso de montaje de la casa tarda de 3 a 5 días. La vivienda consta de dos dormitorios, un porche, una cocina, un baño, sala y comedor con un área total de 41,36 m², como se observa en la figura 3.

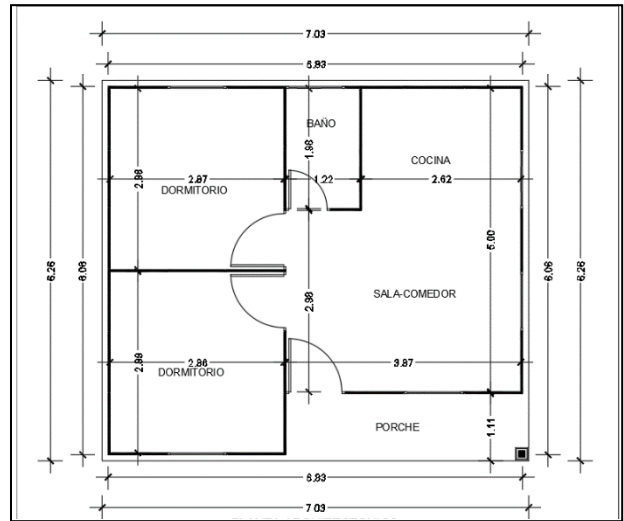


Figura 3. Plano arquitectónico

2.1.2 Paneles

Las propiedades se observan en la tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones de paneles de concreto

Tipo	No (u)	a (m)	b (m)	Espesor (m)	Peso (KN)
A97	53	0.97	0.97	0.03	38.28
A48	22	0.97	0.48	0.03	6.63
A36	12	0.97	0.36	0.03	2.71
A72	13	0.97	0.72	0.03	5.88
A61	3	0.97	0.61	0.03	1.15
A24	2	0.97	0.24	0.03	0.3
A49	1	0.49	0.24	0.03	0.08
C72	12	0.60	0.97	0.03	4.52
C48	3	0.36	0.97	0.03	0.68

2.2. Descripción de ensayos

2.2.1. Ensayos de placas

Es necesario analizar la resistencia de las placas de hormigón simple que forman la base del sistema estructural de la vivienda para saber el

$f'c$ que emplearemos. Para este efecto se realizaron los siguientes ensayos con las placas:

1) Ensayo a compresión de placas: Para este ensayo se emplean 4 transductores de desplazamiento (LVDT), dos para medir la deformación longitudinal del panel, y dos para medir la deflexión a media altura del panel.

El ensayo consiste en fijar el panel en los perfiles y colocarlo en la máquina de compresión, se aplica una carga de forma incremental aumentándola progresivamente. Seguidamente se registra la deformación longitudinal y la deflexión transversal y se observa el modo de falla de la placa y los daños locales. Para este ensayo se aplicó la norma ASTM E72-15.

Los resultados de las 4 placas ensayadas se observan en la figura 4.

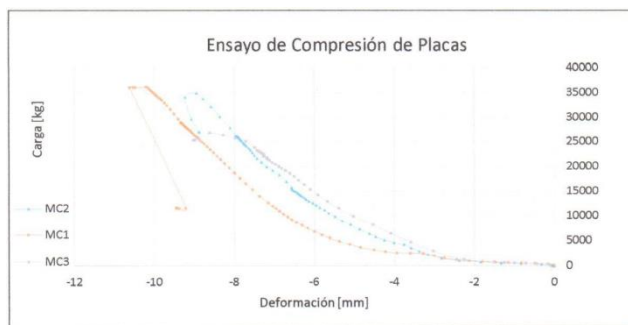


Figura 4. Carga vs Deformación del ensayo a compresión

2) Ensayo a tensión diagonal de placas: En este caso se emplean 4 transductores (LVDT), dos para medir el desplazamiento vertical de la placa de carga, uno para medir la deformación del panel y el último para medir la deformación transversal del panel.

El proceso consiste en aplicar una carga de forma incremental, registrando las deformaciones en cada ciclo de carga, obteniendo como resultado la gráfica que se observa en la figura 5.



Figura 5. Carga vs Deformación del ensayo tensión diagonal

2.2.2. Ensayo a carga vertical

Para este ensayo se empleó el procedimiento establecido por el ACI-318-19 en su numeral 20.3 y 20.4 para prueba de carga. La carga se aplicó utilizando sacos de 0.25KN y 0.3KN, colocados en forma ordenada sobre la cubierta.

Con el objetivo de evaluar la integridad de la estructura, se llegó a una carga de ensayo de 1.054KN/m², que es superior a la establecida para cubierta inclinada tipo teja.

A continuación, se realizó la aplicación de cargas con sus respectivas lecturas tanto en LVDTs como en deformímetros. A las 24h transcurridas se procedió a realizar la descarga y a registrar las lecturas.

La combinación de carga a emplearse en este ensayo es:

$$\text{intensidad de carga} = 0.85(1.4D + 1.7L)$$

Debido a que la carga muerta es parte de la estructura, se resta el mismo valor y la carga a ser aplicada es:

$$\text{Carga de ensayo} = 0.85(1.4D + 1.7L) - D$$

Donde:

D: Carga muerta (0.2KN/m²)

L: Carga viva (0.7KN/m²)

La instrumentación empleada en el ensayo de carga vertical consistió en cuatro deformímetros análogos y cuatro transductores de desplazamiento (LVDTs) que tuvieron las funciones:

D1: mide el desplazamiento vertical absoluto de la viga de cubierta en el centro de la luz del eje 5 entre los ejes B hasta D.

D2: mide el desplazamiento vertical absoluto de la viga de cubierta en el centro de la luz, entre los ejes 3 y 4, y los ejes B y D.

D3: mide el desplazamiento vertical absoluto de la viga de cubierta en el centro de la luz, en el eje 3, entre los ejes B y D.

D4: mide el desplazamiento horizontal por pandeo en la columna de acero del eje B3.

LVDT 1: mide el desplazamiento vertical absoluto de la viga de cubierta en el centro de luz del eje 5 entre ejes B hasta D.

LVDT 2: mide el desplazamiento vertical absoluto de la viga de cubierta en el centro de luz entre los ejes 3y 4, y los ejes B y D.

LVDT 3: mide el desplazamiento vertical absoluto de la viga de cubierta en el centro de luz, en el eje 3, entre los ejes B y D.

LVDT 4: mide el desplazamiento vertical absoluto de la viga de cubierta en el apoyo ubicado en el eje B-3.

La ubicación de los LVDTs se puede observar en la figura 6.

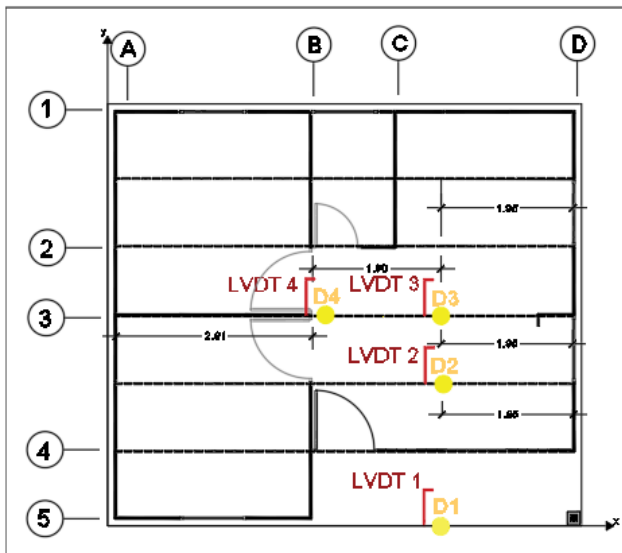


Figura 6. Ubicación de los deformímetros

2.2.3. Ensayo dinámico a carga lateral (aplicación de aceleración)

El ensayo dinámico a carga lateral, a partir del cual se llevó a cabo el estudio correspondiente para el presente artículo, se efectuó de la siguiente manera:

Para el movimiento de todo el sistema, se utilizó un camión y un cable de acero como se observa en la figura 7.

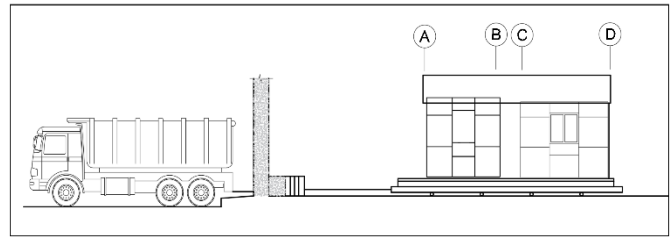


Figura 7. Ensayo dinámico a carga lateral aplicando una aceleración.

Para el ensayo se aplicaron varias aceleraciones incrementales en la dirección del eje XZ, con la finalidad de observar su comportamiento y las derivas frente a fuerzas correspondientes al cortante basal de diseño para revisar que fueran menores que los límites que establece la NEC-15.

La instrumentación empleada durante el ensayo consistió en: un acelerómetro para medir las aceleraciones en función del tiempo a lo largo de todo el ensayo como se observa en la figura 8.



Figura 8. Acelerómetro

Además, se colocaron cuatro transductores de desplazamiento (LVDTs) ubicados de la siguiente manera, como se observa en la figura 9.

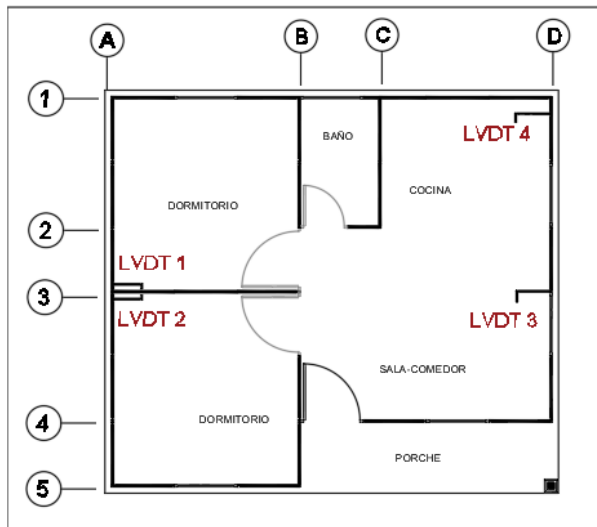


Figura 9. Ubicación de LVDTs

LVDT 1: Mide el desplazamiento horizontal y está ubicado en el cruce del eje A con eje 3

LVDT 2: Mide el desplazamiento horizontal y está ubicado en el cruce del eje A con el eje 3 para corroborar las medidas del LVDT 1.

LVDT 3: Mide el desplazamiento horizontal y está ubicado en el cruce del eje D con el eje 3.

LVDT 4: Mide el desplazamiento horizontal y está ubicado en el cruce del eje D con el eje 1.

Para el control del comportamiento global de la estructura, se colocaron testigos de yeso en diferentes lugares de la estructura, específicamente en las uniones de las placas entre sí y con la cubierta, ya que se requiere observar la interacción de los elementos constitutivos del sistema.

Para la selección de la aceleración pico a la cual sería sometida la vivienda se partió de dos criterios, siendo el primero el fundamentado por la NEC, en el apartado 3.1.2. Peligro del Ecuador y efectos sísmicos locales y el segundo criterio basado en los sismos ocurridos en Pedernales-Jama el 16 de abril de 2016, y el sismo ocurrido en las costas de Esmeraldas el 19 de diciembre de 2016.

2.3. Modelo computacional

Un inconveniente que podía suscitarse en el modelo computacional podría ser la asignación de carga y por esta razón se realizó a través de la herramienta

“frame loads” para así asignar una carga distribuida en las vigas una vez realizado el procedimiento y cálculo del ancho tributario.

2.3.1. Propiedades de los Materiales

Las propiedades adoptadas son similares a las obtenidas en los ensayos preliminares para los perfiles metálicos y paneles de hormigón. Para los perfiles de galvalume se colocó como material el aluminio puesto que el galvalume está compuesto por 55% aluminio, 43% zinc y 2% de silicio. Para las vigas y columnas se empleó acero A36. Para los paneles de concreto con un $f'c=240\text{kg/cm}^2$.

2.3.2. Desarrollo

Para cada perfil de galvalume de la estructura, se dibujó uno por uno con las medidas reales. La estructura contiene perfiles tipo: K, X, T, L, I y H.

Una vez creadas las secciones y asignado el material se modeló la vivienda, se aplicó la carga distribuida empleando el ancho tributario de las vigas de acero y el valor de la carga muerta por metro cuadrado para el ensayo de 0.2KN/m

La medida de los anchos tributarios se puede observar en la figura 10.

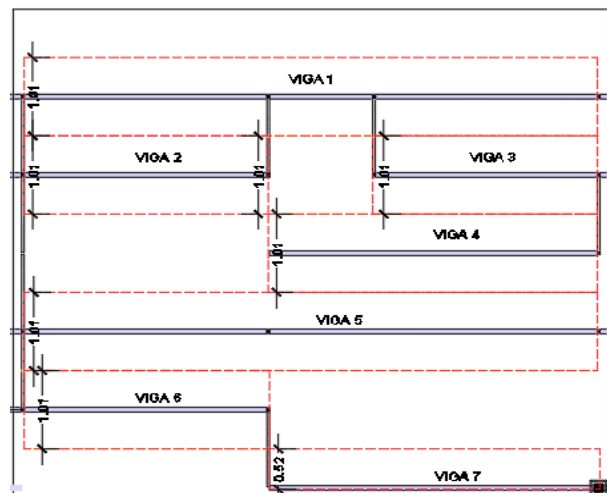


Figura 10. Plano con anchos tributarios

A continuación, se observa el modelo en la figura 11.

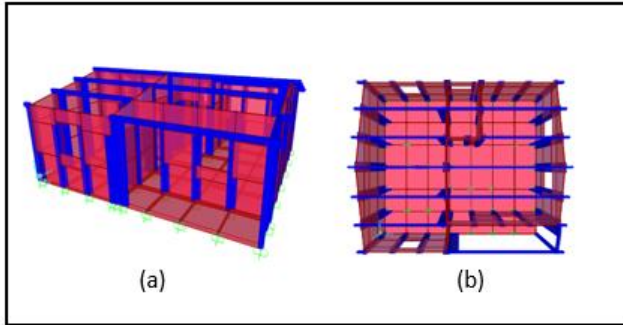


Figura 11. Modelado de la vivienda en software especializado
(a) Vista lateral
(b) Vista en planta

2.3.3. Deformaciones obtenidas en el modelo computacional

A continuación, se observa las formas modales. Se describe los tres primeros modos:

1) Forma modal en el período 1 (0.177):

En este modo se observa que la estructura tiene movimiento en la dirección x, dado que en este modo no existen restricciones, porque el ensayo realizado de la vivienda fue sobre una plataforma con ruedas para facilitar el movimiento a partir de la aplicación de una aceleración.

En este modo se observa que la casa se mueve conjuntamente con la base en el sentido del eje X, sin indicar deformaciones en los elementos ya que se mueve toda la vivienda, como se observa en la figura 12.

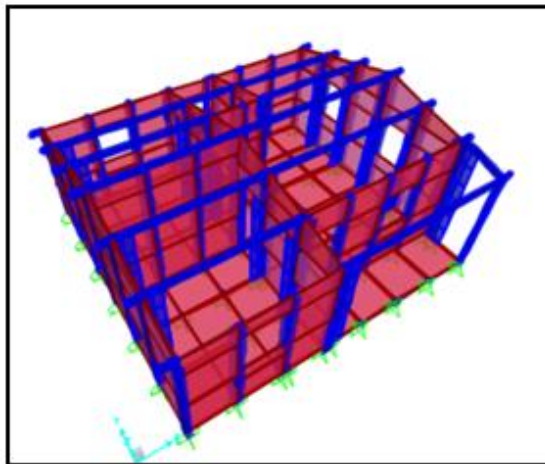


Figura 12. Forma modal, período 1

2) Forma modal en el período 2 (0.169): En este modo se observa las deformaciones en el pórtico de la fachada delantera de la vivienda puesto que no tiene una viga en dicho pórtico como se observa en la figura 13.

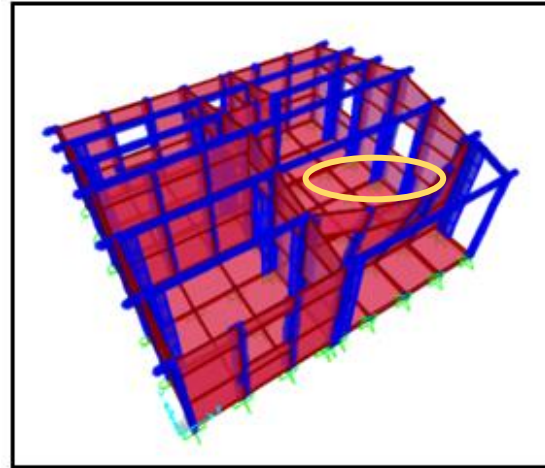


Figura 13. Forma modal, período 2

3) Forma modal en el período 3 (0.142):

En este modo se observa las deformaciones del pórtico de la parte trasera de la vivienda puesto que ahí no consta de una viga como se denota en la figura 14.

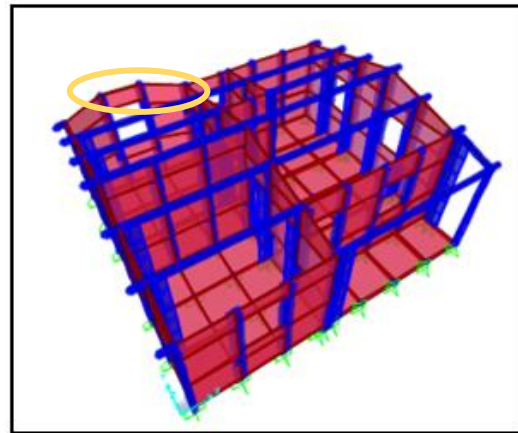


Figura 14. Forma modal, período 3

2.3.4. Tiempo Historia

Después de analizar los modos de la vivienda en modelado, se registra los mismos datos de tiempo y aceleración empleados en el software matlab, para obtener un acelerograma. Con este paso se observa la deformación en determinados puntos de la estructura.

2.4. Evaluación Numérica

Para resolver la ecuación diferencial en el caso que se está estudiando se va a aplicar el método numérico de Newmark, cuya ilustración se observa en la figura 15.

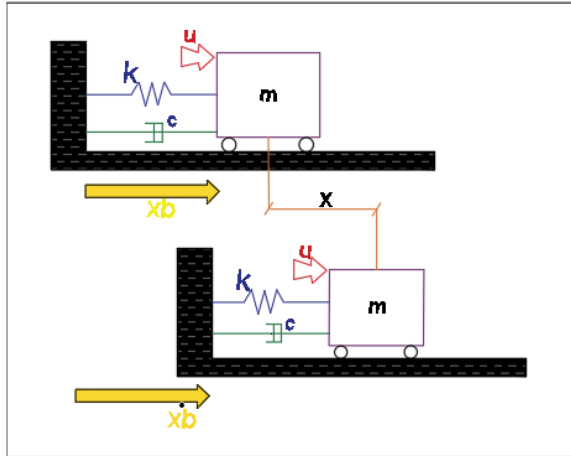


Figura 15. Método de Newmark

2.4.1. Método de Newmark

El método de Newmark es un método numérico utilizado para resolver ecuaciones diferenciales en el análisis de estructuras y dinámica estructural. Fue desarrollado por Nathan M. Newmark en la década de 1950 y se utiliza ampliamente en la ingeniería civil para analizar el comportamiento de estructuras sometidas a cargas dinámicas.

En el método de Newmark para resolver la ecuación diferencial del movimiento, debido a que no es posible una solución analítica, hay que notar que la solución dinámica está dada de manera discreta, es decir la aceleración de piso va ser una serie de valores dados para cada instante de tiempo. Estos instantes están separados uno de otro por un intervalo de tiempo.

Dentro del método de Newmark se emplea los siguientes vectores y matrices como se observa en la fórmula 2 obtenida de *Structural Dynamics for Structural Engineers Cap 2*.

$$\begin{pmatrix} u_{k+1} \\ \dot{u}_{k+1} \\ \ddot{u}_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_k \\ \dot{u}_k \\ \ddot{u}_k \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\Delta t^2}{6\beta} \\ \frac{\Delta t}{2\beta} \\ \frac{1}{\beta} \end{pmatrix} (\ddot{x}_{b_{k+1}}) \quad (2)$$

Vector de respuestas dinámicas en el instante k+1:

$$\begin{pmatrix} u_{k+1} \\ \dot{u}_{k+1} \\ \ddot{u}_{k+1} \end{pmatrix}$$

Matriz de coeficientes constantes para un sistema y un registro sísmico dado:

$$A = \left(1 - \frac{\omega^2 * \Delta t^2}{6\beta} \right)$$

$$B = \left(\Delta t - \frac{2\varphi * \omega * \Delta t^2 + \omega^2 \Delta t^3}{6\beta} \right)$$

$$C = \left(\frac{\Delta t^2}{3} - \frac{\gamma * \Delta t^2}{6\beta} \right)$$

$$D = \left(\frac{\omega^2 * \Delta t}{2\beta} \right)$$

$$E = \left(1 - \frac{2\varphi * \omega * \Delta t + \omega^2 \Delta t^2}{2\beta} \right)$$

$$F = \left(\frac{\Delta t}{2} - \frac{\gamma * \Delta t}{2\beta} \right)$$

$$G = \left(\frac{\omega^2}{\beta} \right)$$

$$H = \left(\frac{2\varphi * \omega * \Delta t + \omega^2 \Delta t}{\beta} \right)$$

$$I = \left(\frac{\gamma}{\beta} \right)$$

Vector de respuestas dinámicas en el instante k:

$$\begin{pmatrix} u_k \\ \dot{u}_k \\ \ddot{u}_k \end{pmatrix}$$

Vector de coeficientes constantes:

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta t^2}{6\beta} \\ \frac{\Delta t}{2\beta} \\ \frac{1}{\beta} \end{pmatrix}$$

Aceleración de la base en el instante k+1:

$$(\ddot{x}b_{k+1})$$

2.4.2 Vibración Libre no Amortiguada

Es el movimiento periódico que se observa cuando el sistema se desplaza de su posición de equilibrio estático. Se la conoce también como transitoria.

2.4.3 Resortes en Serie

La fuerza que se transmite entre los resortes es la misma. La posición de la partícula es una composición de las elongaciones de los resortes como se observa en la figura 16.

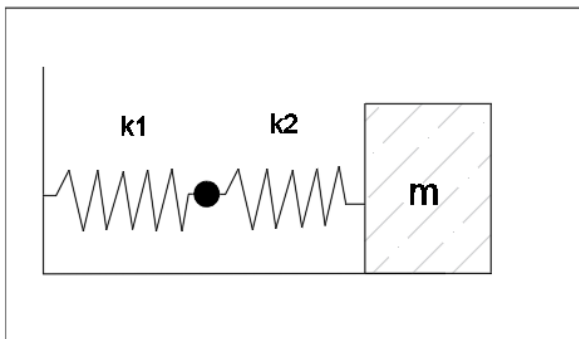


Figura 16. Resortes en serie

2.4.4. Resortes en Paralelo

La fuerza actuante sobre la partícula es la suma de las fuerzas en cada resorte. Las elongaciones de los resortes son las mismas, y además iguales al desplazamiento de la partícula como se observa en la figura 17.

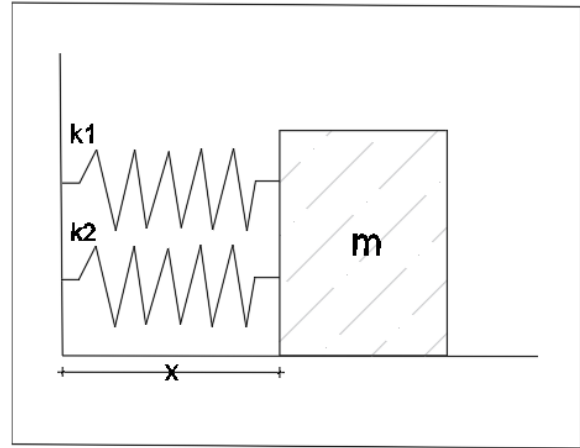


Figura 17. Resortes en paralelo

2.4.5. Modelo de Celosía

En ensayos experimentales, el también llamado *truss model* ha demostrado un buen ajuste en las simulaciones efectuadas. Dentro de este método se toma una franja de cada panel de la estructura calculando el ancho de la franja de acuerdo a los datos reales que son: el ángulo y la dimensión de los lados. De esta manera se obtiene el ancho de la franja y con el espesor que ya se conoce se calcula el área de cada franja de cada panel, para posteriormente obtener el coeficiente rigidez con el área y el módulo de elasticidad del hormigón.

A continuación, se observa el procedimiento para obtener el ancho mediante el *truss model*, en la figura 18.

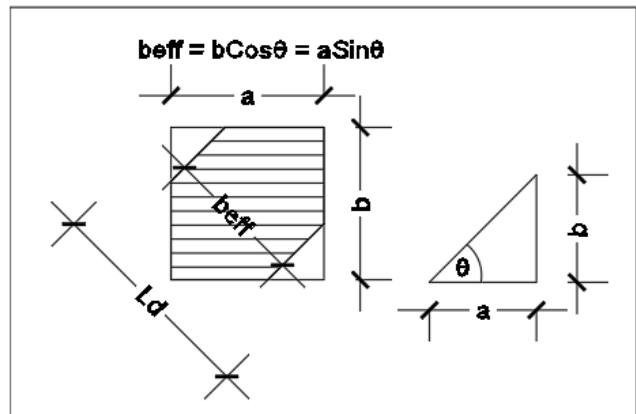


Figura 18. Ancho de franja del puntal

2.4.6. Aceleración máxima del suelo (PGA)

La aceleración máxima (PGA) del suelo es igual a la máxima aceleración del suelo que se produce en el movimiento de un sismo en determinado sitio y

es uno de los parámetros más importantes dentro del diseño de las estructuras que resisten eventos sísmicos importantes. En otras palabras el PGA es la amplitud de la aceleración absoluta mayor que se registra en un acelerograma en un lugar en el que se registra un evento sísmico. Como el movimiento del terremoto sucede en las tres direcciones, el PGA se divide en las componentes horizontal y vertical, siendo las componentes horizontales más grandes que las verticales en su mayoría.

PGA también se conoce como una medida de intensidad, y se mide con los acelerógrafos.

Una representación de aceleración pico se observa en la figura 19.

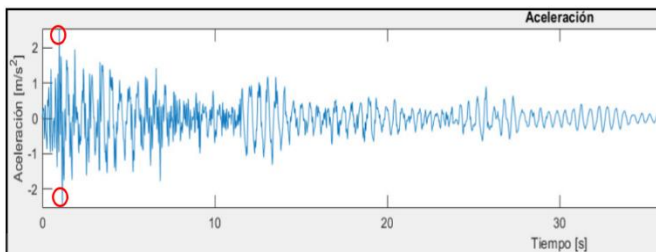


Figura 19. PGA

2.4.7. Acelerograma

Un acelerograma es un registro gráfico y cuantitativo de la aceleración del suelo en función del tiempo durante un evento sísmico o terremoto. Representa la respuesta del área afectada a las ondas sísmicas que la atraviesan.

Esta información es crucial para el diseño de terremotos y la evaluación del riesgo sísmico porque proporciona información detallada sobre las características del movimiento del suelo en un lugar determinado durante un terremoto.

Para obtener un acelerograma se utilizan dispositivos llamados acelerómetros, que son sensores sensibles a la aceleración terrestre, ubicados en varios puntos estratégicos para medir el cambio de aceleración en el tiempo. Los acelerómetros se utilizan en el diseño y análisis de estructuras y cimientos, así como en la investigación y el desarrollo de códigos y reglamentos de construcción sísmicos.

La interpretación correcta de los acelerómetros es importante para comprender el comportamiento

sísmico de la Tierra y garantizar la seguridad de las estructuras y las poblaciones en futuros eventos sísmicos. Además, las curvas de aceleración son valiosas para calibrar y verificar modelos de simulación de terremotos y predecir posibles daños estructurales en función de la intensidad y la duración del movimiento del suelo.

2.4.8 Espectro de Respuesta

Es una representación gráfica de la máxima respuesta (desplazamiento, velocidad, aceleración) frente a una excitación dinámica actuando sobre el sistema de un grado de libertad. Por lo tanto, se lo obtiene para un registro sísmico y se grafica en la ordenada (eje Y) y la respuesta máxima de la magnitud que se quiere observar y en la abscisa generalmente el periodo del sistema. El período está relacionado con el tipo de estructura que se quiere analizar

2.5. Registros Sísmicos Impulsivos

El impulso sísmico se refiere a una señal vibratoria que se produce debido a la liberación repentina de energía durante un evento sísmico. Esta liberación de energía se manifiesta en forma de ondas sísmicas que se propagan, generando movimientos y vibraciones en el suelo.

El impulso sísmico es caracterizado por su corta duración y alta amplitud, lo que concentración significativa de energía en un breve intervalo de tiempo. Su magnitud y efectos en una estructura o edificación dependen de varios factores, como la distancia al epicentro del terremoto, la intensidad del sismo, la geología del terreno y las características del suelo en el sitio que se encuentra la edificación.

Para el diseño de cualquier obra civil, es crucial tener en cuenta el impulso sísmico al realizar los diferentes diseños, ya que esta fuerza repentina y de gran impacto puede provocar daños significativos o colapso en las infraestructuras si no se toman medidas adecuadas. Para esto, se utilizan técnicas como el análisis dinámico y el cálculo de respuesta sísmica para garantizar que las construcciones sean capaces de resistir.

2.5.1. Pulso de Aceleración

Un pulso de aceleración se refiere a una variación instantánea y transitoria en la velocidad de un objeto en movimiento, que se caracteriza por un aumento súbito y temporal en su velocidad. Este fenómeno ocurre cuando una fuerza neta actúa sobre el objeto durante un breve período, lo que resulta en un cambio acelerado en su movimiento.

El pulso de aceleración puede ser positivo, si la velocidad aumenta, o negativo, si la velocidad disminuye. Es importante destacar que el pulso de aceleración es una perturbación en la velocidad y no representa un cambio continuo en la trayectoria del objeto, ya que su efecto es momentáneo y se disipa rápidamente, permitiendo que el objeto regrese a su movimiento original o se ajuste a un nuevo régimen de velocidad constante.

2.5.2. Factor de Amortiguamiento

El factor de amortiguamiento para una vivienda con el sistema constructivo descrito en el presente artículo, puede variar dependiendo de varios factores; con el tipo de material, sistema estructural y la configuración del sistema.

Las viviendas prefabricadas tienden a tener un factor de amortiguamiento relativamente bajo, al ser comparadas con estructuras de concreto y acero. Los valores típicos de dicho factor pueden estar en el rango del 1% a 3%.

2.5.3. Coeficiente de Rigidez (K)

Luego de analizar los pórticos de la vivienda y ver los modos de deformación que se obtiene en el eje X que es el que se va a deformar de acuerdo a la dirección de la carga lateral aplicada, se identifica los resortes que se tiene en serie y en paralelo en los paneles de la vivienda. A continuación, se calcula el coeficiente de rigidez K equivalente de toda la vivienda. Para cada panel individual se emplea la fórmula 3.

$$K = \frac{AE}{L} \quad (3)$$

Para calcular el coeficiente de rigidez K de los paneles que se encuentran en paralelo, se emplea la fórmula 4.

$$K_{eq} = k_1 + k_2 + \dots + k_n \quad (4)$$

Para calcular el coeficiente de rigidez K de los paneles que se encuentran en serie, se emplea la fórmula 5.

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (5)$$

2.6. Datos de los paneles para el cálculo del coeficiente de rigidez (K)

A continuación, se puede observar los ángulos y la forma en que se grafican los resortes para aplicar el método de Newmark en la figura 20.

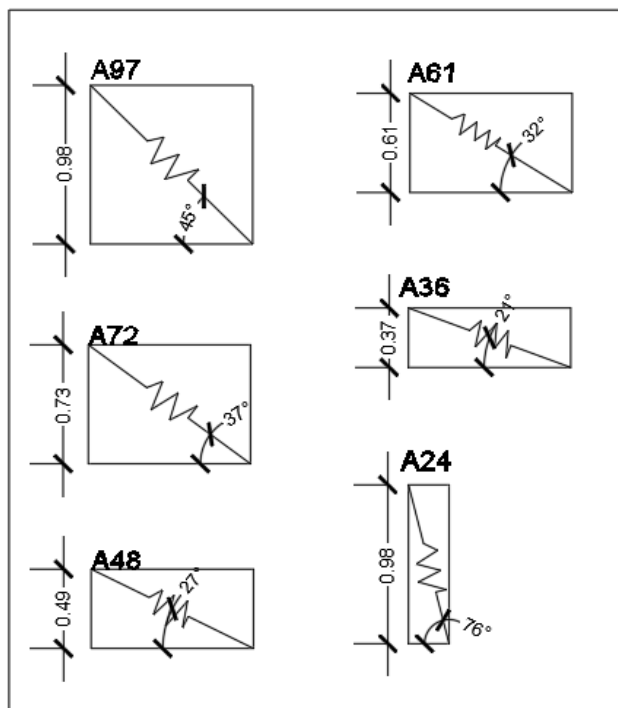
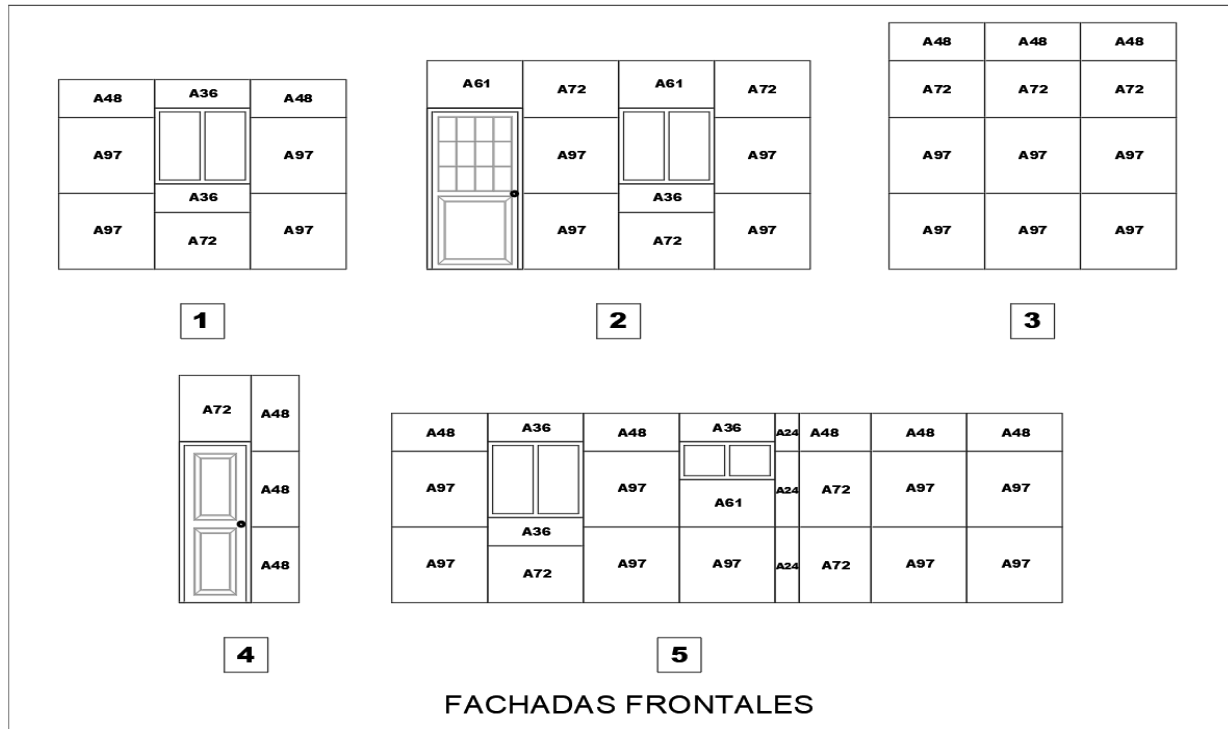


Figura 20. Datos de paneles de hormigón

2.7. Pórticos en el plano XZ

La vivienda consta de 5 pórticos en el plano XZ como se puede observar en la figura 21.



$$E = 4.7 * \sqrt{f'c} \quad (6)$$

Figura 21. Pórticos en el plano XZ

Los pórticos en el plano YZ no se toman en cuenta puesto que los mismos no son muy afectados durante el movimiento.

3. Resultados y Discusión

Una vez realizado el modelo de la vivienda y el código en Matlab, con los resultados se realiza una comparación de datos de los desplazamientos obtenidos, y se analiza el PGA obtenido en un determinado tiempo.

Para este efecto se obtuvo el coeficiente de rigidez K, empleando la ecuación (3), donde se empleó el 30% del ancho efectivo de la franja de cada panel para obtener el área que se requiere para el cálculo. En cuanto al módulo de elasticidad del concreto, se empleó el correspondiente al valor de la resistencia a la compresión del concreto de los paneles aplicando la fórmula 6.

A continuación, se calibra el modelo con los PGA del código y una vez que se los tiene calibrados, se realiza un análisis y comparativa

con los datos de deformaciones obtenidos en la vivienda real con el ensayo de carga lateral aplicando una aceleración externa.

Los resultados de las deformaciones obtenidas en el ensayo son las especificadas en la tabla 3:

Tabla 3: Aceleraciones aplicadas y control de derivas.

N	Acelerac. (m/s ²)	Δ _{máx} m	Δ _{inelást.}	Δ NEC-15	Control
1	0.077	0.0025	0.001	0.01	Cumple
2	0.81	0.003	0.001	0.01	Cumple
3	0.084	0.0028	0.001	0.01	Cumple
4	0.086	0.0026	0.001	0.01	Cumple
5	0.115	0.0119	0.004	0.01	Cumple
6	0.14	0.0036	0.001	0.01	Cumple
7	0.15	0.0026	0.001	0.01	Cumple
8	0.151	0.0059	0.002	0.01	Cumple
9	0.18	0.0013	0	0.01	Cumple
10	0.292	0.0024	0.001	0.01	Cumple
11	0.321	0.0079	0.003	0.01	Cumple
12	0.487	0.0032	0.001	0.01	Cumple

13	0.737	0.0132	0.004	0.01	Cumple
14	0.897	0.0142	0.005	0.01	Cumple
15	0.977	0.0057	0.002	0.01	Cumple
16	1.249	0.0049	0.002	0.01	Cumple
17	2.212	0.0188	0.006	0.01	Cumple

Una vez analizados los requisitos presentes en la norma, los últimos eventos sísmicos que han ocurrido en el Ecuador y la máxima aceleración registrada en el último terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016 fue de 1.4g. La vivienda registró en el ensayo una aceleración máxima de 2.212g que está por encima de los registros antes mencionados.

Para obtener los mayores desplazamientos del modelado de la vivienda, se aplicaron las aceleraciones del ensayo real una a una. Con el fin de obtener las deformaciones descritas en la tabla 3.

A continuación, se describe las aceleraciones aplicadas, deformaciones obtenidas y la variación que se realizó en el módulo de elasticidad para llegar a los valores de desplazamientos reales en la tabla 4.

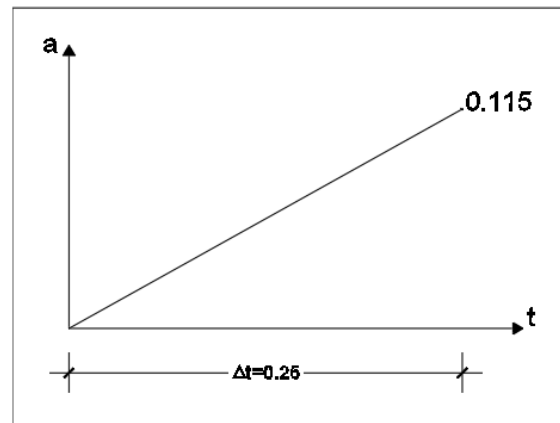
Tabla 4: Aceleraciones aplicadas y deformaciones obtenidas.

Ensayo	E Kg/m ²	Coficiente nuevo
1	12.262	0.0079
2	11.281	0.0072
3	11.772	0.0075
4	12.753	0.0082
5	2.649	0.0017
6	13.832	0.0089
7	17.167	0.011
8	11.036	0.0071
9	25.996	0.0167
10	24.525	0.0158
11	15.794	0.0101
12	27.173	0.0175
13	16.726	0.0108
14	17.707	0.0114
15	34.335	0.0221
16	36.7875	0.0237
17	23.936	0.0154
Promedio		0.0119

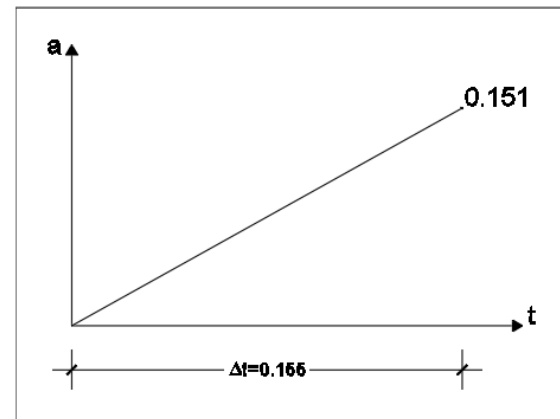
El coeficiente obtenido es el que se reemplazará en la ecuación (6) para futuros cálculos y representación del sistema de paneles portantes.

Al realizar la comparativa entre los datos de los máximos desplazamientos del modelo de la vivienda, el código del software empleado y los datos registrados en los medidores de desplazamiento (LVDTs) del ensayo real, se ha detectado la mayor concordancia entre los LVDTs 1 y 2 que están ubicados en el eje A3 a una altura de 3.16m, que han dado como resultado un desplazamiento máximo de 0.014m y 0.0188m respectivamente. El desplazamiento que se observa en el modelo en los mismos puntos es de 0.014m y 0.0188m respectivamente.

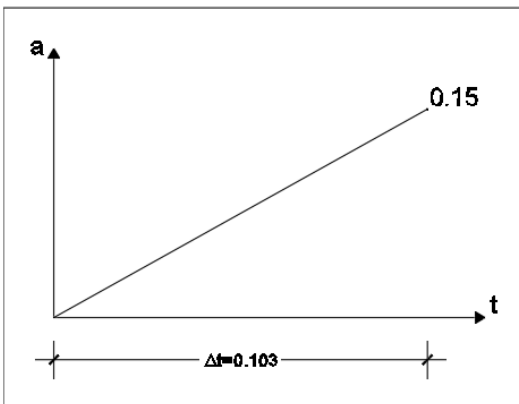
En cuanto a los valores de paso de tiempo (Δt) ingresados en el código de matlab para obtener los resultados de desplazamientos similares a los del ensayo real, éstos se tomaron aleatoriamente. Para este efecto se analizó y tomó el tiempo en cada registro de video de cada uno de los ensayos como se observa en la figura 24.



(a)



(b)



(c)

Figura 24. Paso de tiempo (Δt)

4. Conclusiones

El ensayo a carga lateral aplicando una aceleración, realizado por el CIV es la representación de un sismo en la dirección del eje X, que ha sido motivo del análisis y comparativa realizados en este artículo. Dicha comparativa se ha efectuado a partir de la elaboración de un modelo y código en Matlab.

El modelado realizado con los materiales y dimensiones de la vivienda real, ha arrojado resultados acordes a los obtenidos en el ensayo real, justamente donde se encuentran ubicados los LVDTs 1 y 2, que es donde la vivienda presentó una mayor deformación.

Las herramientas computacionales empleadas dan una guía de cómo se debe comportar la estructura ante eventos sísmicos, en este caso, dando como resultado pequeños desplazamientos debido a la carga lateral aplicada (aceleración).

En la vivienda se realizaron 17 pruebas en las que se aplicaron diferentes aceleraciones, obteniendo como la máxima una aceleración de 2.212m/s^2 y un desplazamiento correspondiente de 0.0188m .

El método *truss-model* aplicado en el estudio del presente artículo brinda la posibilidad de obtener óptimos resultados a partir de la iteración de un ancho efectivo para realizar los cálculos correspondientes.

Con la variación del módulo de elasticidad del concreto de los paneles, se ha podido obtener las mismas deformaciones que en el ensayo experimental de la vivienda.

Los ensayos experimentales dan como resultado datos más exactos y específicos debido a la naturaleza de su ejecución, sin embargo, las herramientas computacionales han arrojado resultados coherentes en cuanto al desplazamiento de la estructura una vez aplicada la fuerza lateral correspondiente.

5. Referencias

- [1] American Concrete Institute. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318-19, 2019.
- [2] I. Cherres S. David “Estudio del comportamiento estructural ante carga vertical del sistema constructivo casa lista de dos niveles propuesto por la Mutualista Pichincha” Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero civil, mención estructuras, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Mar. 2017.
- [3] A. Azócar A. Miguel “Modelo Puntal-Tensor Aplicado al Diseño de Elementos de Hormigón Amado” Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en obras civiles, Universidad Austral de Chile, Chile. 2004.
- [4] Gary C.H. y Kevin W. (1999). Structural dynamics for structural Engineers (2da ed.).
- [5] Mario Paz. (1985). Dinámica Estructural. (2da ed.).
- [6] Joseph P y Ray W. (1975). Dynamics of structures (3era ed.).
- [7] Alejandro V.L. (2011). Dinámica estructural I GDL.
- [8] Panagiotou, M. (2012) Nonlinear “cyclic truss model for reinforced concrete walls” *ACI Struct. J.*
- [9] Luis.E.S. (2014). Análisis de estructuras con cargas dinámicas.
- [10] Wang C.M. y Chang Y.W. (2013). Structural Vibration.
- [11] Bauchau O.A y James I.C (2009). Structural Analysis (2da ed.).