



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**Capacidad Sísmica de las Estructuras de Mampostería del  
Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**Autores:**

**DANIELA KARINA GARCÍA ORTEGA  
WILLIAM VICENTE GUARTAZACA SISALIMA**

**Director:**

**HERNÁN ALFREDO GARCÍA ERAZO**

**CUENCA-ECUADOR**

**2019**

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, Marco García y Guillermina Ortega por ser el pilar fundamental de mi vida, por apoyarme siempre en cada momento, por brindarme sus sabios consejos, valores, principios y alentarme para culminar con éxito mi carrera universitaria

A mi querido hijo, José Daniel por ser mi motivación e inspiración para superarme día a día.

A mis hermanas, Emilia y Malú, que gracias a sus palabras de aliento me permitieron seguir y continuar adelante.

A mis abuelitos por brindarme su amor y apoyo incondicional, y por estar presentes en todo momento de mi vida

A mis amigos, por compartir su conocimiento y momentos inolvidables.

A todas las personas que hicieron posible este trabajo.

*Daniela*

Mi tesis la dedico con mucho cariño a Dios y a María Auxiliadora quienes lo han hecho todo, que gracias a sus dones que me han brindado he podido culminar esta meta.

A mis amados padres Vicente Guartazaca y Judith Sisalima por su gran sacrificio por darme una carrera para mi futuro y nunca darme la espalda ante las adversidades que han ocurrido en mi vida.

Y a mis queridísimos hermanos, Diana Michelle y Jhon quienes con su alegría, consejos, y apoyo me han acompañado todos los días en este caminar.

*William*

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente queremos agradecer a Dios, quien nos dio la vida y fortaleza para poder cumplir esta meta.

A la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay y a los docentes por brindarnos todos los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra formación como profesionales.

A nuestros tutores: Ing. Hernán García, Ing. Mercedes López, Ing. José Vázquez gracias por la paciencia, tiempo, dedicación y orientación, ya que sin su ayuda no hubiera sido esto posible.

A todas las personas, amigos, compañeros que han sido clave en nuestra formación y que gracias a su apoyo pudimos terminar con éxito nuestra vida universitaria.

*Daniela y William*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
<b>CAPITULO I CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA .....</b>	<b>3</b>
1.1    Introducción.....	3
1.2    Antecedentes .....	3
1.3    Historia constructiva de Cuenca.....	4
1.4    Lineamientos para la caracterización de las estructuras del CHC.....	6
1.5    Materiales de construcción de las estructuras del CHC .....	7
1.5.1    Adobe .....	7
1.5.2    Ladrillo.....	9
1.5.3    Madera.....	11
<b>CAPITULO II MODELACIÓN DE LOS PROTOTIPOS DE LAS VIVIENDAS DEL CH.....</b>	<b>14</b>
2.1    Introducción.....	14
2.2    Definición de las viviendas prototipo.....	14
2.2.1    Prototipo de vivienda pequeña .....	14
2.2.2    Prototipo de vivienda mediana.....	16
2.2.3    Prototipo de vivienda grande .....	18
2.3    Modelación de los prototipos .....	20
2.3.1    Características Geométricas .....	20
2.3.2    Características de los materiales .....	23

2.3.3	Definición de las cargas .....	30
2.3.4	Condiciones de contorno.....	31
2.3.5	Resultados del modelado.....	31
<b>CAPITULO III ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....</b>		<b>32</b>
3.1	Introducción.....	32
3.2	Metodología.....	32
3.3	Análisis Modal .....	32
3.3.1	Propiedades de vibración natural .....	32
3.3.2	Factores de contribución modal .....	40
3.4	Análisis Espectral .....	43
3.4.1	Espectro de respuesta .....	43
3.4.2	Espectro elástico de respuesta.....	43
<b>CAPITULO IV CAPACIDAD SISMICA DE LAS PAREDES DE LOS MODELOS PROTOTIPO .....</b>		<b>47</b>
4.1	Introducción.....	47
4.2	Verificación sísmica de las estructuras.....	47
4.3	Estudio sobre modos de falla bajo acción sísmica .....	48
4.3.1	Fallas en el plano.....	48
4.3.2	Fallas fuera del plano .....	51
4.4	Resultados .....	52
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>61</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>63</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>64</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPITULO II

Figura 2.1 Vista frontal de la vivienda pequeña. ....	15
Figura 2.2 Vistas en planta de la vivienda pequeña: (a) planta baja y (b) planta alta. ....	16
Figura 2.3 Vista frontal de la vivienda mediana. ....	17
Figura 2.4 Vistas en planta de la vivienda mediana: (a) planta baja y (b) planta alta. ....	18
Figura 2.5 Vista frontal de la vivienda grande. ....	19
Figura 2.6 Vistas en planta de la vivienda grande: (a) planta baja y (b) planta alta. .	20
Figura 2.7 Representación de un elemento bidimensional .....	21
Figura 2.8 Representación de una pared con elementos tipo SHELL.....	21
Figura 2.9 Representación de un elemento lineal tipo BEAM. ....	21
Figura 2.10 Representación de las columnas y las vigas de los prototipos utilizando elementos tipo BEAM y TRUSS. ....	22
Figura 2.11 Curvas de conversión para el ensayo con el esclerómetro. ....	24
Figura 2.12 Modelo discretizado mediante elementos finitos a través del programa Stabil para la vivienda pequeña de la ciudad de Cuenca: (a) vista frontal y (b) vista en 3D. ....	27
Figura 2.13 Modelo discretizado mediante elementos finitos a través del programa Stabil para la vivienda mediana de la ciudad de Cuenca: (a) vista frontal y (b) vista en 3D. ....	28
Figura 2.14 Modelo discretizado mediante elementos finitos a través del programa Stabil para la vivienda grande de la ciudad de Cuenca: (a) vista frontal y (b) vista en 3D.....	29
Figura 2.15 Vista en planta del entrepiso de las viviendas: (a) pequeña, (b) mediana y (c) grande. ....	30

### CAPITULO III

Figura 3.1 Modos de vibrar del prototipo de vivienda pequeña: (a) primer modo, (b) segundo modo, (c) tercer modo, (d) cuarto modo y (e) quinto modo. .... 35

Figura 3.2. Modos de vibrar del prototipo de vivienda mediana: (a) primer modo, (b) segundo modo, (c) tercer modo, (d) cuarto modo, (e) quinto modo, (f) sexto modo, (g) séptimo modo, (h) octavo modo, (i) noveno modo, (j) decimo modo y (k) décimo primer modo. .... 37

Figura 3.3 Modos de vibrar del prototipo de vivienda grande: (a) primer modo, (b) segundo modo, (c) tercer modo, (d) cuarto modo, (e) quinto modo, (f) sexto modo, (g) séptimo modo, (h) octavo modo, (i) noveno modo, (j) decimo modo, (k) décimo primer modo, (l) décimo segundo modo y (m) décimo tercer modo. .... 39

Figura 3.4 Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño ..... 43

Figura 3.5 Espectro de diseño elastico de aceleración para la ciudad de Cuenca... 44

### CAPITULO IV

Figura 4.1 Falla a tracción diagonal generada por un esfuerzo de compresión y tensión paralela al panel de mampostería..... 48

Figura 4.2 Aplastamiento en las esquinas y compresión diagonal en el panel de mampostería. .... 50

Figura 4.3 Falla por balanceo y desprendimiento de ladrillos de un edificio de mampostería no reforzado..... 51

Figura 4.4. Vista en perspectiva de la falla fuera de plano. .... 51

Figura 4.5 Fallas en el plano de las paredes del prototipo de vivienda pequeña para el modo dominante..... 53

Figura 4.6 Fallas fuera del plano de las paredes del prototipo de vivienda pequeña para el modo dominante. .... 54

Figura 4.7 Fallas en el plano de las paredes del prototipo de vivienda mediana para el modo dominante..... 56

Figura 4.8 Fallas fuera del plano de las paredes del prototipo de vivienda mediana para el modo dominante..... 56

Figura 4.9 Fallas en el plano de las paredes del prototipo de vivienda grande para el primer modo dominante. .... 58

Figura 4.10 Fallas fuera del plano de las paredes del prototipo de vivienda grande para el primer modo dominante. ....	59
Figura 4.11 Fallas en el plano de las paredes del prototipo de vivienda grande para el segundo modo dominante. ....	59
Figura 4.12 Fallas fuera del plano de las paredes del prototipo de vivienda grande para el segundo modo dominante.....	60



## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO I

Tabla 1.1 Resistencia a la compresión del adobe.....	8
Tabla 1.2 Resistencia a la tracción indirecta del adobe. ....	8
Tabla 1.3 Resistencia a la flexión del adobe.....	9
Tabla 1.4 Resistencia a compresión y a flexión de ladrillos panelones.....	10
Tabla 1.5 Módulo de elasticidad de la mampostería del ladrillo. ....	10
Tabla 1.6 Esfuerzos admisibles para la madera. ....	12
Tabla 1.7 Módulo de elasticidad para la madera.....	12

### CAPITULO II

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de los materiales de las viviendas prototipo. ....	26
--	----

### CAPITULO III

Tabla 3.1 Propiedades de vibración natural del prototipo de vivienda pequeña para los 10 primeros modos con su respectiva participación de masa.....	34
Tabla 3.2 Propiedades de vibración natural del prototipo de vivienda mediana para los 15 primeros modos con su respectiva participación de masa.....	36
Tabla 3.3 Propiedades de vibración natural del prototipo de vivienda grande para los 15 primeros modos con su respectiva participación de masa. ....	38
Tabla 3.4 Resultados del análisis modal del prototipo de vivienda pequeña.....	41
Tabla 3.5 Resultados del análisis modal del prototipo de vivienda mediana .....	42
Tabla 3.6 Resultados del análisis modal del prototitpo de vivienda grande .....	42
Tabla 3.7 Análisis espectral del prototipo de vivienda pequeña.....	45
Tabla 3.8 Análisis espectral del prototipo de vivienda mediana.....	46
Tabla 3.9 Análisis espectral del prototipo de vivienda grande .....	46

**CAPITULO IV**

Tabla 4.1 Resultados de Cohesión y Ángulo de fricción del ladrillo .....	49
Tabla 4.2 Número de paredes que fallan en el plano por: capacidad a la tracción diagonal, agrietamiento en las esquinas, balanceo y fallas fuera de plano por volcamiento para el prototipo de vivienda pequeña.....	53
Tabla 4.3 Número de paredes que fallan en el plano por: capacidad a la tracción diagonal, agrietamiento en las esquinas, balanceo y fallas fuera de plano por volcamiento para el prototipo de vivienda mediana. ....	55
Tabla 4.4 Número de paredes que fallan en el plano por: capacidad a la tracción diagonal, agrietamiento en las esquinas, balanceo y fallas fuera de plano por volcamiento para el prototipo de vivienda grande. ....	57

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Entrega de solicitud de permiso para el ingreso a cada vivienda. ....	65
Anexo 2 Visitas de campo para verificación de datos. ....	65
Anexo 3 Ensayo realizado con el esclerómetro. ....	66
Anexo 4 Códigos de modelación. ....	67
Anexo 5 Códigos del análisis modal. ....	70
Anexo 6 Códigos del análisis espectral. ....	<b>70</b>

## CAPACIDAD SÍSMICA DE LAS ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA

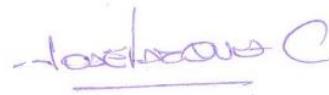
### RESUMEN

El presente trabajo consistió en el análisis dinámico de las estructuras de mampostería no reforzada con entrepiso flexible del Centro Histórico de Cuenca, para esto se modelaron tres viviendas representativas. Se realizó un análisis modal para la obtención de los modos naturales de vibración con la ayuda del programa Stabil, y un análisis espectral para la obtención de la fuerza sísmica. Se determinó el comportamiento de las paredes a fallas en el plano y fuera del plano, a través de la formulación que se explica en la norma Neozelandesa y en el libro de Tomazevic respectivamente. Los resultados finales se presentan mediante gráficas que comparan las acciones que actúan en las paredes frente a su capacidad máxima de resistencia a tracción diagonal, agrietamiento en las esquinas, balanceo y volcamiento.

**Palabras clave:** mampostería no reforzada, entrepiso flexible, Stabil, modos naturales de vibración y análisis dinámico.



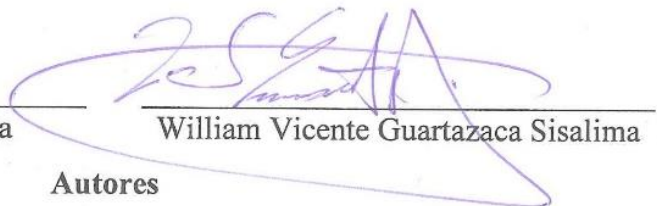
Ing. Hernán Alfredo García Erazo  
**Director del trabajo de titulación**



Ing. José Fernando Vázquez Calero  
**Director de la Escuela**



Daniela Karina García Ortega



William Vicente Guartazaca Sisalima


**Autores**

## SEISMIC CAPACITY OF THE MASONRY STRUCTURES OF THE HISTORICAL CENTER OF CUENCA

### ABSTRACT

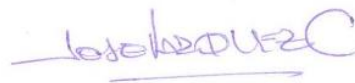
This work carried out the dynamic analysis of the non-reinforced masonry structures with flexible mezzanine from the historic center of Cuenca. For this, three representative dwellings were modeled. A modal analysis was performed to obtain the natural modes of vibration using the Stabill software and a spectral analysis was developed to obtain the seismic force. The walls behavior in relation to failures in the plane and outside the plane were determined by formulating the New Zealand standard and using the Tomazevic book, respectively. The final results are presented by means of graphs that compare the actions that affect the walls with respect to the maximum diagonal tensile strength, corner cracking, balancing and overturning.

**Keywords:** non-reinforced masonry, flexible mezzanine, Stabill, natural modes of vibration, dynamic analysis.



Ing. Hernán Alfredo García Erazo

**Thesis Director**



Ing. José Fernando Vázquez Calero

**Faculty Director**



Daniela Karina García Ortega



William Vicente Guartazaca Sisalima

**Authors**

Daniela Karina García Ortega

William Vicente Guartazaca Sisalima

Trabajo de Titulación

Ing. Hernán Alfredo García Erazo PHD.

Septiembre, 2019

## INTRODUCCIÓN

Debido a que el Ecuador está atravesado por el “Cinturón de Fuego del Pacífico” existen gran cantidad de movimientos telúricos, un claro ejemplo de esto fue el sismo que sucedió el 16 de Abril de 2016 en la provincia de Manabí. Este sismo alcanzó una magnitud de 7,8 Mw, trayendo consigo la pérdida de 671 vidas humanas y una afectación económica estimada en 3,5% del producto interno bruto de la nación (PIB), por esta razón, se considera importante los estudios que se desarrollen para evaluar la vulnerabilidad de todas las estructuras frente a un sismo.

Existen dos tipos de estructuras de mampostería en la ciudad de Cuenca: la mampostería confinada, que son las modernas, y las estructuras de mampostería no reforzadas, que son las más vulnerables, ya que son estructuras vernáculas que fueron construidas sin ningún seguimiento técnico; por esta razón, se realizó un análisis de la capacidad sísmica de los edificios de mampostería no reforzada con entrepiso flexible del Centro Histórico de Cuenca.

En el Capítulo I, se abordaron temas en relación con la búsqueda de información acerca de las características geométricas y mecánicas de los edificios del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca.

En el Capítulo II, se escogieron tres modelos de edificaciones más representativos del Centro Histórico, y se muestra paso a paso cómo se realizó el proceso de la modelación y todos los aspectos que se tomaron en consideración.

En el Capítulo III, se realizó un análisis modal y espectral a cada prototipo de vivienda para obtener las propiedades de vibración natural y la fuerza sísmica.

Finalmente, en el Capítulo IV, se determina la capacidad sísmica de las paredes a través de los modos de falla en el plano y fuera del plano.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Determinar la capacidad sismo resistente de tres edificios tipo del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca.

### **Objetivos específicos**

- Determinar las características geométricas de los edificios del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca.
- Estudiar las características mecánicas de la mampostería de los edificios del Centro Histórico de Cuenca.
- Presentar los modelos de los edificios tipo representativos del Centro Histórico de Cuenca.
- Presentar un método de análisis modal y espectral.
- Analizar la capacidad en el plano y fuera de plano de los edificios de mampostería del Centro Histórico de Cuenca.

# **CAPITULO I CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA**

## **1.1 Introducción**

La mayoría de los edificios del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca se construyeron durante un período relativamente corto, como resultado la realidad constructiva, es comparativamente uniforme siendo el canto rodado, la tierra, arcilla, cerámicas y madera los materiales predominantes (Aguirre, Ávila, & Pesantez, 2016). En este capítulo se abordarán temas en específico relacionados con las características constructivas, geométricas, propiedades físicas y mecánicas de los materiales como la resistencia a la compresión, flexión, tracción, densidad y módulo de elasticidad del adobe, ladrillo y madera, materiales por los que están conformados los edificios del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca, cuyos datos se obtuvieron mediante la revisión de tesis de pregrado y posgrado de arquitectura e ingeniería civil.

## **1.2 Antecedentes**

En el proyecto P-BID 400 se obtuvo mapas de amenaza sísmica para la región austral del país, evidenciando que la zona más vulnerable ante la presencia de un sismo es el Centro Histórico de Cuenca (CHC), ya que posee el mayor porcentaje de edificaciones que fueron construidas sin ningún seguimiento técnico, utilizando materiales de mala calidad y actualmente se encuentran en mal estado (Jiménez, Cabrera, Sánchez, & Avilés, 2018), por esta razón es importante realizar estudios sobre la vulnerabilidad sísmica de estos edificios.

El CHC se puede categorizar según su tipología de la siguiente forma: edificaciones de mampostería no reforzada (EMNR), edificaciones de hormigón armado (EHA), edificaciones de estructura metálica y las de madera. Las EMNR constituyen un 90% del universo edificado y el 10% restante corresponde a las EHA, siendo las edificaciones de baja altura las de mayor predominancia. Se ha definido una sub-tipología dentro de las EMNR, según la rigidez del sistema de entrepiso: edificaciones con entrepisos rígidos las que poseen losas de fundición y edificaciones con entrepisos flexibles que poseen envigados de madera (Jiménez et al., 2018).



### **1.3 Historia constructiva de Cuenca**

La ciudad Santa Ana de los cuatro Ríos de Cuenca fue fundada en el año 1557, es la capital de la provincia del Azuay, y en la actualidad es la tercera ciudad más importante del país por su arquitectura que es agradable a la vista de cualquier turista (Miller, 2019).

A continuación, se presenta la historia constructiva de la ciudad de Cuenca:

#### **-Antes de 1950**

El primer sistema que se utilizó en la construcción fue el bahareque en conjunto con el entramado de madera, carrizos, caña sujetos mediante cabuya y bejucos unidos mediante el relleno de mortero de tierra e incluso piedra (Muñoz, 2015).

En este período predomina las viviendas de baja altura manteniendo una arquitectura colonial, utilizaron un sistema de construcción mixto (adobe y bahareque) con un espesor que oscila entre los 50 a 120 cm, para el sistema de entrepiso se utilizaron vigas de madera que conectaban a las paredes y a la cubierta (Chérres & Peñafiel, 2000).

Aparece el ladrillo como un nuevo material de construcción para casos especiales: en iglesias (catedral nueva), hoteles, edificios públicos y entidades financieras (Jiménez et al., 2018).

#### **-Década de 1950**

Cambia la forma arquitectónica, distribuyendo mejor los espacios de las viviendas, en donde se implementaron garajes en la parte frontal y se reemplazaron los patios internos a la parte posterior de la edificación.

A pesar de que continuó el sistema de construcción mixta, se popularizó el uso del ladrillo en las edificaciones de MNR disminuyendo considerablemente el espesor de las paredes en un rango de 20 a 40 cm. Se mantuvo la técnica de construcción del entrepiso y la cubierta de vigas de madera (Chérres & Peñafiel, 2000).

**- Década de 1960**

Debido a que en la década del 60 se instaló la fábrica del cemento Guapán en la ciudad de Azogues, las personas de altos recursos podían reemplazar las columnas de madera por las de hormigón armado; sin embargo, las paredes se continuaban realizando con cal y los entrepisos de madera (Rivera & Moyano, 2002).

En esta época, se comenzó a emplear las cadenas horizontales de amarre fabricadas de hormigón armado, se disminuyó la altura del entrepiso a un rango entre 3 m. y 4 m. y aumentó el uso del ladrillo como material de construcción, utilizando un espesor de las paredes en un rango de 20 a 30 cm (Chérres & Peñafiel, 2000).

**- Década de 1970**

Se reemplaza en gran medida las construcciones de adobe por el uso exclusivo del ladrillo para la construcción de las paredes con un espesor de 15 a 20 cm en conjunto con las cadenas horizontales y verticales de hormigón (mampostería confinada), para el entrepiso se comenzó a utilizar el sistema de losa de hormigón y la altura disminuyó un rango de 2.5 a 3 m (Jiménez et al., 2018).

**-Década de 2000**

Se produce un cambio en la arquitectura de Cuenca, debido a que se tuvieron que realizar intervenciones en las edificaciones para realizar el respectivo mantenimiento y rehabilitación de las edificaciones antiguas (Jiménez et al., 2018); sin embargo, la Ordenanza del Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca (2009) considera la necesidad de implementar medidas específicas para la conservación de las estructuras del CHC.

Gracias a la historia constructiva de Cuenca nos permite tener un previo conocimiento sobre la variabilidad de las características constructivas tanto en la distribución de sus interiores, número de plantas existentes, alturas de entrepiso, espesor de la pared, materiales, etc., cuyos parámetros nos permiten tener una mejor perspectiva para la elección de las estructuras que mejor representan al CHC.

#### 1.4 Lineamientos para la caracterización de las estructuras del CHC

Este trabajo se enfoca al estudio de las estructuras de mampostería no reforzada que trabajan con entrepiso flexible, ya que son de mayor predominancia en el Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca.

Según la Municipalidad de Cuenca (2011) en el Centro Histórico existen 9932 edificaciones emplazadas en un área de 482.25 ha, de las cuales hemos subdividido según su área de construcción en:

- Pequeñas con un rango entre 30 a 130 m<sup>2</sup>,
- Medianas con un rango entre 130 a 230 m<sup>2</sup> y
- Grandes con un rango entre 230 a 400 m<sup>2</sup>.

Con este contexto se escogieron tres edificaciones que se consideran, que mejor representan a todas las viviendas, ya que poseen ciertas características comunes como:

- Las paredes son consideradas como elementos estructurales.
- La fachada frontal se caracteriza por tener numerosas puertas y ventanas.
- Paredes comprendidas de ladrillo con un espesor de 15 cm.
- Por sus características constructivas, las paredes se comportan de manera independiente, es decir, trabajan en el plano fuera de falla conocida como fallas locales.
- Los ambientes de las viviendas son de forma rectangular, guardando una relación entre el largo y ancho de 2 a 1 con el fin de generar una simetría mayor en la distribución del diseño (Aguirre et al., 2016).
- La disposición interior de los ambientes es de tal forma que permite un movimiento continuo, otorgando accesos alternativos (Aguirre et al., 2016).
- La mayoría de las viviendas del CHC poseen patios centrales, con el fin de mejorar las condiciones de habitabilidad, brindando una mejor iluminación y ventilación (Rivera & Moyano, 2002).
- Los entrepisos están compuestos por madera de entablado simple (eucalipto), brindando la característica de flexibilidad a la estructura (Patiño, 2014).
- Por lo general la altura de los entrepisos es de 3m.
- Un sistema tradicional de cubierta (madera con teja artesanal) con una inclinación superior al 60% para controlar la lluvia, permitiendo evacuar de mejor forma el agua (Aguirre et al., 2016).

- En el año 2016 se realizó un estudio que recopiló 1153 registros de información de los materiales que están conformadas las viviendas del CHC, determinando que el enchalecado de carrizo y barro es el material predominante que se utilizaba para el cielo raso y servía de impermeabilizante para las cubiertas fabricadas de madera con revestimiento de teja y para el entrepiso el material empleado era la madera (Caldas & Sigcha, 2017).

## **1.5 Materiales de construcción de las estructuras del CHC**

### **1.5.1 Adobe**

El adobe se elabora de forma artesanal y está compuesto por tierra, fibras naturales y agua. Debido a su bajo costo de producción y poca exigencia física para su elaboración, este material se popularizó en la Cuenca antigua (Aguilar & Quezada, 2017).

En la tesis realizada por Caldas y Sigcha en el año 2017, se observan las siguientes ventajas que brinda el adobe:

- Alta resistencia a la compresión.
- Es amigable con el medio ambiente.
- Actúa como aislante térmico y acústico.

#### **1.5.1.1 Características mecánicas del adobe**

En el trabajo de titulación “Caracterización física y mecánica del adobe en el cantón cuenca”, se realizó ensayos técnicos de carácter físico y mecánico a muestras de adobe tomados de tres distintas fábricas y de dos edificaciones patrimoniales del cantón Cuenca (Aguilar & Quezada, 2017). Obteniendo valores para compresión, flexión y tracción indirecta del adobe:

- **Resistencia a la compresión del adobe**

Es el esfuerzo máximo que puede soportar el adobe bajo una carga de aplastamiento antes de que esté presente fisuración.

De los resultados obtenidos (Tabla 1.1) se observa que los bloques de adobe no presentan un comportamiento similar entre cada una de las fábricas analizadas.

Tabla 1.1 Resistencia a la compresión del adobe.

Muestra	Ancho [mm]	Largo [mm]	Alto [mm]	Fuerza máx. [N]	Esfuerzo máx. [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]
Adobera 1	118,98	117,35	107,01	15864	1,24	28,92
Adobera 2	98,71	98,83	98,83	10487	1,16	41,28
Adobera 3	93,35	94,04	100,12	5281	0,61	17,40
Edificación 1	100,08	101,4	100,71	5232	0,62	17,00
Edificación 2	95,01	99,83	99,36	12446	1,44	68,50

Fuente: Aguilar & Quezada, 2017.

- **Resistencia a tracción indirecta del adobe**

“El ensayo de tracción indirecta consiste en someter al adobe a una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales, provocando que fracase a cortante” (Aguilar & Quezada, 2017, p. 57), cuyos resultados se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Resistencia a la tracción indirecta del adobe.

Muestra	Ancho [mm]	Largo [mm]	Alto [mm]	Diagonal [mm]	Fuerza máx. [N]	Esfuerzo máx. [MPa]
Adobera 1	228.1	567.2	570.9	804.8	3803	0.029
Adobera 2	204.9	568.5	562.5	799.9	4925	0.021
Adobera 3	204.9	561.2	540.2	779	4050	0.018

Fuente: Aguilar & Quezada, 2017.

Durante el ensayo se pudo observar que los muretes sufren grandes deformaciones para pequeños aumentos de cargas.

- **Resistencia a flexión del adobe**

Este ensayo consiste en aplicar una carga perpendicular en dos puntos en el sentido longitudinal del adobe, asegurando que el material fracase simplemente a flexión (Aguilar & Quezada, 2017).

En la Tabla 1.3 se puede observar que el adobe presenta una baja resistencia a flexión en relación a la resistencia a compresión.

Tabla 1.3 Resistencia a la flexión del adobe.

Muestra	Ancho [mm]	Largo [mm]	Alto [mm]	Fuerza máx. [N]	Esfuerzo máx. flexion [MPa]	Modulo de elasticidad [MPa]	Porcentaje resistencia a flexion con respecto a compresion
Adobera 1	192.8	395.1	134.2	3098	3.00E-01	1.24	24.18%
Adobera 2	202.5	402.5	183.8	4249	2.03E-05	1.16	0.00%
Adobera 3	202.8	411.3	171.5	3622	3.38E-05	0.61	0.01%
Edificacion 1	192.8	395.1	134.2	3098	5.34E-05	0.62	0.01%
Edificacion 2	244.3	498.8	135	1311	1.18E-01	1.44	8.19%

Fuente: Aguilar & Quezada, 2017.

En los últimos 20 años, la mayoría de estructuras de adobe han sido modificadas parcialmente o en su totalidad por materiales modernos como el ladrillo; sin embargo, es importante mencionar las características mecánicas que posee este material, debido a que en la actualidad existe un porcentaje menor de edificaciones conformadas por adobe.

### 1.5.2 Ladrillo

El ladrillo es un elemento constructivo de color anaranjado que tiene forma de un prisma rectangular, y su componente principal es la arcilla que trabaja en conjunto con la illita, caolín y otros minerales.

El ladrillo se introdujo en Cuenca en el año 1565 y en la actualidad es un material indispensable en la construcción. En Cuenca existen diversas fábricas artesanales que lo producen siendo el ladrillo tipo panelón el más comercializado en nuestro medio y el cual se adoptará para nuestro caso de estudio (Caldas & Sigcha, 2017).

En la tesis realizada por Caldas y Sigcha en el año 2017, se observan las siguientes ventajas que brinda el ladrillo:

- Actúa como aislante térmico y acústico.
- Posee un bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Buena resistencia a la compresión.

### 1.5.2.1 Características mecánicas del ladrillo

- **Resistencia a la compresión y flexión del ladrillo**

La resistencia a compresión y flexión del ladrillo se obtiene mediante ensayos de laboratorio que consiste en aplicar una carga progresiva a una muestra de ladrillo, hasta obtener su resistencia máxima.

Bravo y Flores (2015) realizaron un estudio a ladrillos tipo panelón de diferentes fábricas ubicadas a las afueras de la ciudad de Cuenca, obteniendo los siguientes resultados que se detallan en la Tabla 1.4

Tabla 1.4 Resistencia a compresión y a flexión de ladrillos panelones.

Ladrillos comunes		
Tipo de ladrillo	Compresión [MPa]	Flexión [MPa]
Panelón (Sinincay)	9.1	1.1
Panelón (Racar)	5.5	0.7
Panelón (Caleras)	10.3	1.1

Fuente: Bravo & Flores, 2015.

- **Resistencia a la tracción del ladrillo**

La resistencia a la tracción es una importante consideración para evaluar el agrietamiento de las paredes de mampostería. Se puede calcular a partir de la resistencia a la compresión con la siguiente fórmula  $f_t = 0.026f'_c$  (Schubert, 1994).

- **Módulo de elasticidad de la mampostería de ladrillo**

Es un parámetro que caracteriza el comportamiento elástico de un material y se puede calcular mediante ensayos experimentales de tracción.

En la Tabla 1.5 se presenta el rango en el cual se encuentra el módulo de elasticidad para ladrillos tipo panelón de la ciudad de Cuenca, obtenido por Bravo y Flores en el año 2015.

Tabla 1.5 Módulo de elasticidad de la mampostería del ladrillo.

Módulo de elasticidad [Mpa]	
Ladrillo panelón	3000-5000

Fuente: Bravo & Flores, 2015.

En nuestro caso de estudio consideramos que las viviendas prototipo están conformadas de ladrillo, dado que, este es el material predominante en las viviendas del CHC.

Las características mecánicas del ladrillo como módulo de elasticidad obtenidas mediante la revisión de diferentes fuentes bibliográficas, nos servirán de referencia para comparar con los resultados obtenidos a través de ensayos de campo utilizando el esclerómetro, detallados en el capítulo II. La resistencia a la flexión y a la tracción serán utilizados en el capítulo IV para la verificación de la capacidad sísmica de las paredes.

### 1.5.3 Madera

La madera es un material utilizado en la construcción desde hace varios años por el hombre y se obtiene del tronco de un árbol.

Según la dureza, las maderas se clasifican en:

- **Maderas blandas.-** Son los que provienen de árboles de rápido crecimiento como el pino o ciprés.
- **Maderas duras.-** Son los que provienen de árboles de lento crecimiento como el roble o el eucalipto.

En la tesis realizada por Caldas y Sigcha en el año 2017, se observan las siguientes ventajas que brinda la madera:

- Facilidad de obtención en las zonas andinas.
- Alta resistencia a los esfuerzos externos.
- Puede utilizarse en pisos, cubiertas, puertas, ventanas, vigas y columnas.
- Posee una alta durabilidad.
- Adaptable al diseño.

#### 1.5.3.1 Características mecánicas de la madera

Las características de la madera en cuanto a la resistencia y a la rigidez varían según la especie del árbol, condiciones de crecimiento, cambios climáticos, densidad y de los defectos de cada pieza (NEC-SE-MD, 2015).



- **Densidad**

La NEC-SE-MD (2015) divide a la madera, según la densidad básica (DB) en 3 grupos estructurales:

- ‘Grupo A’ DB entre 0.71 y 0.9.
- ‘Grupo B’ DB entre 0.56 y 0.7.
- ‘Grupo C’ DB entre 0.4 y 0.55.

Una vez determinado el grupo estructural de la madera en el que se va a trabajar, se definen las propiedades mecánicas de la madera.

- **Esfuerzos admisibles**

En la Tabla 1.6 observamos los esfuerzos admisibles correspondientes a cada grupo:

Tabla 1.6 Esfuerzos admisibles para la madera.

ESFUERZOS ADMISIBLES [MPa]					
Grupo	Flexión	Tracción paralela	Compresión paralela	Compresión perpendicular	Corte paralelo
	$f_m$	$f_t$	$f_c$	$f_{cd}$	$f_v$
A	21	14	14.5	4	1.5
B	15	10.5	11	2.8	1.2
C	10	7.5	8	1.5	0.8

Fuente: NEC-SE-MD, 2015.

- **Módulo de elasticidad**

En la Tabla 1.7 observamos el módulo de elasticidad correspondiente a cada grupo estructural de la madera:

Tabla 1.7 Módulo de elasticidad para la madera.

Módulo de elasticidad [Mpa]		
Grupo	$E_{min}$	$E_{promedio}$
A	9500	13000
B	7500	10000
C	5500	90000

Fuente: NEC-SE-MD, 2015.

El Eucalipto se encuentra fácilmente a lo largo de toda la región interandina del país, poseen una buena resistencia y una dureza media-alta (Caldas & Sigcha, 2017), por lo que ha sido utilizado como material de construcción predilecto para la mayoría de viviendas del CHC, por esta razón, se usaran sus propiedades mecánicas para este estudio.

Se consideró el grupo estructural de madera A, ya que el Eucalipto posee una densidad en un rango entre 0.73 y 0.8 otorgándole un módulo de elasticidad de 13000 MPa.

Definir las tipologías más comunes como: dimensiones en elevación y en planta, tamaño de los elementos estructurales, propiedades mecánicas de los materiales y el tipo de entrepiso, es el primer paso para obtener la vulnerabilidad sísmica de dichos edificios, con estos datos se determinarán tres viviendas que cumplan en un gran porcentaje con las características mencionadas en este capítulo, y así proseguir con la modelación de las mismas.

## **CAPITULO II MODELACIÓN DE LOS PROTOTIPOS DE LAS VIVIENDAS DEL CHC**

### **2.1 Introducción-**

La modelación de las estructuras ha avanzado considerablemente a través del tiempo, es así que en la actualidad existe una gran cantidad de programas que permiten idealizarlos para obtener un modelo ajustado a la realidad.

En este capítulo se seleccionaron tres viviendas representativas del CHC para estudiarlas y analizarlas siguiendo un proceso de modelación, teniendo en cuenta ciertos parámetros como: geometría, características de los materiales obtenidas a través de ensayos realizados en campo y revisión de fuentes bibliográficas, asignación de cargas y condiciones de borde según la configuración estructural de cada vivienda; por esta razón, es importante contar con información veraz sobre cada estructura, para tener resultados que representen al edificio. El programa escogido para este objetivo es Stab3D 3.0, que es una caja de herramientas para elementos finitos fabricado en el año 2014 por el departamento de ingeniería civil de la Universidad Católica de Leuven, el cual nos ayudará a representar los parámetros antes mencionados, con el fin de obtener la matriz de masa y rigidez.

### **2.2 Definición de las viviendas prototipo**

En base a los requerimientos expuestos en el capítulo anterior y con la ayuda del proyecto de investigación sobre la vulnerabilidad de las estructuras del CHC que realiza la Universidad del Azuay, se escogieron las siguientes viviendas que representan de mejor manera a la mayor cantidad de viviendas de uso familiar del CHC.

### 2.2.1 Prototipo de vivienda pequeña

Se escogió la casa de la Sra. Jessica Viviana Jarro Lazo para el estudio de vivienda pequeña (Figura 2.1), cuyos datos son los siguientes:

**Clave catastral:** 0702033034000.

**Ubicación:** entre las calles Mariscal Lamar 22-83 y Miguel Morocho.

**Área del terreno:** 101.17 m<sup>2</sup>.

**Coordenadas (WGS84):** Latitud: 2° 53.472'S.

Longitud: 79° 1.072'O



Figura 2.1 Vista frontal de la vivienda pequeña.

Elaboración: Autores.

Esta vivienda fue seleccionada por sus características comunes que se pueden observar en gran cantidad en las casas con área pequeña del CHC. Esta edificación está conformada por paredes de mampostería no reforzada, confinados entre columnas y vigas de hormigón armado, entablado de madera para el entrepiso y un sistema de cubierta artesanal.

La vivienda cuenta con un portal de acceso ubicado estratégicamente en la fachada frontal en la parte derecha, con el objetivo de dar paso a dos departamentos independientes.

El primer departamento ocupa toda la parte frontal de la edificación y está distribuido de la siguiente manera: en la planta baja existen espacios comunes como sala, comedor, cocina, lavandería y las gradas para acceder al segundo piso en la cual están distribuidos tres dormitorios, un hall y un baño (Figura 2.2).

El segundo departamento ocupa toda la parte posterior de la edificación y posee características similares al primer departamento con la diferencia que existen solo dos dormitorios en la planta alta y el espacio es más reducido (Figura 2.2).

Las dimensiones del edificio son: 6.7 m de ancho. 15.1 m de largo y 3 m de alto.

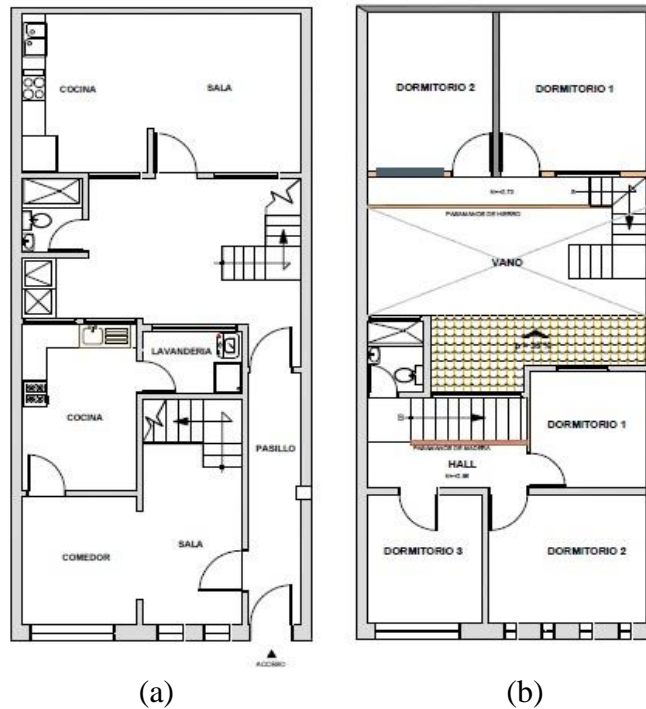


Figura 2.2 Vistas en planta de la vivienda pequeña: (a) planta baja y (b) planta alta.  
Fuente: Área de catastros de Cuenca.

### 2.2.2 Prototipo de vivienda mediana

Para el estudio de vivienda mediana se escogió la casa del Sr. José Eugenio Mora Villagómez (Figura 2.3), cuyos datos son los siguientes:

**Clave catastral:** 0101030028000.

**Ubicación:** entre las calles Juan Montalvo 13-76 y Pio Bravo.

**Área del terreno:** 192 m<sup>2</sup>.

**Coordenadas (WGS84):** Latitud: 2° 53.28.27"S.

Longitud: 79° 0'28.12"O



Figura 2.3 Vista frontal de la vivienda mediana.  
Elaboración: Autores.

Esta casa fue seleccionada como prototipo de vivienda mediana, ya que posee características muy similares a las mencionadas en el capítulo anterior y se consideró que es la que mejor representa a todas las viviendas de tamaño mediano del CHC.

El sistema de construcción es el mismo del prototipo de vivienda pequeña: columnas y vigas de hormigón armado que confinan a las paredes de mampostería no reforzada,

La vivienda es plenamente de uso unifamiliar y está conformada por dos plantas distribuidas de la siguiente forma:

- La primera planta (Figura 2.4a) consta de áreas comunes como: garaje, sala, cocina, comedor, estudio, lavandería y adicional a esto un cuarto para usos varios, en este caso como planchador.
- La segunda planta (Figura 2.4b) consta de cuatro dormitorios, dos baños, sala de estar, bodega y terraza

Las dimensiones del edificio son: 8 m de ancho. 24 m de largo y 3 m de alto.

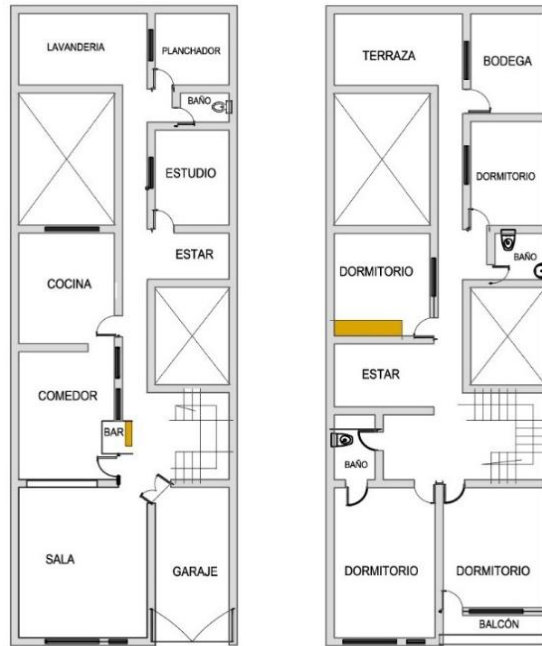


Figura 2.4 Vistas en planta de la vivienda mediana: (a) planta baja y (b) planta alta.  
Fuente: Área de catastros de Cuenca.

### 2.2.3 Prototipo de vivienda grande

Y, para finalizar, se escogió la casa del Sr. Jaime Bolívar Cruz Sigüencia para el estudio de vivienda grande (Figura 2.5), cuyos datos son los siguientes:

**Clave catastral:** 0201018016000.

**Ubicación:** en la calle Federico Guerrero 1-52.

**Área del terreno:** 232.1 m<sup>2</sup>.

**Coordenadas (WGS84):** Latitud: 2°53'33.28"S.

Longitud: 78°59'50.00"O.



Figura 2.5 Vista frontal de la vivienda grande.

Elaboración: Autores.

Esta casa fue seleccionada como prototipo de vivienda grande, ya que posee características muy similares a las mencionadas en el capítulo anterior y se consideró que es la que mejor representa a todas las viviendas de tamaño grande del CHC.

La edificación posee un sistema de construcción parecido al del prototipo de vivienda pequeña y mediana.

La vivienda está conformada por dos plantas distribuidas de la siguiente forma:

- La primera planta (Figura 2.6a) es de pleno uso comercial con fines de brindar un servicio como restaurante. Consta de un garaje, un baño, un hall, cocina y el área destinada a los comedores.
- La segunda planta (Figura 2.6b) consta de dos departamentos, cada una con dos dormitorios, una cocina y un baño.

Las dimensiones del edificio son: 11 m de ancho. 21.1 m de largo y 3 m de alto.





Se utilizaron coordenadas globales para definir cada nodo, teniendo en cuenta que el plano xy corresponde al entrepiso y los planos xz y yz a las paredes.

### 2.3.1.2 Definición de la tipología de los elementos

Para poder realizar el modelo estructural se utilizó el programa Stabil, que trabaja con una serie de funciones que reconocen el tipo de elemento que conforman cada prototipo de vivienda:

- Como se observa en la Figura 2.7 una pared se puede representar utilizando elementos bidimensionales, un elemento se considera como bidimensional cuando una de sus dimensiones es significativamente menor en comparación con sus otras dos, también conocidos como elementos 2D.

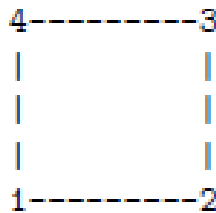


Figura 2.7 Representación de un elemento bidimensional.  
Fuente: Dooms et al., 2014.

Para esto escogimos elementos tipo Shell, el cual puede resistir a flexión, corte y fuerza axial, generando 6 grados de libertad (3 giros y 3 desplazamientos) en cada nodo, dando un total de 24 grados de libertad, como se observa en la Figura 2.8.

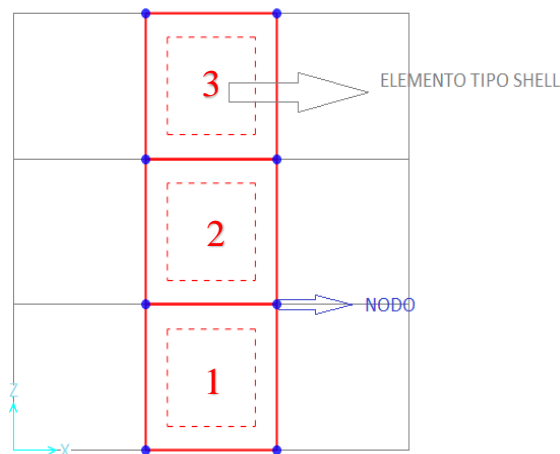


Figura 2.8 Representación de una pared con tres elementos tipo SHELL, el cual está definido por cuatro nodos que son los puntos de color azul.

Elaboración: Autores.  
Fuente: Dooms et al., 2014.

- Para las columnas y las vigas de hormigón del sistema se utilizaron elementos lineales (Figura 2.10). Un elemento se considera como lineal cuando una de sus dimensiones es relativamente mayor que las otras dos.

Para esto, seleccionamos elementos tipo BEAM, el cual puede resistir a corte y fuerza axial, generando 6 grados de libertad (3 giros y 3 desplazamientos), en cada nodo dando un total de 12 grados de libertad, como se observa en la Figura 2.9.

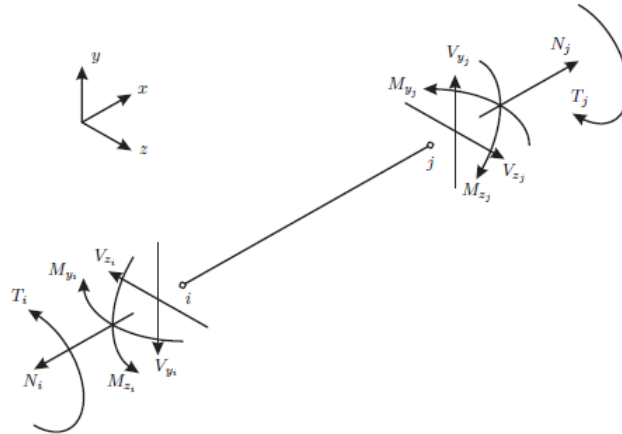


Figura 2.9 Representación de un elemento lineal tipo BEAM.  
Fuente: Dooms et al., 2014.

- El entrepiso de las estructuras está conformado por vigas de madera, por lo que se utilizaron elementos lineales tipo TRUSS (Figura 2.10). Un elemento TRUSS se diferencia del tipo BEAM porque es un elemento celosía y estará sometido a cargas de tracción o compresión.

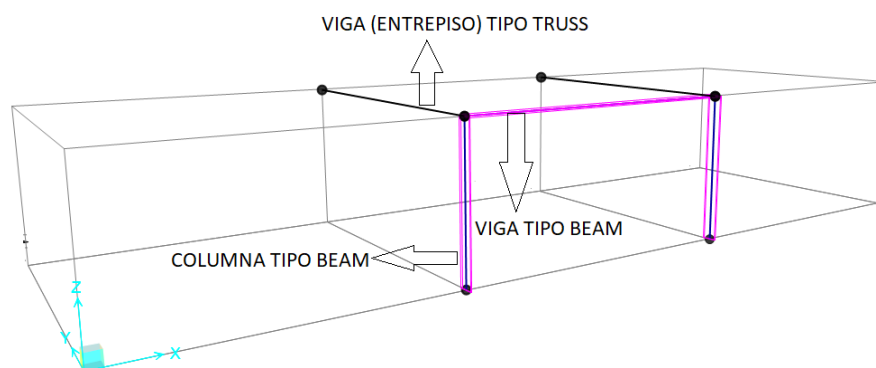


Figura 2.10 Representación de las columnas y las vigas de los prototipos utilizando elementos tipo BEAM y TRUSS, los cuales están definidos por dos nodos.  
Elaboración: Autores.  
Fuente: Dooms et al., 2014.

### **2.3.2 Características de los materiales**

En la visita realizada a cada vivienda se evidenció que los modelos prototipo están conformados por los siguientes materiales de construcción:

- Ladrillo (panelón) para las paredes.
- Hormigón armado para vigas y columnas que confinan la mampostería.
- Madera (eucalipto) para el entrepiso.
- Teja artesanal para la cubierta.

#### **2.3.2.1 Módulo de elasticidad**

Para obtener el módulo de elasticidad de cada material se realizó el ensayo de determinación de la resistencia de compresión o índice de rebote mediante el uso del esclerómetro.

El esclerómetro es un instrumento manual que pesa aproximadamente 2 kg. consiste en una pesa tensada con un muelle, la misma que es lanzada contra el material con el fin de medir la dureza mediante su rebote. Es un método subjetivo, ya que depende de muchos factores como el contenido de humedad de la superficie de la prueba, la textura o tipo de acabado del material, la carbonatación, la fuerza de la persona que realice el ensayo, etc., sin embargo, es muy utilizado ya que no altera la estética y la funcionalidad de la estructura (Sanjuán, 2013).

#### **Procedimiento de la obtención de la resistencia a compresión $f'c$ .**

El procedimiento del ensayo realizado con el esclerómetro, para la obtención de la resistencia a compresión de los materiales es muy fácil de emplear, el cual se explica a continuación:

1. Solicitar el respectivo permiso en las viviendas para realizar el ensayo.
2. Localizar los lugares específicos donde la superficie del material a ensayar sea lisa.
3. Limpiar la superficie de la muestra con el cilindro de hormigón.
4. Realizar dos cuadrículas de 5x5 en el material con una separación mínima de 25 mm, cada una con veinticinco puntos.
5. Colocar el esclerómetro de forma perpendicular en los puntos conformados por la cuadrícula, y empujarlo contra la pared de forma que se libera un resorte.

6. Empujar gradualmente el instrumento hacia la superficie de la prueba mientras se presiona el botón de bloqueo y de esta forma generar un impacto (rebote) contra la superficie del material.
7. Se lee la respuesta del rebote en una escala que varía de 10 a 100, cuyo dato es adimensional.
8. Una vez obtenido el valor del rebote y la posición del esclerómetro lo buscamos en la Figura 2.11, observamos en qué punto se intersecta y de esta forma obtenemos el valor de la resistencia a la compresión del material, siendo el eje de las x el rebote y el eje de las y el valor de  $f'c$ .

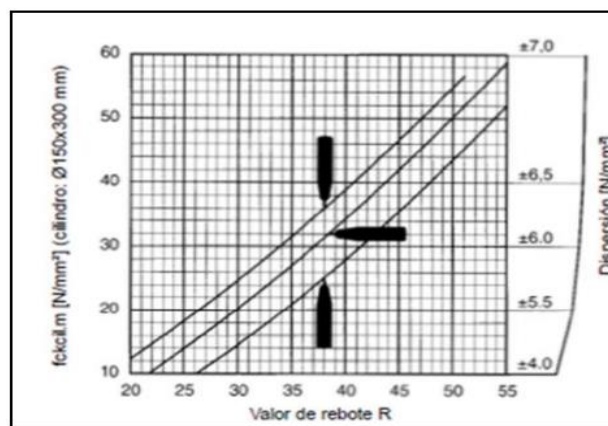


Figura 2.11 Curvas de conversión para el ensayo con el esclerómetro.  
Fuente: Sanjuán, 2013.

### Resultados del ensayo de la obtención de la resistencia a compresión $f'c$ .

Para mayor exactitud, se tomaron 50 puntos para cada material en cada vivienda prototipo en estudio, de los cuales se realizó un promedio, dando como resultado lo siguiente:

- **Prototipo de vivienda pequeña**
  - Del ladrillo se obtuvo un  $f'c$  de 19.45 MPa.
  - Del hormigón se obtuvo un  $f'c$  de 30.68 MPa.
- **Prototipo de vivienda mediana**
  - Del ladrillo se obtuvo un  $f'c$  de 19.65 MPa.
  - Del hormigón se obtuvo un  $f'c$  de 32.15 MPa.
- **Prototipo de vivienda grande**
  - Del ladrillo se obtuvo un  $f'c$  de 18.78 MPa.
  - Del hormigón se obtuvo un  $f'c$  de 31.84 MPa.

Para calcular el módulo de elasticidad de cada material se consideró el enfoque empírico mencionado en la norma ecuatoriana de la construcción (NEC), cuyas fórmulas están en función de la resistencia a la compresión del material (NEC, 2015).

Según la NEC-SE-MP (2015), la fórmula del módulo de elasticidad de la mampostería en arcilla es la siguiente:

$$E_m = 750 * \sqrt{f'c} \leq 20000 \text{ MPa} \quad (2.1)$$

Donde:

$E_m$  = Módulo de elasticidad de la mampostería (MPa).

$f'c$  = Resistencia a la compresión de la mampostería (MPa).

Según la NEC-SE-HM (2015) la fórmula del módulo de elasticidad del hormigón es la siguiente:

$$E_c = 4.7 * \sqrt{f'c} \quad (2.2)$$

Donde:

$E_c$  = Módulo de elasticidad del hormigón (GPa).

$f'c$  = Resistencia a la compresión del hormigón (MPa).

Reemplazamos el valor de  $f'c$  de cada material en las ecuaciones (2.1) y (2.2), y se determinó lo siguiente:

- **Prototipo de vivienda pequeña**
  - El módulo de elasticidad del ladrillo es 3307.66 MPa.
  - El módulo de elasticidad del hormigón es 26.033 GPa.
  - El módulo de elasticidad de la madera es 13000 MPa.
- **Prototipo de vivienda mediana**
  - El módulo de elasticidad del ladrillo es 3324.62 MPa.
  - El módulo de elasticidad del hormigón 26.65 GPa.
  - El módulo de elasticidad de la madera es 13000 MPa.

- **Prototipo de vivienda grande**

- El módulo de elasticidad del ladrillo es 3250.19 MPa.
- El módulo de elasticidad del hormigón 26.52 GPa.
- El módulo de elasticidad de la madera es 13000 MPa.

### 2.3.2.2 Coeficiente de poisson y densidad

En base a la experiencia de ingenieros estructurales de Cuenca, se han considerado los siguientes valores para el coeficiente de poisson ( $\nu$ ) y densidad ( $\rho$ ), que se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de los materiales de las viviendas prototipo.

Material	$\nu$ [-]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]
Ladrillo	0.1	2000
Hormigón	0.2	2400
Madera	0.25	750

Elaboración: Autores.

Fuente: Experiencia de ingenieros estructurales de Cuenca.

Estos resultados se pueden comparar con los mostrados en capítulo I de la siguiente manera:

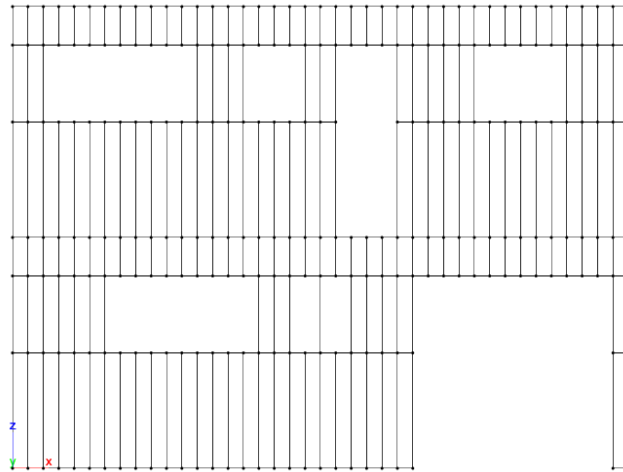
- La resistencia a compresión del ladrillo a partir del uso del esclerómetro nos da resistencias mucho mayores que las mostradas por Bravo y Flores, debido a que el esclerómetro es un ensayo no destructivo, por el contrario, Bravo y Flores usaron pruebas con cargas destruyendo el material.
- El módulo de elasticidad para la mampostería de ladrillo calculado en función de la resistencia a compresión, cumple con el rango expuesto por Bravo y Flores (2015) de acuerdo a ensayos realizados a ladrillos tipo panelón en la ciudad de Cuenca.

Una vez cargados todos los datos en el programa Stabil, se obtiene los siguientes modelos prototipo, que se muestran en las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14.

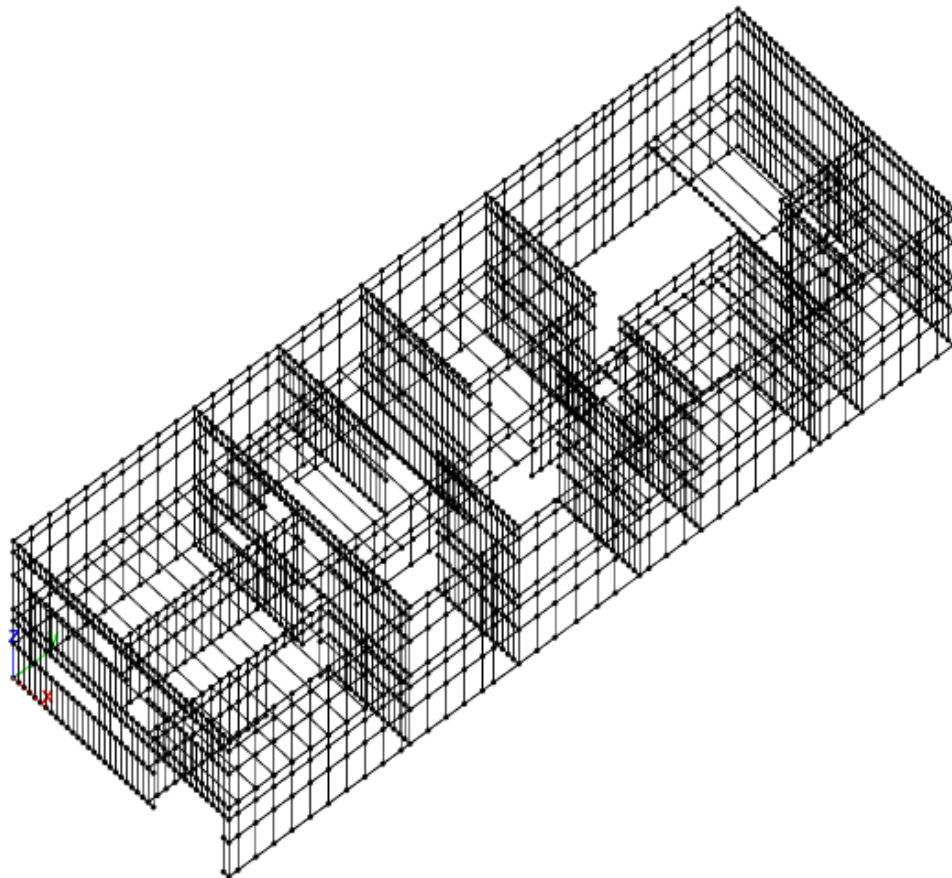




- **Prototipo de vivienda mediana**



(a)

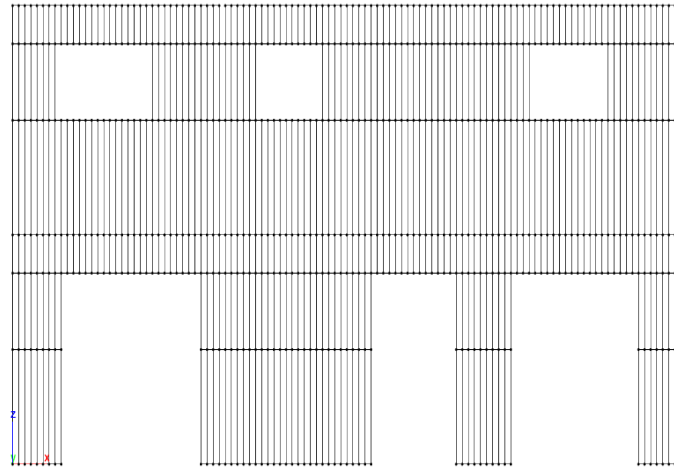


(b)

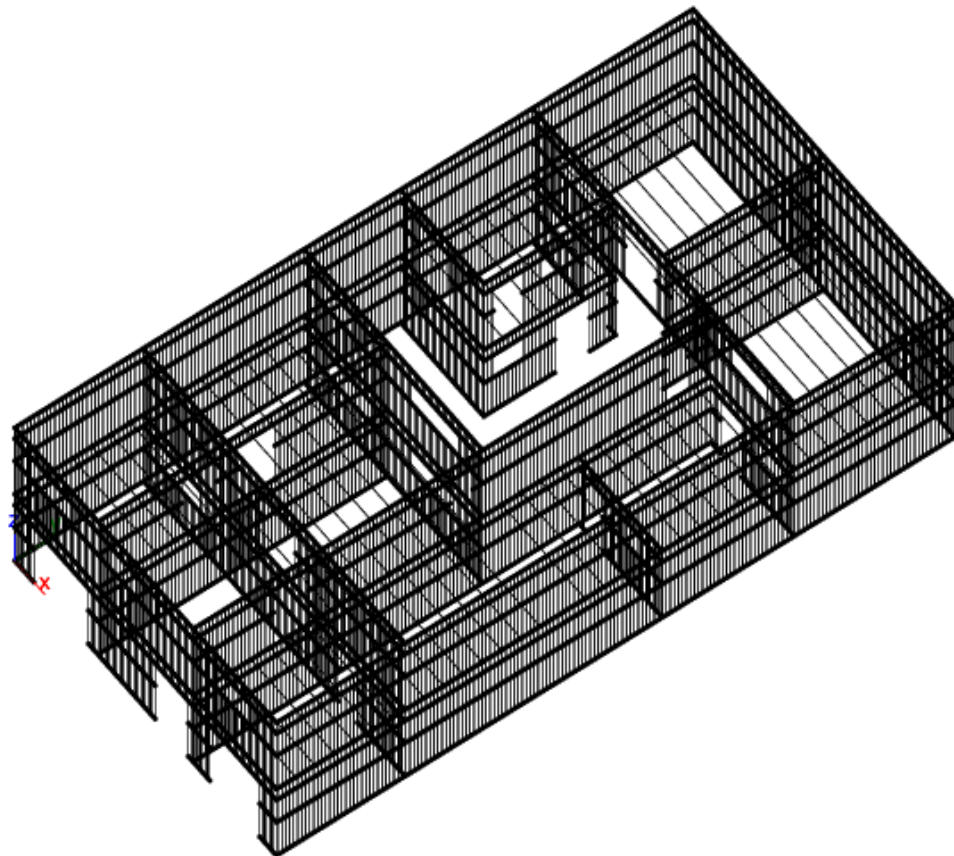
Figura 2.13 Modelo discretizado mediante elementos finitos a través del programa Stab3d para la vivienda mediana de la ciudad de Cuenca: (a) vista frontal y (b) vista en 3D.  
Elaboración: Autores.

La vivienda mediana se modeló con 2104 elementos tipo SHELL con un  $e=15$  cm, 591 elementos tipo BEAM con una sección de  $(20 \times 15)$  y  $(18 \times 15)$  cm para columnas y vigas respectivamente y 51 elementos tipo TRUSS con un radio de 10 cm.

- **Prototipo de vivienda grande**



(a)



(b)

Figura 2.14 Modelo discretizado mediante elementos finitos a través del programa Stabll para la vivienda grande de la ciudad de Cuenca: (a) vista frontal y (b) vista en 3D.  
Elaboración: Autores.

La vivienda grande se modelo con 7241 elementos tipo SHELL con un  $e=15$  cm, 902 elementos tipo BEAM con una sección de (20x15) y (18x15) cm para columnas y vigas respectivamente y 65 elementos tipo TRUSS con un radio de 10 cm.

### 2.3.3 Definición de las cargas

- **Cimentación**

En la cimentación de la estructura no se consideró cargas.

- **Entrepiso**

Para el entrepiso se consideró una carga viva y se tomó el valor que presenta la NEC-SE-CG (2015) para la ocupación de residencias de viviendas (unifamiliares y bifamiliares) con un valor de 2 KN/m<sup>2</sup>.

Como se muestra en la Figura 2.15 el entrepiso se encuentra distribuido de la siguiente manera:

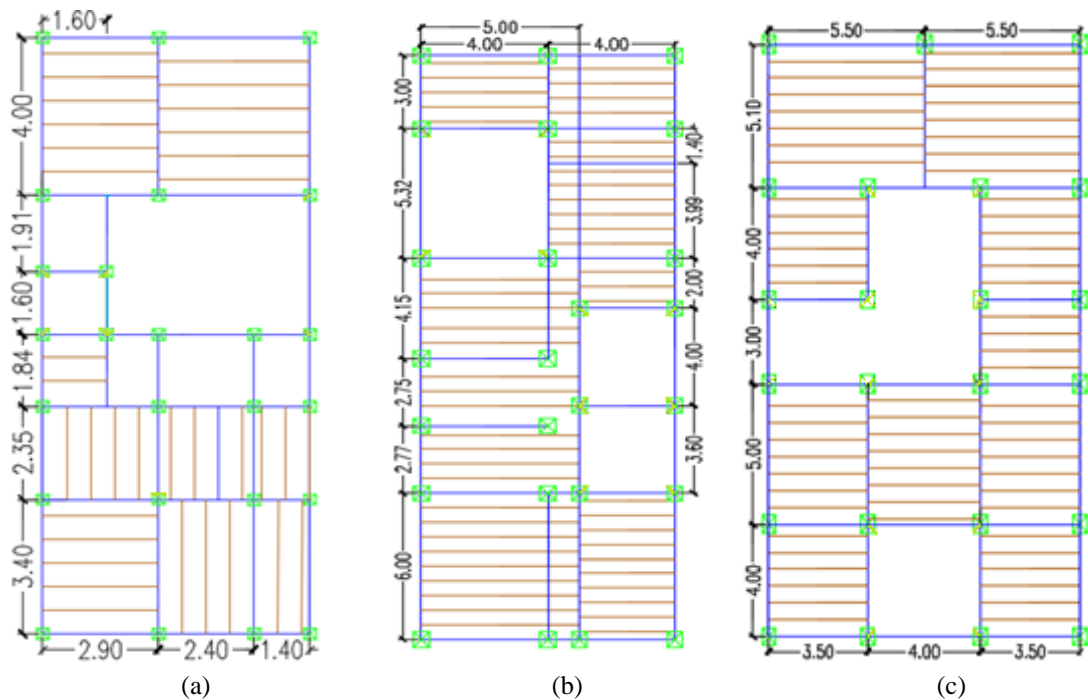


Figura 2.15 Vista en planta del entrepiso de las viviendas: (a) pequeña, (b) mediana y (c) grande. Las líneas de color azul representan a las vigas de hormigón armado que soportan a las paredes de la segunda planta y a las vigas de madera que se representan mediante las líneas de color café, las cuales se colocaron en la dirección del lado menor. Las columnas se representan mediante los cuadrados de color verde.

Elaboración: Autores.

Fuente: Área de catastros de Cuenca.

- **Cubierta**

La cubierta se consideró como carga muerta, según indica el trabajo de titulación “Análisis estático no lineal de paredes de ladrillo de las casas de Cuenca” y considera el peso del material de una teja de 3 cm. de espesor usado en las edificaciones de Cuenca con un valor de 60 Kg/m<sup>2</sup> (Bravo & Flores, 2015).

### 2.3.4 Condiciones de contorno

- Para la cimentación de las viviendas se consideró que en los nodos de la planta baja se colocaron apoyos fijos generando giro libre y quedando restringidos los desplazamientos en la dirección x, y y z.
- Por el tipo de sistema estructural, las vigas del entrepiso juegan un papel muy importante en el modelado (Figura 2.15), ya que, en la realidad no existe continuidad entre las vigas del entrepiso y la pared sobre las cuales se encuentran apoyadas.

Un elemento lineal y un elemento bidimensional se encuentra simplemente apoyados el uno con el otro, en consecuencia, no van a transmitirse momentos, por lo tanto tendrán giros independientes, esta condición se logra representar por medio del constrains, para cada elemento lineal que se apoye sobre la pared.

### 2.3.5 Resultados del modelado

Aplicando las características geométricas de las estructuras, características mecánicas de los materiales, tipos de cargas y condiciones de borde se determinó la matriz de masa y matriz de rigidez de cada modelo, teniendo en cuenta que el tamaño de cada matriz indica el número de grados de libertad que posee cada estructura, dando como resultado que:

- La vivienda pequeña posee 30552 grados de libertad.
- La vivienda mediana posee 15270 grados de libertad, y
- La vivienda grande posee 49980 grados de libertad.

Una forma de comprobar que cada modelo está correctamente idealizado es obtener la determinante de la matriz de rigidez de cada estructura, cuyo valor debería ser infinito, lo que nos indica que todos los nodos están unidos con sus respectivos elementos y el número de ecuaciones es igual al número de variables.

## CAPITULO III ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### 3.1 Introducción

El análisis estructural es la predicción del desempeño de una estructura ante las cargas establecidas y/o cargas accidentales, por lo tanto, la capacidad de respuesta implica la determinación de esfuerzos, deflexiones a causa de una condición de carga (Kassimali, 2015).

En este capítulo se realiza un análisis modal para determinar las propiedades de vibración natural de cada prototipo de vivienda (frecuencia, periodo y modos de vibrar), y análisis espectral con el fin de obtener la fuerza sísmica que actúa en cada una de ellas mediante el espectro de diseño de aceleración para la ciudad de Cuenca, estos parámetros nos ayudan a entender el comportamiento de las estructuras frente a un posible evento sísmico.

### 3.2 Metodología

Con el fin de determinar las paredes más vulnerables, y posteriormente, revisar su capacidad en el plano como fuera del plano, se realizó un análisis modal para conocer la respuesta dinámica, el cual se resume a continuación como una secuencia de pasos (Chopra, 2014):

- 1) Definir las propiedades estructurales (masa y rigidez).
- 2) Determinar las propiedades de vibración natural y los modos naturales de vibración.
- 3) Calcular los factores de contribución modal.
- 4) Calculo de la fuerza sísmica.

### 3.3 Análisis Modal

#### 3.3.1 Propiedades de vibración natural

Las propiedades de vibración natural y modos naturales de vibrar son parámetros propios que poseen cada estructura, únicas e irrepitibles, dependen directamente del tamaño de la matriz de rigidez y masa de la estructura, existen tantos, como grados de libertad posea una estructura (Chopra, 2014).

Las propiedades de vibración natural para un sistema de un grado de libertad son:

- Frecuencia circular natural de vibración ( $\omega_n$ ), cuyas unidades son rad/s.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3.1)$$

- El período natural de vibración ( $T_n$ ), cuyas unidades son los segundos.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (3.2)$$

- Frecuencia cíclica natural de vibración ( $F_n$ ). Las unidades de  $F_n$  son hertz (Hz).

$$F_n = \frac{1}{T_n} \quad (3.3)$$

Para cada período natural el sistema alcanza una determinada forma, estas se conocen como modos de vibración natural ( $\phi_n$ ), una estructura se estudia analizando estos modos que pueden ser excitados de forma vertical, horizontal, rotacional o en su defecto una combinación de estos, obteniendo movimientos diferentes en cada modo. (Chopra, 2014).

La cantidad de modos a estudiar depende del porcentaje de participación de masa, para estructuras con entrepiso rígido se considera una participación de modos mayor al 90% y para estructuras con entrepiso flexible que la frecuencia esté en un rango de 0 a 10 Hz, ya que valores mayores a 10 Hz no se dan por cargas sísmicas.

### **Resultados generales del análisis modal**

Las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 muestran que para cada prototipo de vivienda los modos de vibrar se excitan de forma bidireccional, es decir sus componentes actúan en la dirección x como en la dirección y, ocasionando posibles fallas en el plano como fuera de plano. Además se observan en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 que existe una poca participación de masa en cada modo de vibrar, dado que, la configuración estructural de las viviendas poseen entrepiso de madera, es decir las vigas de madera se encuentran

simplemente apoyadas sobre la mampostería, por este motivo, existe una conexión pobre entre elementos, y cada pared trabaja de forma independiente, este parámetro se consideró en las condiciones de borde para el modelado de la estructura.

Por el contrario, en una estructura con entrepiso rígido la mayor cantidad de masa se encuentra concentrada sobre la losa, por lo tanto, incrementa la resistencia global lateral, por ello, se encuentra una gran participación de masa en los primeros modos, haciendo de estos los más importantes.

- **Prototipo de vivienda pequeña**

La Tabla 3.1 resume las propiedades de vibración natural para el prototipo de vivienda pequeña:

Tabla 3.1 Propiedades de vibración natural del prototipo de vivienda pequeña.

Modo	$\omega$ [rad/s]	T [s]	F [Hz]	Participación de masa [%]
1	46,69	0,135	7,43	0,52
2	55,87	0,112	8,89	16,34
3	55,87	0,112	8,89	0,47
4	58,83	0,107	9,36	12,00
5	61,58	0,102	9,80	2,53
6	69,04	0,091	10,99	0,46
7	73,03	0,086	11,62	0,03
8	75,24	0,083	11,98	4,80
9	77,79	0,081	12,38	5,49
10	81,71	0,077	13,00	2,96

Se consideró para el análisis los 10 primeros modos de vibrar con su respectiva participación de masa.  
Elaboración: Autores.

En la Tabla 3.1 observamos que del sexto modo en adelante las frecuencias son mayores a 10 Hz, en consecuencia los descartamos y se van a analizar los 5 primeros modos para este prototipo.

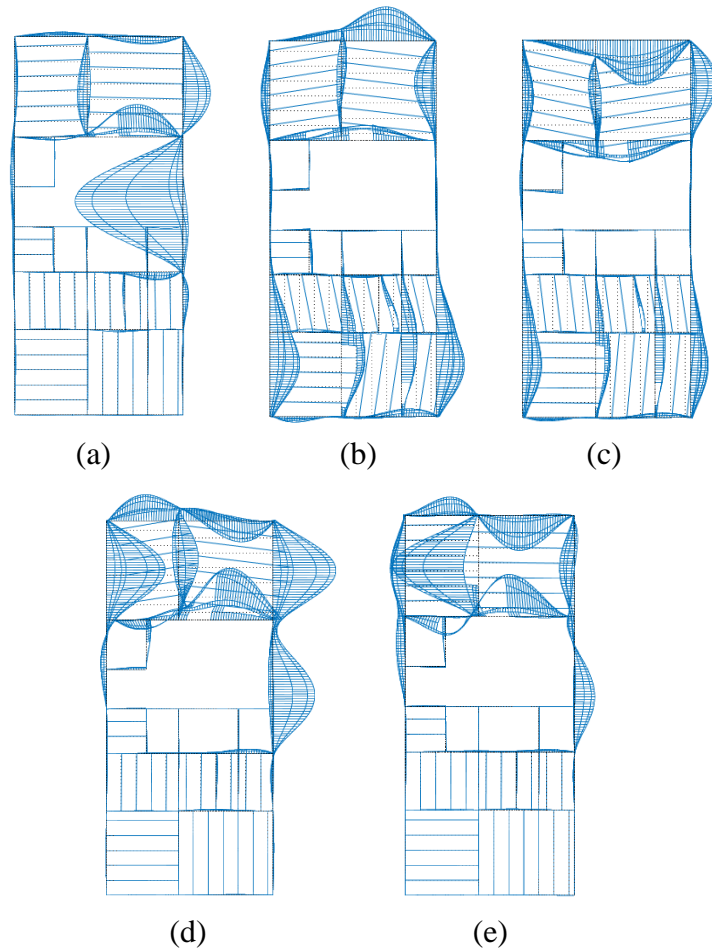


Figura 3.1 Modos de vibrar del prototipo de vivienda pequeña: (a) primer modo, (b) segundo modo, (c) tercer modo, (d) cuarto modo y (e) quinto modo.  
Elaboración: Autores.

La Figura 3.1a corresponde al primer modo de vibrar, en donde existe una mayor excitación en la parte lateral derecha de la vivienda en comparación con las otras paredes, lo que indicaría un posible fracaso de esta pared. Sin embargo también se observa que existe un movimiento de menor intensidad en la parte posterior de la vivienda.

La Figura 3.1b y 3.1c presentan un comportamiento similar, donde se excitan la parte frontal y posterior de la estructura, sin embargo el segundo modo posee un mayor porcentaje de masa que el tercer modo, indicando que el modo más relevante en este caso sería el segundo.



La Figura 3.1d y 3.1e presentan un comportamiento similar, donde se excita la parte posterior de la estructura, sin embargo el cuarto modo posee un mayor porcentaje de masa que el quinto modo, indicando que el modo más relevante en este caso es el cuarto.

En la Figura 3.1 se observa que existe mayor número de modos de vibrar que excitan la parte posterior de la vivienda pequeña, evidenciando que estas zonas son las más vulnerables frente a un evento sísmico.

- **Prototipo de vivienda mediana**

La Tabla 3.2 resume las propiedades de vibración natural para el prototipo de vivienda mediana:

Tabla 3.2 Propiedades de vibración natural del prototipo de vivienda mediana.

Modo	$\omega$ [rad/s]	T [s]	F [Hz]	Participación de masa [%]
1	28,73	0,219	4,57	1,69
2	31,72	0,198	5,05	0,08
3	33,80	0,186	5,38	5,20
4	43,28	0,145	6,89	0,36
5	44,56	0,141	7,10	0,08
6	47,28	0,133	7,53	0,58
7	47,83	0,131	7,61	1,71
8	52,35	0,12	8,33	4,32
9	54,52	0,115	8,68	1,82
10	54,94	0,114	8,74	1,64
11	56,44	0,111	8,98	0,28
12	65,92	0,095	10,50	0,10
13	66,10	0,095	10,52	6,20
14	66,98	0,094	10,66	0,24
15	67,86	0,093	10,80	0,01

Se consideró para el análisis los 15 primeros modos de vibrar con su respectiva participación de masa.  
Elaboración: Autores.

En la Tabla 3.2 observamos que del décimo segundo modo en adelante las frecuencias son mayores a 10 Hz, en consecuencia los descartamos y se van a analizar los 11 primeros modos para este prototipo.

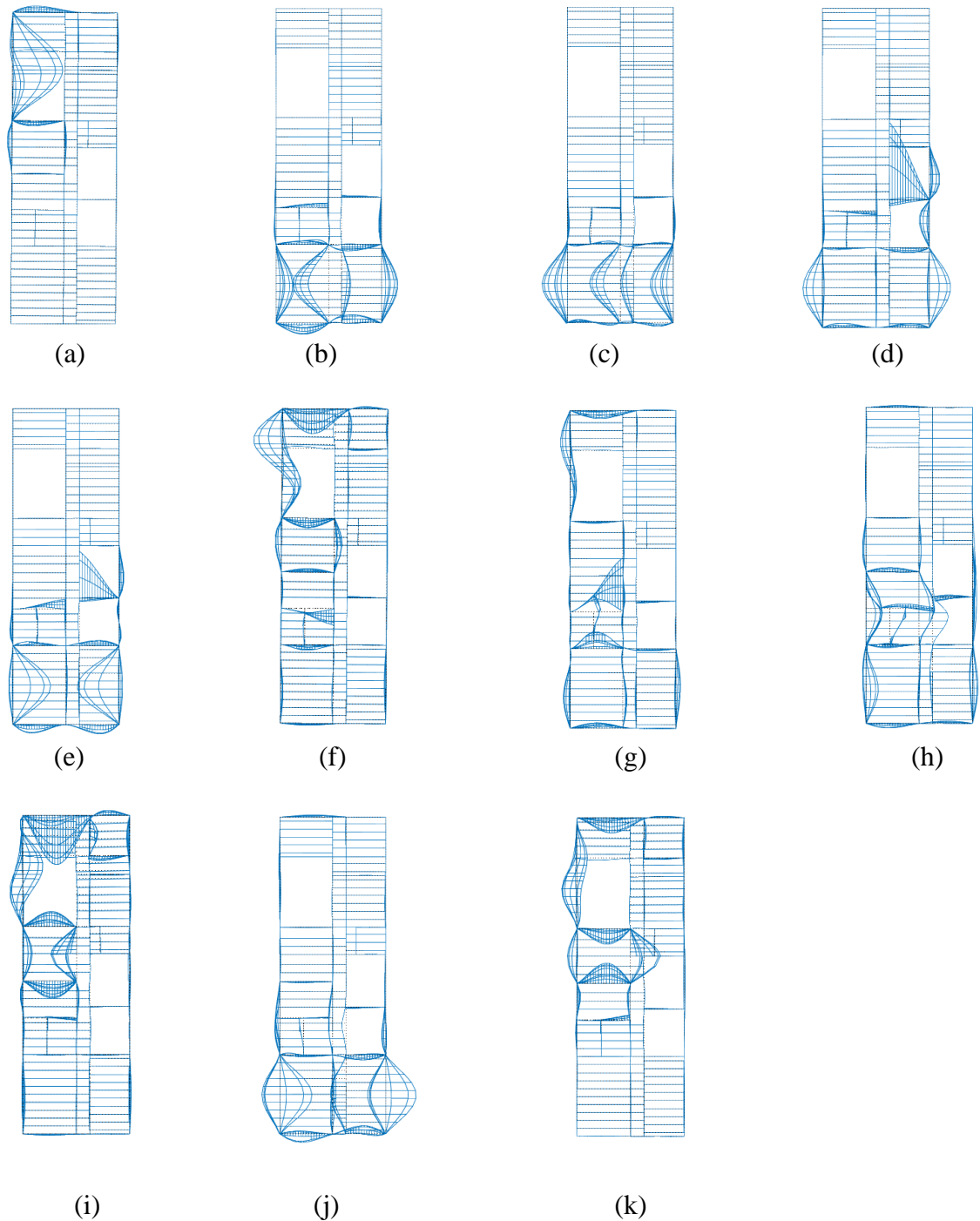


Figura 3.2. Modos de vibrar del prototipo de vivienda mediana: (a) primer modo, (b) segundo modo, (c) tercer modo, (d) cuarto modo, (e) quinto modo, (f) sexto modo, (g) séptimo modo, (h) octavo modo, (i) noveno modo, (j) decimo modo y (k) décimo primer modo.  
Elaboración: Autores.

Figura 3.2a corresponde al primer modo de vibrar, en donde existe una mayor excitación en la parte lateral posterior izquierda de la vivienda, lo que indicaría un posible fracaso de esta pared.

La Figura 3.2g corresponde al séptimo modo de vibrar, en donde existe una excitación bidireccional tanto en la parte frontal como en la parte posterior de la vivienda.

En las Figuras 3.2b, 3.2c, 3.2d, 3.2e, 3.2h y 3.2j el movimiento predomina en la dirección x en la parte frontal, de esto, los modos más relevantes son los que poseen mayor cantidad de masa.

En las Figuras 3.2f, 3.2i y 3.2k el movimiento predomina en la dirección y en la parte posterior, de esto los modos más relevantes son los que poseen mayor cantidad de masa.

En la Figura 3.2 se observa que existe mayor número de modos que excitan la parte frontal de la vivienda mediana, evidenciando que estas zonas son las más vulnerables frente a un evento sísmico.

- **Prototipo de vivienda grande**

La Tabla 3.3 resume las propiedades de vibración natural para el prototipo de vivienda grande:

Tabla 3.3 Propiedades de vibración natural del prototipo de vivienda grande.

Modo	$\omega$ [rad/s]	T [s]	F [Hz]	Participación de masa [%]
1	25,91	0,243	4,12	1,67
2	36,52	0,172	5,83	0,19
3	38,16	0,165	6,07	1,20
4	40,18	0,156	6,40	0,67
5	42,90	0,146	6,83	1,81
6	43,41	0,145	6,91	4,90
7	47,30	0,133	7,53	4,38
8	52,01	0,121	8,28	0,01
9	55,66	0,113	8,86	0,01
10	56,67	0,111	9,02	1,30
11	57,19	0,109	9,10	0,30
12	59,66	0,105	9,50	1,18
13	61,62	0,102	9,81	0,11
14	63,03	0,100	10,03	1,82
15	65,55	0,096	10,43	7,07

Se consideró para el análisis los 15 primeros modos de vibrar con su respectiva participación de masa.  
Elaboración: Autores.

En la Tabla 3.3 observamos que del décimo cuarto modo en adelante las frecuencias son mayores a 10 Hz, en consecuencia los descartamos y se van a analizar los 13 primeros modos para este prototipo.

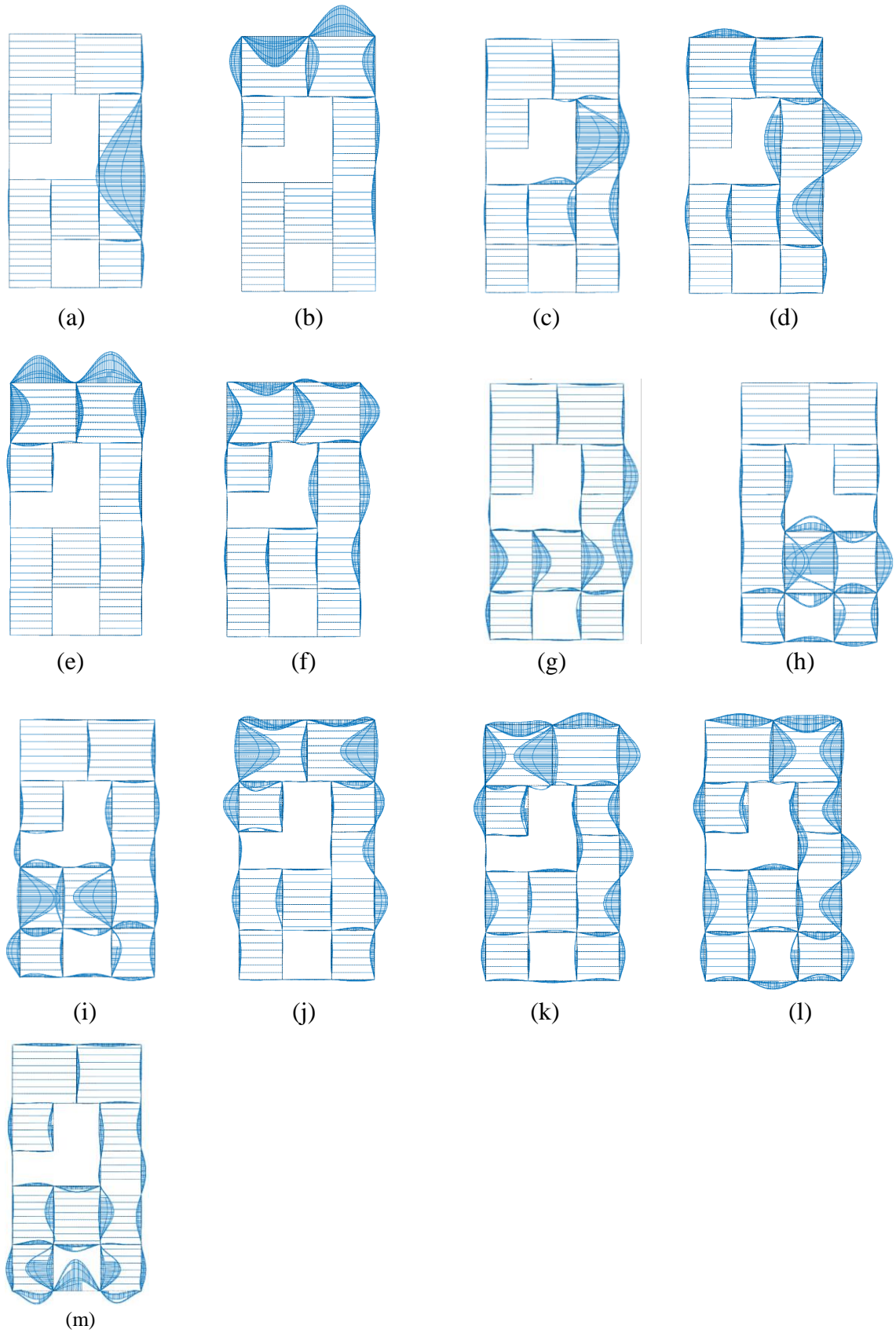


Figura 3.3 Modos de vibrar del prototipo de vivienda grande: (a) primer modo, (b) segundo modo, (c) tercer modo, (d) cuarto modo, (e) quinto modo, (f) sexto modo, (g) séptimo modo, (h) octavo modo, (i) noveno modo, (j) decimo modo, (k) décimo primer modo, (l) décimo segundo modo y (m) décimo tercer modo.

Elaboración: Autores.

En las Figuras 3.3a, 3.3c y 3.3d existe una mayor excitación en la parte lateral derecha de la vivienda.

En las Figuras 3.3b, 3.3e y 3.3f se evidencia una excitación en la parte posterior de la vivienda.

En las Figuras 3.3j, 3.3k y 3.3l existe una excitación bidireccional tanto en la parte frontal como en la parte posterior de la vivienda.

Los modos de vibrar de la figuras 3.3g, 3.3h, 3.3i y 3.3m excitan la parte frontal del prototipo de vivienda grande.

En la Figura 3.3 se observa que los modos de vibrar afectan tanto a la parte posterior como a la parte frontal de la estructura, evidenciando que estas zonas son más vulnerables frente a un evento sísmico.

### 3.3.2 Factores de contribución modal

El factor de contribución modal representa la cantidad de masa que se necesita para que se produzca cada modo de vibrar. Utilizando las propiedades de ortogonalidad entre la matriz de masa con los modos de vibrar y asumiendo al sismo como una fuerza lateral, se puede obtener la contribución modal a través de la siguiente expresión (Chopra, 2014):

$$S_n = \Gamma_n * M * \phi_n \quad (3.1)$$

Donde:

$S_n$  = Factor de contribución modal, kg.

$\Gamma_n$  = La participación modal, cuyo valor es adimensional, se obtiene de la siguiente expresión:

$$\Gamma_n = \phi_n S \quad (3.2)$$

$\phi_n$  = Modos de vibrar.

$S$  = Fuerza efectiva en la estructura debido a la aceleración del suelo, kg.

$$S = M * E_g \quad (3.3)$$

M = Matriz de masa, kg.

E<sub>g</sub> = Vector de influencia de la acción sísmica que afectara a la estructura en sus componentes x, y y, adimensional.

- **Prototipo de vivienda pequeña**

La Tabla 3.4 presenta la cantidad de masa total de la estructura que participa por cada modo y el resultado del análisis modal para el prototipo de vivienda pequeña, considerando los modos de vibrar que afectarían a la estructura:

Tabla 3.4 Resultados del análisis modal del prototipo de vivienda pequeña.

Modo	Masa que participa en el modo [kg]	$\sum S_n$ [kg]
1	363	1248,29
2	11486	39517,47
3	333	1178,86
4	8437	28964,42
5	1777	6087,31

El valor de la masa total que participa en cada modo es proporcional a S<sub>n</sub>, que es la fuerza estática total que afecta a todos los grados de libertad de la estructura.

Elaboración: Autores.

- **Prototipo de vivienda mediana**

La Tabla 3.5 presenta la cantidad de masa total de la estructura que participa por cada modo y el resultado del análisis modal para el prototipo de vivienda mediana, considerando los modos de vibrar que afectarían a la estructura:

Tabla 3.5 Resultados del análisis modal del prototipo de vivienda mediana.

Modo	Masa que participa en el modo	$\Sigma S_n$
	[kg]	[kg]
1	1812,90	6265,36
2	90,40	316,18
3	5565,80	19359,15
4	386,50	1365,66
5	88,10	312,37
6	624,20	2207,27
7	1827,80	6472,45
8	4626,40	15910,16
9	1945,70	6994,42
10	1756,20	6191,46
11	296,40	1061,34

El valor de la masa total que participa en cada modo es proporcional a  $S_n$ , que es la fuerza estática total que afecta a todos los grados de libertad de la estructura.

Elaboración: Autores.

- **Prototipo de vivienda grande**

La Tabla 3.6 presenta la cantidad de masa total de la estructura que participa por cada modo y el resultado del análisis modal para el prototipo de vivienda grande, considerando los modos de vibrar que afectarían a la estructura:

Tabla 3.6 Resultados del análisis modal del prototipo de vivienda grande.

Modo	Masa que participa en el modo	$\Sigma S_n$
	[kg]	[kg]
1	1917,10	6660,33
2	218,40	766,05
3	1367,60	4765,78
4	772,00	2706,20
5	2070,70	7211,16
6	5609,40	19917,25
7	5009,70	17540,92
8	16,80	59,81
9	5,90	20,19
10	1484,40	5260,31
11	334,90	1182,34
12	1351,40	4776,69
13	129,60	453,20

El valor de la masa total que participa en cada modo es proporcional a  $S_n$ , que es la fuerza estática total que afecta a todos los grados de libertad de la estructura.

Elaboración: Autores.

Las fuerzas modales provocan desplazamientos estáticos en la estructura que alcanzan la misma forma que los modos de vibrar pero con diferente escala, así pues, estos desplazamientos nos dan una idea de las paredes más propensas a fracasar ante la excitación de la estructura, ya que se encuentran en función del periodo que posea cada una. En nuestro caso se analizaran todas las paredes que son afectadas por cada modo de vibrar.

### 3.4 Análisis Espectral

#### 3.4.1 Espectro de respuesta

Es la reacción de una estructura expuesta a una vibración de suelo, se puede calcular mediante la integración de la ecuación de movimiento en el tiempo, se representa con gráficos de periodo vs. aceleración, velocidad o desplazamiento, no obstante, la gráfica de los espectros tomados en un mismo lugar, tienden a tener una misma forma y lo que varía son los picos según la aceleración máxima del evento, por esta razón cada país ha normalizado los espectros para el diseño y verificación de estructuras (Bermeo, 2016)

#### 2.4.2 Espectro elástico de respuesta

Para el nivel del sismo de diseño, se construye el espectro elástico de aceleraciones  $S_a$  (Figura 3.4) con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, cuyo periodo de retorno es de 475 años, considerado un nivel de peligro sísmico como severo. Según las especificaciones que se consideran en la NEC-SE-DS (2015) en el capítulo de “Peligro sísmico diseño sismo resistente”, depende de los siguientes factores:

- Zonificación sísmica ( $z$ ).
- El tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura.
- Coeficientes de amplificación de suelo  $F_a$ ,  $F_d$ ,  $F_s$ .

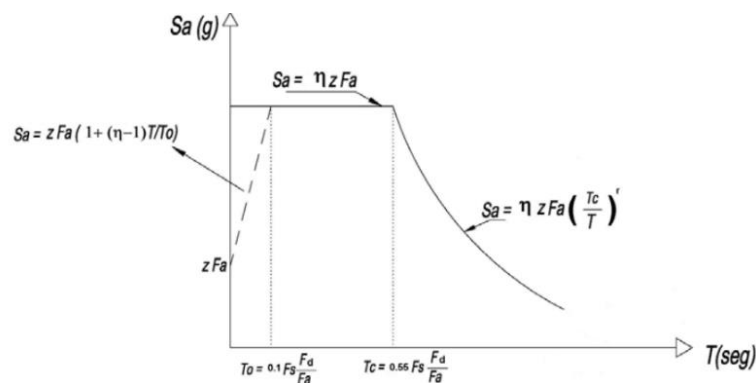


Figura 3.4 Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño. Fuente: NEC-SE-DS, 2015.



El espectro de aceleración ( $S_a$ ) está expresado como fracción de la aceleración de la gravedad y se utilizaron los siguientes parámetros para determinar el espectro de diseño de la Ciudad de Cuenca (Figura 3.5):

- El factor de zona sísmica ( $z$ ) que le corresponde a la provincia del Azuay es de  $0.25g$ , otorgándole un nivel de peligrosidad sísmica alta
- El Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca posee un tipo de suelo tipo C con roca blanda que cumplen con el criterio de velocidad de la onda cortante de  $760 \text{ m/s} > V_s > 360 \text{ m/s}$ .
- Los coeficientes de amplificación de suelo:  $F_a$ ,  $F_d$ , y  $F_s$  están en función del factor de zona sísmica y del tipo de perfil del suelo.
  - Coeficiente de ampliación de suelo en la zona de período corto  $F_a=1.3$ .
  - Coeficiente de ampliación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamiento para diseño en roca  $F_d= 1.28$ .
  - Comportamiento no lineal de los suelos  $F_s=0.94$ .
- La razón entre la aceleración espectral  $S_a$  y el  $PGA$  ( $\eta$ ) depende de la ubicación geográfica del proyecto, para la sierra  $\eta = 2.48$ .
- El factor usado en el espectro de diseño elástico depende del tipo de suelo  $r = 1$ .

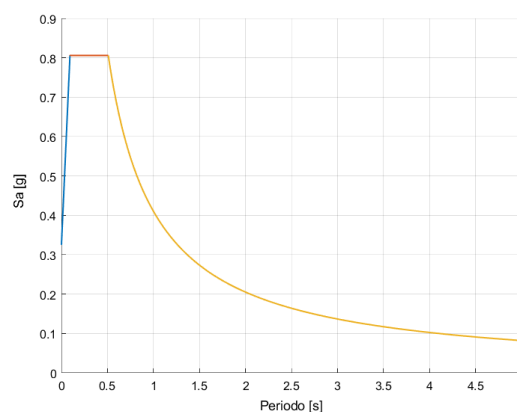


Figura 3.5 Espectro de diseño elástico de aceleración para la ciudad de Cuenca.  
Elaboración: Autores.

Chopra (2016) propone la siguiente fórmula para obtener la fuerza sísmica que actúa en la estructura:

$$F_s = S_n * S_a \quad (3.4)$$

Donde:

$F_s$  = Fuerza sísmica.

$S_n$  = Fuerza estática por cada modo de vibrar.

$S_a$  = Es el valor del espectro de aceleración que le corresponde a cada periodo.

- **Prototipo de vivienda pequeña**

La Tabla 3.7 presenta el valor de la aceleración según el espectro de diseño para la Ciudad de Cuenca que le corresponde a cada periodo que posee la estructura, y la fuerza sísmica que se produce en el prototipo de vivienda pequeña:

Tabla 3.7 Análisis espectral del prototipo de vivienda pequeña.

Modo	$S_a$ [g]	$F_s$ total [KN]	$F_s$ total en la dirección x [KN]	$F_s$ total en la dirección y [KN]
1	0.806	9,87	14,03	-4,16
2	0.806	312,46	211,25	101,21
3	0.806	9,32	37,51	-28,19
4	0.806	229,02	145,41	83,61
5	0.806	48,13	53,28	-5,15

El valor de  $S_a$  es el mismo para cada modo de vibrar, ya que los periodos analizados se encuentran en la cresta del espectro de diseño (Figura 3.5), siendo el valor más crítico de  $S_a$  que presenta el espectro. Elaboración: Autores.

- **Prototipo de vivienda mediana**

La Tabla 3.8 presenta el valor de la aceleración según el espectro de diseño para la ciudad de Cuenca que le corresponde a cada periodo que posee la estructura,+ y la fuerza sísmica que se produce en el prototipo de vivienda mediana:

Tabla 3.8 Análisis espectral del prototipo de vivienda mediana.

Modo	Sa [g]	Fs total [KN]	Fs total en la dirección x [KN]	Fs total en la dirección y [KN]
1	0.806	49,54	48,45	1,09
2	0.806	2,50	2,32	0,18
3	0.806	153,07	152,38	0,69
4	0.806	10,80	1,73	9,07
5	0.806	2,47	-1,07	3,54
6	0.806	17,45	-9,14	26,57
7	0.806	51,18	5,80	45,38
8	0.806	125,80	124,06	1,74
9	0.806	55,30	14,63	40,67
10	0.806	48,96	46,98	1,98
11	0.806	8,39	5,80	2,59

El valor de Sa es el mismo para cada modo de vibrar, ya que los periodos analizados se encuentran en la cresta del espectro de diseño (Figura 3.5), siendo el valor más crítico de Sa que presenta el espectro. Elaboración: Autores.

#### • Prototipo de vivienda grande

La Tabla 3.9 presenta el valor de la aceleración según el espectro de diseño para la ciudad de Cuenca que le corresponde a cada periodo que posee la estructura y la fuerza sísmica que se produce en el prototipo de vivienda grande:

Tabla 3.9 Análisis espectral del prototipo de vivienda grande.

Modo	Sa [g]	Fs total [KN]	Fs total en la dirección x [KN]	Fs total en la dirección y [KN]
1	0,806	52,66	52,07	0,59
2	0,806	6,06	5,93	0,13
3	0,806	37,68	35,4	2,14
4	0,806	21,39	24,44	-3,05
5	0,806	57,02	76,15	-19,13
6	0,806	157,48	49,47	108,01
7	0,806	138,69	149,20	-10,51
8	0,806	0,47	0,21	0,26
9	0,806	0,16	0,23	-0,07
10	0,806	41,59	12,54	29,05
11	0,806	9,5	9,40	-0,05
12	0,806	37,77	30,27	7,50
13	0,806	3,58	6,51	-2,93

El valor de Sa es el mismo para cada modo de vibrar, ya que los periodos analizados se encuentran en la cresta del espectro de diseño (Figura 3.5), siendo el valor más crítico de Sa que presenta el espectro. Elaboración. Autores.

## CAPITULO IV CAPACIDAD SISMICA DE LAS PAREDES DE LOS MODELOS PROTOTIPO

### 4.1 Introducción

Existen diversos métodos para calcular la verificación sísmica de las estructuras, entre las más conocidas están los métodos basados en desplazamientos y el método basados en fuerzas.

En este capítulo, se utilizó el método basado en fuerzas para determinar la capacidad individual por pared mediante un análisis ante cargas en el plano y fuera del plano, a través de la metodología presentada en la norma neozelandesa y Tomazevic, para de esta forma compararlas con las acciones actuantes de la estructura, determinando el modo dominante de cada prototipo y así obtener las zonas vulnerables de cada vivienda frente a un evento sísmico.

### 4.2 Verificación sísmica de las estructuras

Tomazevic (2000) propone que la verificación sísmica de una estructura se debe realizar mediante un análisis individual por cada miembro estructural, lo cual depende de la acción sísmica esperada y la capacidad del sistema estructural para resistir el terremoto, en nuestro caso de estudio se analizaran las paredes, ya que es el elemento estructural principal en las edificaciones del CHC, para esto se debe cumplir la siguiente condición:

$$E_d \leq R_d \quad (4.1)$$

Donde:

$E_d$  = Es el valor de las acciones que actúan sobre la estructura, se define mediante la siguiente expresión:

$$E_d = \sum G_{kj} + F_s + \sum Q_k \quad (4.2)$$

$\sum G_{kj}$  = Peso propio de la pared analizada.

$F_s$  = Fuerza sísmica que actúa en la pared analizada.

$\sum Q_k$  = Valor característico de la acción variable (viento, nieve y fuego). Este valor no se consideró en nuestro caso de estudio, ya que son eventos climáticos que no tienen incidencia en nuestro entorno.

$R_d$  = Es la capacidad de resistencia que posee la mampostería frente a los modos de falla que presentan las paredes.

### 4.3 Estudio sobre modos de falla bajo acción sísmica

En estructuras con entrepiso flexible la activación del daño puede ser de dos tipos: fallas en el plano y fallas fuera del plano, cada una de estas depende de la dirección en la que actúa la fuerza sísmica sobre la pared (NZ1-C8, 2016).

#### 4.3.1 Fallas en el plano

Este tipo de falla se produce por fuerzas sísmicas que actúan paralelas al plano del panel de la mampostería.

Según la Norma Neozelandesa (2016) la capacidad de resistencia en el plano que tiene una pared de mampostería no reforzada debe tomarse como la capacidad de resistencia que tiene a la tracción diagonal, el aplastamiento en las esquinas y el balanceo.

- **Tracción diagonal**

La falla por tracción diagonal se produce cuando las tensiones principales de tracción superan la resistencia de la mampostería generando una grieta diagonal inclinada en la pared (Figura 4.1). Es decir, esto ocurre cuando existen esfuerzos elevados de compresión vertical o cuando la resistencia a tracción de las unidades de ladrillo es reducida (Bravo & Flores, 2015).

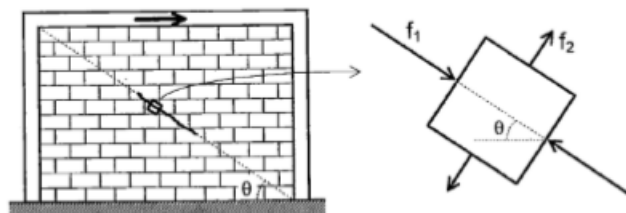


Figura 4.1 Falla a tracción diagonal generada por un esfuerzo de compresión y tensión paralela al panel de mampostería.  
Fuente: Bravo & Flores, 2015.

La Norma de Nueva Zelanda (2016) propone la siguiente fórmula para obtener la máxima resistencia a la tracción diagonal que posee un panel de mampostería:

$$V_{dt} = f_{dt} A_n \beta \sqrt{1 + \frac{f_a}{f_{dt}}} \quad (4.3)$$

Donde:

$V_{dt}$  = Capacidad a la tracción diagonal, N.

$f_{dt}$  = Fuerza de tensión diagonal de la mampostería, MPa.

$$f_{dt} = 0.5c + f_a \mu_f \quad (4.4)$$

$c$  = cohesión de la mampostería, MPa.

$\mu_f$  = coeficiente de fricción de la mampostería, rad.

La Tabla 4.1 presenta el valor de  $c$  y  $\mu_f$  obtenidos a través de la tesis “Determinación experimental de las propiedades de cohesión y ángulo de fricción de la mampostería de adobe, piedra y ladrillo en edificaciones históricas peruanas”, debido a que el ladrillo posee características mecánicas parecidas al de las viviendas en estudio.

Tabla 4.1 Resultados de Cohesión y Ángulo de fricción del ladrillo.

	Cohesión [N/mm <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [rad]
Ladrillo	0.33	0.59

Fuente: González, 2016.

$f_a$  = esfuerzo de compresión axial debido a las cargas de gravedad calculadas en la altura media de la pared, MPa.

$A_n$  = área del mortero, mm<sup>2</sup>.

$\beta$  = factor para corregir la distribución de tensión no lineal = 0.67.

- **Aplastamiento en las esquinas**

Estas se originan por tensiones muy elevadas de compresión, como se observa en la Figura 4.2 estas fallas se desarrollan en las esquinas debido a la desviación del cuerpo del muro con respecto a las columnas y vigas que confinan al panel de mampostería (San Bartolomé, Quiun, & Silva, 2011).

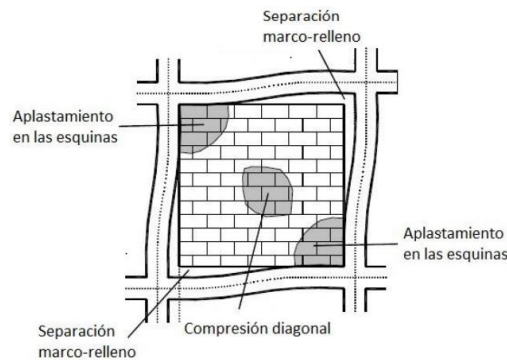


Figura 4.2 Aplastamiento en las esquinas y compresión diagonal en el panel de mampostería.  
Fuente: Bravo & Flores, 2015.

La Norma de Nueva Zelanda (2016) propone la siguiente fórmula para obtener la resistencia máxima al agrietamiento en las esquinas que posee un panel de mampostería:

$$V_{tc} = (\alpha P + 0.5 P_w) \left( \frac{L_w}{h_{eff}} \right) \left( 1 - \frac{f_a}{0.7 f'_m} \right) \quad (4.5)$$

Donde:

$V_{tc}$  = Capacidad al agrietamiento en las esquinas, N.

$\alpha = 0.5$  para pared en voladizo y 1.0 para pared fija.

$P$  = carga superpuesta y muerta en la parte superior de la pared, N.

$P_w$  = peso propio de la pared analizada, N.

$L_w$  = longitud de la pared, mm.

$h_{eff}$  = altura resultante de la fuerza sísmica, mm.

$f_a$  = esfuerzo de compresión axial debido a las cargas de gravedad en la base de la pared, MPa.

$f'_m$  = resistencia a la compresión de la mampostería, MPa.

- **Balanceo**

El balanceo puede ocasionar aplastamiento en las zonas terminales de la pared y bajo una carga sísmica puede desprenderse si el mortero es de mala calidad, como se observa en la Figura 4.3 (NZ1-C8, 2016).



Figura 4.3 Falla por balanceo y desprendimiento de ladrillos de un edificio de mampostería no reforzado. Fuente: NZ1-C8, 2016.

La norma de Nueva Zelanda presenta la siguiente fórmula para obtener la resistencia máxima al balanceo que posee un panel de mampostería (2016):

$$V_{dpc} = \mu_{dpc}(P + P_w) \quad (4.6)$$

Donde:

$V_{dpc}$  = Capacidad al balanceo, N.

$\mu_{dpc}$  = coeficiente de fricción del mortero 0.2-0.5.

P y  $P_w$  son valores definidos ya anteriormente.

#### 4.3.2 Fallas fuera del plano

Como se observa en la Figura 4.4 este tipo de falla se produce cuando la fuerza sísmica es ortogonal al plano de la mampostería, su principal característica es el volcamiento de la pared debido al bajo ligamento o nula conexión entre las paredes, y es típico en estructuras que poseen un sistema de entrepiso flexible.

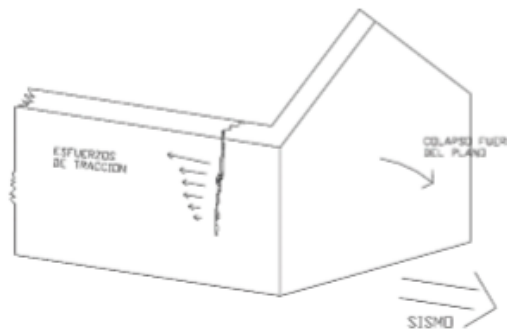


Figura 4.4. Vista en perspectiva de la falla fuera de plano. Fuente: Romero & Zhindón, 2017.



Tomazevic (2000) indica que las paredes propensas a mecanismo de falla fuera del plano pueden ser evaluadas con un análisis de flexión simple siendo calculadas de manera individual para cada piso, mediante la siguiente ecuación:

$$M_{RD} = \frac{f_{xk}Z}{\gamma_M} \quad (4.7)$$

Donde:

$Z = \frac{bt^2}{6}$  = el módulo de sección de la pared analizada para el plano de flexión.

b = el ancho de la pared

t = el espesor de la pared.

$f_{xk}$  = la resistencia a la flexión característica de la mampostería relevante para el plano de flexión.

$\gamma_M$  = Factor de reducción de las propiedades mecánicas de la mampostería de acuerdo a la calidad de ejecución de la obra, consideramos el valor de 1 ya que no se conoce las condiciones en las que se construyó las vivienda.

#### **4.4 Resultados de la capacidad sísmica de las viviendas**

Todas las paredes que son afectadas en cada modo de vibrar se consideraron para el análisis de la verificación sísmica, para esto, se determinó la capacidad máxima de resistencia a fallas en el plano y fuera de plano de cada pared, para compararlas frente a la fuerza sísmica que actúa en cada prototipo de vivienda, según el espectro de diseño de la ciudad de Cuenca para un periodo de retorno de 475 años.

- **Prototipo de vivienda pequeña**

La Tabla 4.2 muestra el análisis que se realizó a los 11 primeros modos de vibrar del prototipo de vivienda pequeña, determinando el número de paredes que fallan en el plano como fuera del plano para cada modo de vibrar.

Tabla 4.2 Número de paredes que fallan en el plano por: capacidad a la tracción diagonal, agrietamiento en las esquinas, balanceo y fallas fuera de plano por volcamiento para el prototipo de vivienda pequeña.

Modo	Núm. de paredes analizadas	Fuerza sísmica [KN]	Núm. de paredes que fallan por:			
			Tracción diagonal	Agrietamiento en las esquinas	Balanceo	Volcamiento
1	15	9,87	0	8	10	1
2	36	312,46	1	24	24	20
3	42	9,32	0	25	27	2
4	17	229,02	0	10	11	9
5	17	48,13	0	10	11	5

Elaboración: Autores.

En la Tabla 4.2 se observa que el modo 2 posee la mayor fuerza sísmica distribuida en la parte frontal como posterior de la edificación (Figura 3.1b) y el mayor número de paredes que fallan por volcamiento, por esta razón se consideró como el modo dominante de la estructura.

El modo que afecta en mayor medida al prototipo de vivienda pequeña es el modo 2, cuyos valores de capacidad que poseen las paredes analizadas tanto para fallas en el plano como fuera de plano en comparación con la fuerza actuante, se muestran en las Figuras 4.5 y 4.6.

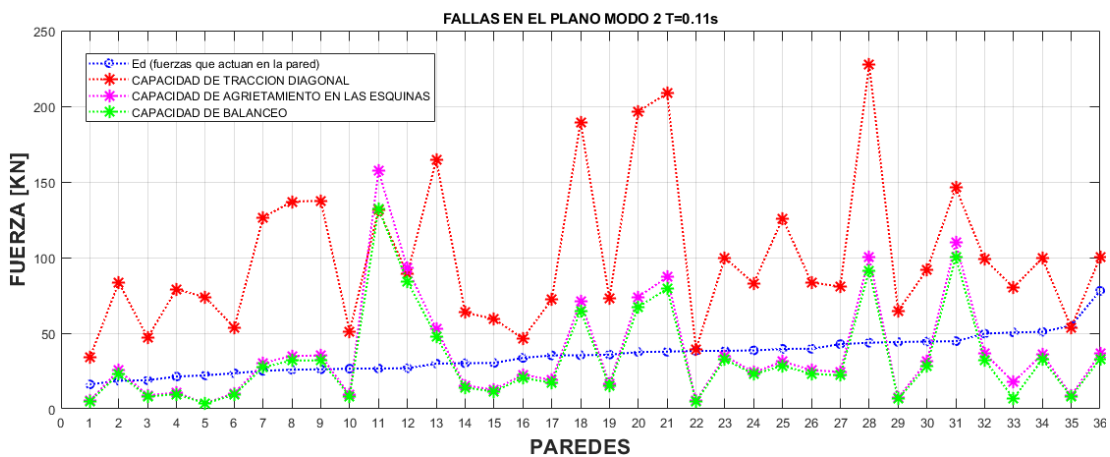


Figura 4.5 Fallas en el plano de las paredes del prototipo de vivienda pequeña para el modo dominante, donde los asteriscos de color rojo indican la capacidad que poseen las paredes a tracción diagonal, los asteriscos de color violeta indican la capacidad que tienen las paredes al agrietamiento en las esquinas, los asteriscos de color verde indican la capacidad que tienen las paredes al balanceo y los círculos de color azul indican las acciones que actúan en la pared.

Elaboración. Autores.

En la Figura 4.5 podemos observar que el prototipo de vivienda pequeña posee una alta capacidad de resistencia a tracción diagonal, sin embargo una pared presenta falla por este mecanismo que representa el 2% del total de paredes de la estructura.

Como se observa en la Figura 4.5 la capacidad de agrietamiento en las esquinas y balanceo que poseen las paredes son similares, dando como resultado que fallan 24 paredes frente a estos mecanismos, mismo que representa el 43% de toda la estructura.

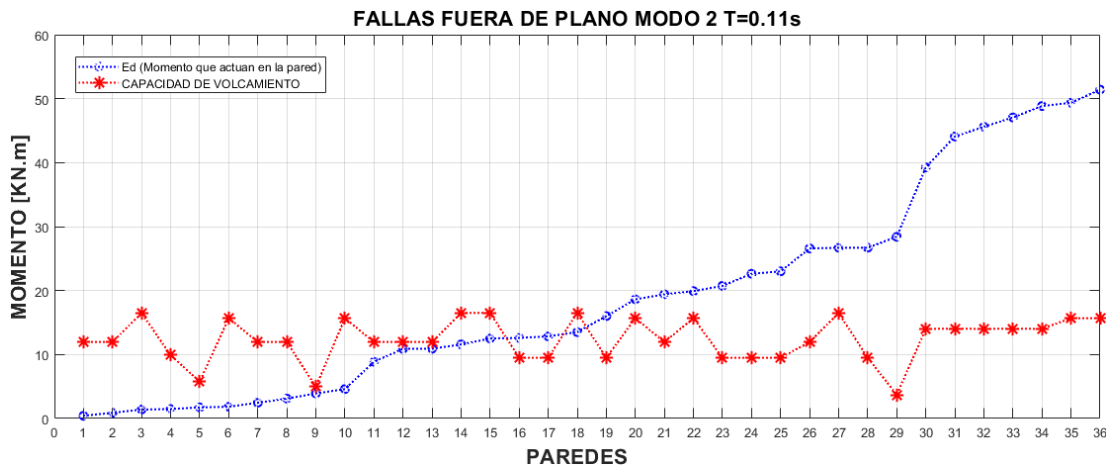


Figura 4.6 Fallas fuera del plano de las paredes del prototipo de vivienda pequeña para el modo dominante, donde las asteriscos de color rojo indican la capacidad que poseen las paredes al volcamiento y los círculos de color azul indican el momento generado en la pared por la fuerza sísmica. Elaboración. Autores.

En la Figura 4.6 se observa que existen 20 paredes que fallan por volcamiento concentradas en la parte frontal como posterior de la edificación, y estas representan un 36% de toda la estructura.

De esto podemos deducir que el prototipo de vivienda pequeña es propensa en la parte posterior como inferior, evidenciando que esta vivienda no posee zonas, generando un colapso global de la estructura.

- **Prototipo de vivienda mediana**

La Tabla 4.3 muestra el análisis que se realizó a los 11 primeros modos de vibrar del prototipo de vivienda mediana, determinando el número de paredes que fallan en el plano como fuera del plano para cada modo de vibrar.

Tabla 4.3 Número de paredes que fallan en el plano por: capacidad a la tracción diagonal, agrietamiento en las esquinas, balanceo y fallas fuera de plano por volcamiento para el prototipo de vivienda mediana.

Modo	Núm. de paredes analizadas	Fuerza sísmica [KN]	Núm. de paredes que fallan por:			
			Tracción diagonal	Agrietamiento en las esquinas	Balanceo	Volcamiento
1	12	49,54	0	5	6	2
2	15	2,50	0	6	9	0
3	14	153,07	0	56	8	6
4	17	10,80	0	6	8	1
5	21	2,47	0	8	10	0
6	23	17,45	0	11	13	1
7	20	41,18	0	7	11	1
8	34	125,80	0	15	19	7
9	20	55,30	0	9	10	2
10	26	48,96	0	12	16	6
11	22	8,39	0	10	11	0

Elaboración: Autores.

En la Tabla 4.3 se observa que los modos 3 y 8 poseen la mayor fuerza sísmica distribuida en la parte frontal de la edificación (Figura 3.2h), sin embargo el modo que presenta mayor número de paredes que fallan es el 8, por esta razón se consideró como el modo dominante de la estructura.

El modo que afecta en mayor medida al prototipo de vivienda mediana es el modo 8, cuyos valores de capacidad que poseen las paredes analizadas tanto para fallas en el plano como fuera de plano en comparación con la fuerza actuante, se muestran en las Figuras 4.7 y 4.8.

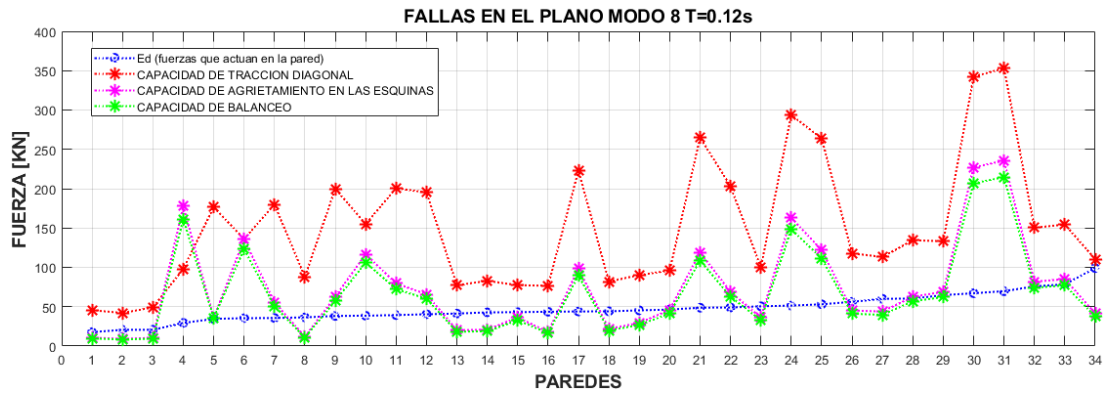


Figura 4.7 Fallas en el plano de las paredes del prototipo de vivienda mediana para el modo dominante, donde los asteriscos de color rojo indican la capacidad que poseen las paredes a tracción diagonal, los asteriscos de color violeta indican la capacidad que tienen las paredes al agrietamiento en las esquinas, los asteriscos de color verde indican la capacidad que tienen las paredes al balanceo y los cirulos de color azul indican las acciones que actúan en la pared.

Elaboración: Autores.

En la Figura 4.7 podemos observar que el prototipo de vivienda mediana posee una alta capacidad de resistencia a tracción diagonal y ninguna pared presenta fallas por este mecanismo.

Como se observa en la Figura 4.7 la capacidad de agrietamiento en las esquinas y balanceo que poseen las paredes son similares; sin embargo, en el prototipo de vivienda mediana existen 15 paredes que fallan por agrietamiento en las esquinas que corresponde al 24% de todas las paredes de la edificación y 19 paredes fallan por balanceo que corresponde al 31%.

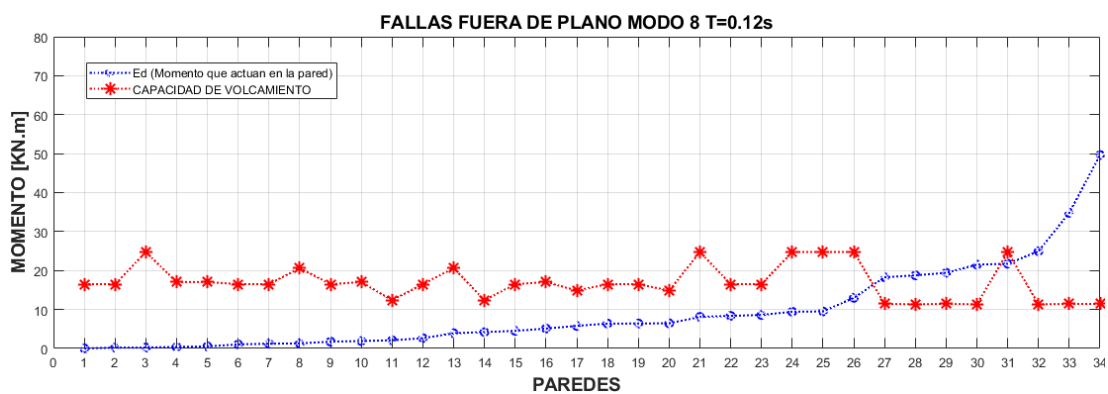


Figura 4.8 Fallas fuera del plano de las paredes del prototipo de vivienda mediana para el modo dominante, donde las asteriscos de color rojo indican la capacidad que poseen las paredes al volcamiento y los cirulos de color azul indican el momento generado en la pared por la fuerza sísmica.

Elaboración: Autores.

En la Figura 4.8 se observa que existen 7 paredes que fallan por volcamiento concentradas en la parte frontal de la edificación, y estas representan un 12% de toda la estructura.

De esto podemos deducir que el prototipo de vivienda mediana es propensa en la parte frontal, evidenciando que esta vivienda su zona segura frente a un sismo sería la parte posterior de la vivienda.

- **Prototipo de vivienda grande**

La Tabla 4.4 muestra el análisis que se realizó a los 13 primeros modos de vibrar del prototipo de vivienda grande, determinando el número de paredes que fallan en el plano como fuera del plano para cada modo de vibrar.

Tabla 4.4 Número de paredes que fallan en el plano por: capacidad a la tracción diagonal, agrietamiento en las esquinas, balanceo y fallas fuera de plano por volcamiento para el prototipo de vivienda grande.

Modo	Núm. de paredes analizadas	Fuerza sísmica [KN]	Núm. de paredes que fallan por:			
			Tracción diagonal	Agrietamiento en las esquinas	Balanceo	Volcamiento
1	14	52.66	0	7	7	3
2	16	6.06	0	6	8	0
3	20	37.68	0	10	10	2
4	34	21.39	0	15	17	2
5	20	57.02	0	8	10	5
6	35	157.48	0	16	18	6
7	40	138.69	0	20	20	8
8	28	0.47	0	14	14	0
9	42	0.16	0	21	21	0
10	36	41.59	0	16	18	3
11	20	9.35	0	10	10	0
12	32	37.77	0	16	16	2
13	38	3.58	0	19	19	0

Elaboración: Autores.

En la Tabla 4.4 se observa que los modos 6 y 7 poseen la mayor fuerza sísmica distribuida en la parte posterior y frontal de la edificación respectivamente (Figuras 3.3f, y 3.3g), además presentan el mayor número de paredes que fallan por volcamiento, por este motivo se considera al modo 6 y 7 como los modos dominante del prototipo de vivienda grande.

El modo que afecta en mayor medida al prototipo de vivienda mediana en la parte posterior es el modo 6, cuyos valores de capacidad que poseen las paredes analizadas tanto para fallas en el plano como fuera de plano en comparación con la fuerza actuante, se muestran en las Figuras 4.9 y 4.10.

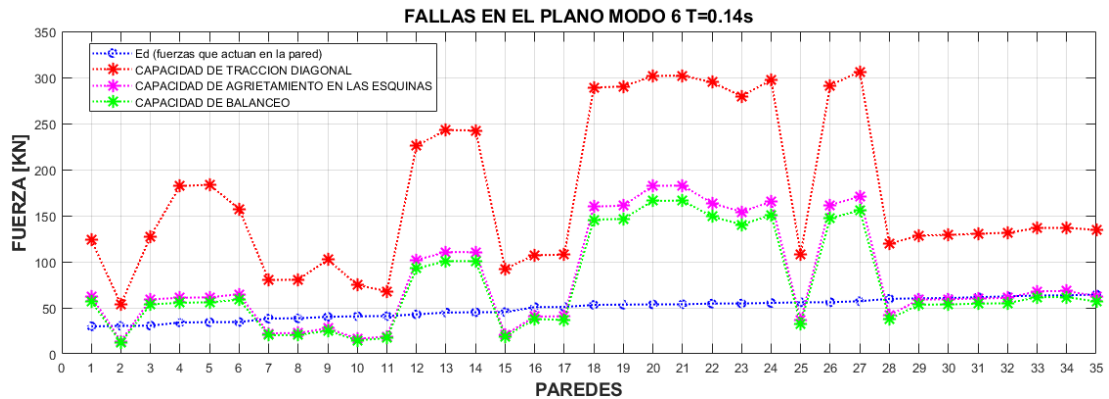


Figura 4.9 Fallas en el plano de las paredes del prototipo de vivienda grande para el primer modo dominante, donde los asteriscos de color rojo indican la capacidad que poseen las paredes a tracción diagonal, los asteriscos de color violeta indican la capacidad que tienen las paredes al agrietamiento en las esquinas, los asteriscos de color verde indican la capacidad que tienen las paredes al balanceo y los cirulos de color azul indican las acciones que actúan en la pared.  
Elaboración: Autores.

En la Figura 4.9 podemos observar que el prototipo de vivienda grande posee una alta capacidad de resistencia a tracción diagonal y ninguna pared presenta fallas por este mecanismo.

Como se observa en la Figura 4.9 la capacidad de agrietamiento en las esquinas y balanceo que poseen las paredes son similares, sin embargo en el prototipo de vivienda grande existen 16 paredes que fallan por agrietamiento en las esquinas que corresponde al 25% de todas las paredes de la edificación y 18 paredes fallan por balanceo que corresponde al 29%.

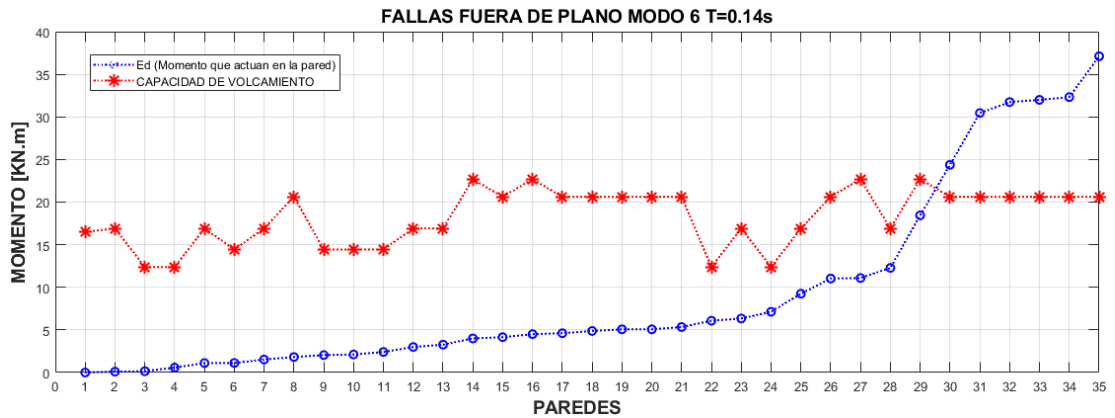


Figura 4.10 Fallas fuera del plano de las paredes del prototipo de vivienda grande para el primer modo dominante, donde las asteriscos de color rojo indican la capacidad que poseen las paredes al volcamiento y los cirulos de color azul indican el momento generado en la pared por la fuerza sísmica. Elaboración: Autores.

En la Figura 4.10 se observa que existen 6 paredes que fallan por volcamiento concentradas en la parte posterior de la edificación, y estas representan un 10% de toda la estructura.

El modo que afecta en mayor medida al prototipo de vivienda mediana en la parte frontal es el modo 7, cuyos valores de capacidad que poseen las paredes analizadas tanto para fallas en el plano como fuera de plano en comparación con la fuerza actuante, se muestran en las Figuras 4.11 y 4.12.

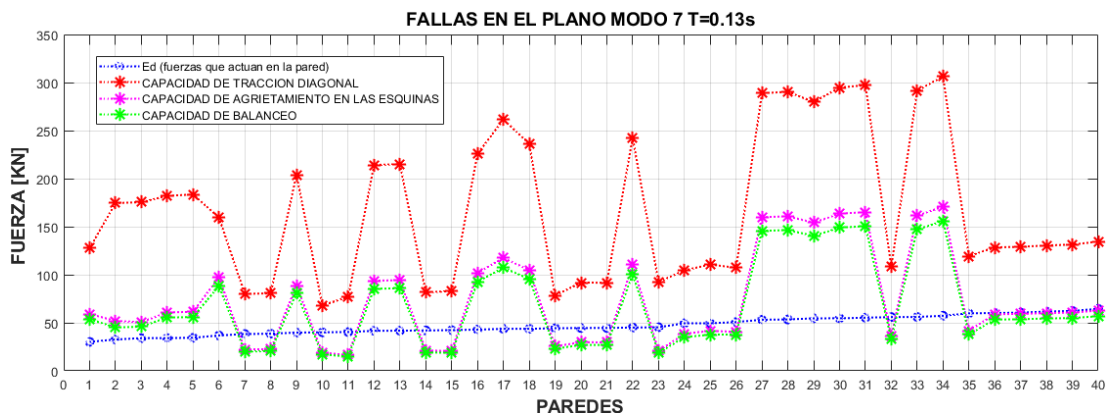


Figura 4.1158 Fallas en el plano de las paredes del prototipo de vivienda grande para el segundo modo dominante, donde los asteriscos de color rojo indican la capacidad que poseen las paredes a tracción diagonal, los asteriscos de color violeta indican la capacidad que tienen las paredes al agrietamiento en las esquinas, los asteriscos de color verde indican la capacidad que tienen las paredes al balanceo y los cirulos de color azul indican las acciones que actúan en la pared. Elaboración: Autores.



En la Figura 4.11 podemos observar que el prototipo de vivienda grande posee una alta capacidad de resistencia a tracción diagonal y ninguna pared presenta fallas por este mecanismo.

Como se observa en la Figura 4.11 la capacidad de agrietamiento en las esquinas y balanceo que poseen las paredes son similares, y ambas poseen el mismo números de paredes que fallan a estos dos mecanismos siendo un total de 20 paredes que le corresponde al 32% de toda la estructura.

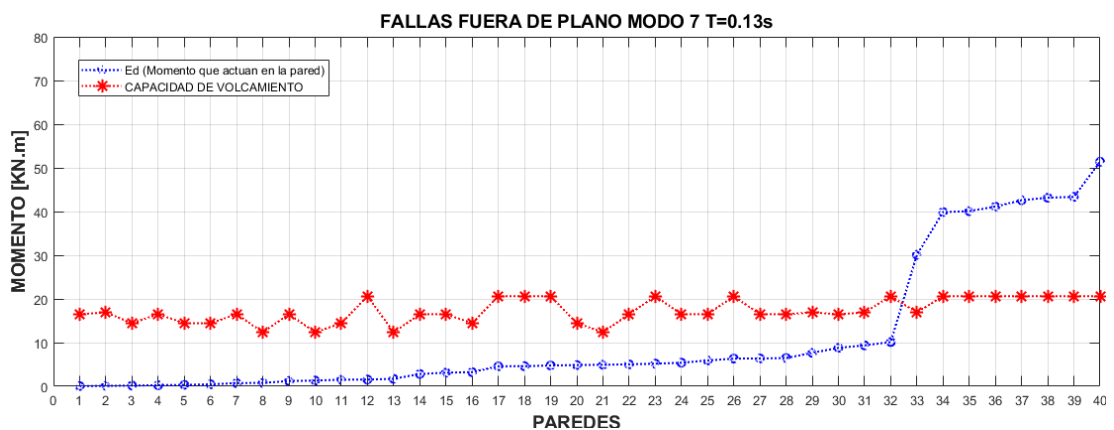


Figura 4.12 Fallas fuera del plano de las paredes del prototipo de vivienda grande para el segundo modo dominante, donde las asteriscos de color rojo indican la capacidad que poseen las paredes al volcamiento y los cirulos de color azul indican el momento generado en la pared por la fuerza sísmica. Elaboración: Autores

En la Figura 4.12 se observa que existen 8 paredes que fallan por volcamiento concentradas en la parte frontal de la edificación, y estas representan un 13% de toda la estructura.

De esto podemos deducir que el prototipo de vivienda grande es propensa a fallar toda la estructura tanto en la parte posterior como frontal, evidenciando que esta vivienda no tiene ninguna zona segura frente a un sismo.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se determinó la capacidad sísmica de tres estructuras representativas de mampostería no reforzada con entrepiso flexible del Centro Histórico de Cuenca, para verificar la capacidad en el plano y fuera de plano que poseen sus paredes.

Las características más representativas que poseen las viviendas del CHC con respecto a su geometría son: patios centrales, paredes compuestas de ladrillo, entrepiso de madera y cubierta de teja artesanal. Las características mecánicas se obtuvieron de la revisión de varias tesis de pregrado de Arquitectura e Ingeniería civil, y a través de ensayos propios realizados mediante el esclerómetro.

Las viviendas prototipo se modelaron mediante el uso de elementos finitos, donde las vigas de hormigón se definieron con elementos tipo Beam, el entrepiso con elementos tipo Truss, y las paredes con elementos tipo Shell, se asignaron las respectivas cargas para el entrepiso y cubierta y se consideraron condiciones de borde para la cimentación y entrepiso.

Se realizó un análisis modal con la ayuda del programa Stabíl para obtener las propiedades de vibración natural donde se determinó bajos porcentajes de participación de masa por cada modo de vibrar producto de la baja rigidez del entrepiso y un análisis espectral para obtener la fuerza sísmica de cada vivienda, utilizando el espectro de diseño de la ciudad de Cuenca con suelo tipo C para un periodo de retorno de 475 años.

Se determinó la capacidad sísmica individual de las paredes para los modos de falla en el plano y fuera del plano, donde se obtuvo que:

- Para el prototipo de vivienda pequeña el modo dominante posee un  $T=0.112$  s con una fuerza sísmica de 312.46 KN, donde falla un 2% de paredes a tracción diagonal, un 43% de paredes fallan tanto a agrietamiento en las esquinas como a balanceo y un 36% fallan por volcamiento, generando un colapso global de la estructura.

- Para el prototipo de vivienda mediana el modo dominante posee un  $T=0.12$  s con una fuerza sísmica de 125.8 KN donde ninguna pared falla por tracción diagonal, un 24% de paredes fallan por agrietamiento en las esquinas, un 31% fallan por balanceo y un 12% fallan por volcamiento, generando un colapso parcial de la estructura en la parte frontal, evidenciando que una posible zona segura sea la parte posterior de la vivienda.
- Para el prototipo de vivienda grande existen dos modos dominantes: el primer modo posee un  $T=0.145$  s con una fuerza sísmica de 157.48 KN donde ninguna pared falla por tracción diagonal, un 25% de paredes fallan por agrietamiento en las esquinas, un 29% fallan por balanceo y un 10% fallan por volcamiento, generando un colapso parcial de la estructura en la parte posterior; el segundo modo analizado posee un  $T=0.133$  s con una fuerza sísmica de 138.69 KN donde ninguna pared falla por tracción diagonal, un 32% de paredes fallan tanto por agrietamiento en las esquinas como por balanceo y un 13% fallan por volcamiento, generando un colapso parcial de la estructura en la parte frontal, por lo tanto de esta vivienda se podrá decir que no posee zonas seguras, ya que los modos afectan tanto a la parte frontal como posterior de la estructura.

El presente proyecto pretende dar un aporte al estudio dinámico de las estructuras de mampostería del Centro Histórico de Cuenca, para obtener datos reales y ajustados a la realidad de nuestro entorno, y de esta forma puedan servir de base para futuros proyectos más específicos sobre este tipo de estructuras.

## RECOMENDACIONES

El modelo para las 3 viviendas prototipo se evalúan utilizando la zona elástica de los materiales, por lo que es necesario adaptar un modelo donde se contemple el efecto de las rótulas plásticas que poseen los materiales.

Las viviendas del Centro Histórico de Cuenca han sufrido cambios en su configuración estructural por materiales más resistentes formando estructuras mixtas (ladrillo y adobe), por eso es recomendable que los modelos de estas estructuras consideren las propiedades mecánicas de estos dos materiales.

En los modelos es importante tomar en cuenta el efecto que producirán las casas colindantes a las estructuras y cómo afectan estas a la respuesta dinámica de las viviendas.

Debido a la incertidumbre de las características mecánicas de los materiales que están conformadas las viviendas del Centro Histórico de Cuenca, se recomienda realizar un análisis específico para determinar las propiedades de estos materiales.

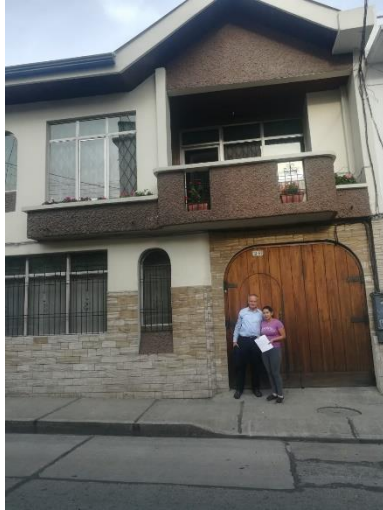
## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, E., & Quezada, R. (2017). *Caracterización física y mecánica del Adobe en el cantón Cuenca* (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Aguirre, M. d., Avila, M., & Pesantez, J. (2016). *Arquitectura tradicional de Cuenca, recuperación y alternativa sustentable en la contemporaneidad* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Barrera, J., & Peñaloza, J. (2018). *Análisis paramétrico de la respuesta sísmica global de una edificación de mampostería no reforzada típica del Centro Histórico de Cuenca* (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Bravo, D., & Flores, L. (2015). *Análisis estático no lineal de paredes de ladrillo de las casas de Cuenca* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Bermeo, H. (2016). *Determinación de espectros de respuesta y espectros de diseño elásticos e inelásticos para la ciudad de Cuenca* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Caldas, V., & Sigcha, P. (2017). *Breve análisis cronológico de la introducción de materiales relevantes, dentro de las edificaciones del centro histórico de Cuenca entre los años 1880 y 1980* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Chérres, M., & Peñafiel, C. (2000). *Determinación del índice de vulnerabilidad de las edificaciones de la Ciudad de Cuenca* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Chopra, Anil k. (2014). *Dinámica de estructuras*. México, D.F.: Pearson.
- Dooms, D., Jansen, M., Roeck, G., Degrande, G., Lombaert, G., Schevenels, M., Francois & S. Peñafiel, C. (2014). *Stabil: a finite element toolbox for matlab*. Leuven.
- Gonzales, E. (2016). *Determinación experimental de las propiedades de cohesión y ángulo de fricción de la mampostería de adobe, piedra y ladrillo en edificaciones históricas peruanas* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica Del Perú, Perú.
- Jiménez, J., Cabrera, J., Sánchez, J., & Avilés, F. (2018, Junio 28). Vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto. *Maskana*. Recuperado de <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.07>
- Kassimali, Aslam. (2015). *Análisis estructural*. México, D.F.: Cengage Learning Editores.
- Miller, P. (2019). Cuenca un aniversario mas de fundacion española. *Revista Cuenca Ilustre-Ecuador*.
- Muñoz, P. (2015). *Arquitectura popular: En Azuay y Cañar 1977-1978*. Universidad de Cuenca-Centro de Artesanías y Artes populares.
- NEC (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito.
- NZ1-C8 (2016). *Seismic assessment of unreinforced masonry buildings*. Nueva Zelanda

- Patiño, P. (2014). *Análisis estructural de diafragmas de madera (tesis de pregrado)*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Rangel, G., & Terán, A. (2010). Efecto de la losa en las propiedades estructurales y el desempeño sísmico de marcos de concreto reforzado. *SciELO*.
- Rivera, M., & Moyano, M. G. (2002). *Arquitectura de las líneas rectas: influencia del movimiento moderno en la arquitectura de Cuenca (tesis de pregrado)*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Romero, B., & Zhindón, P. (2017). *Evaluación sísmica de casas de mampostería de tierra vulnerables a modos de falla fuera del plano (tesis de pregrado)*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- San Bartolomé, Á., Quiun, D., & Silva, W. (2011). Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*.
- Sanjuán, C. (2013). Resistencia del hormigón mediante esclerómetro o índice de rebote. *Patología +rehabilitación+construcción*.
- Schubert. (1994). Tensile and flexural strength of masonry-influences, test methods, test results. Calgary, Canada.
- Tarque, N., & Loaiza, C. (2003). *Análisis sísmico de edificios (tesis de pregrado)*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.
- Tomazevic, M. (2000). *Earthquake-resistant design of masonry buildings*. London: Imperial College Press.

## ANEXOS

### Anexo 1 Entrega de solicitud de permiso para el ingreso a cada vivienda.



### Anexo 2 Visitas de campo para verificación de datos.

- Medidas de las vigas del entrepiso.



- Medidas de las columnas.



- Verificación de la distribución arquitectónica.



**Anexo 3 Ensayo realizado con el esclerómetro.**





## Anexo 4 Códigos de modelación

```

% Unidades N, m,s

% Nodos
% Nodes=[NodID X Y Z]
Nodes = [load('prueba_nodos.txt')
         load('prueba_nodos_entre piso.txt')];
figure
plotnodes(Nodes, 'Numbering', 'off');

% Características del material
Types = {1 'shell4'; % Pared
         2 'beam'   % Vigas y columnas de hormigón
         3 'truss'}; % Vigas de madera

b=0.20; % dimensiones de la columna de hormigón (Base)
h=0.15; % dimensiones de la columna de hormigón (Altura)
bb=0.18; % dimensiones de la viga de hormigón (Base)
hh=0.15; % dimensiones de la viga de hormigón (Altura)
t=0.15; % espesor de la pared
r=0.1; % Radio de la viga del entre piso

%Sections = [SecID A ky kz Ixx Iyy Izz]
Sections= [1 0.15 NaN NaN NaN NaN NaN % Pared
           2 b*h Inf Inf h*b^3/12 b*h^3/12 b*h^3/12 % Columna
           3 bb*hh Inf Inf hh*bb^3/12 bb*hh^3/12 bb*hh^3/12 % Viga
           4 pi*r^2 NaN NaN NaN NaN NaN]; % Entrep

% Materials = [MatID E(N/m2) nu densidad(Kg/m3)];
Materials= [1 3.31e9 0.15 2000 % pared
            2 26e9 0.2 2400 % hormigón
            3 13e9 0.25 750]; % madera

% Elementos
Vigas_Columnas = load('prueba_vigas_columnas.txt');
Coor = 3;
Vigas = [];
for i=1:size(Vigas_Columnas,1)
    NI = find(Vigas_Columnas(i,5)==Nodes(:,1));
    NJ = find(Vigas_Columnas(i,6)==Nodes(:,1));
    if
and(and(Nodes(NI,4)==Coor,Nodes(NJ,4)==Coor),isnan(Vigas_Columnas(i,
end)))
        Vigas = [Vigas;Vigas_Columnas(i,:)];
    end
end

Coor = 3;
Columnas = [];
for i=1:size(Vigas_Columnas,1)
    NI = find(Vigas_Columnas(i,5)==Nodes(:,1));
    NJ = find(Vigas_Columnas(i,6)==Nodes(:,1));
    if
and(and(Nodes(NI,4)==Coor,Nodes(NJ,4)==Coor)==0,isnan(Vigas_Columnas
(i,end)))
        Columnas = [Columnas;Vigas_Columnas(i,:)];
    end
end

```

```

Paredes = load('prueba_paredes.txt');
Entrepiso = load('prueba_entrepiso.txt');
Vigas(:,3)=3;
    Elements = [Paredes
                Columnas
                Vigas
                Entrepiso];

% Gráfico de elementos
hold('on');
plotelem(Nodes,Elements(find(Elements(:,3)==1),:),Types,'Numbering',
'off')
hold('on');
plotelem(Nodes,Elements(find(Elements(:,3)==2),:),Types,'Numbering',
'off')
hold('on');
plotelem(Nodes,Elements(find(Elements(:,3)==3),:),Types,'Numbering',
'off')
hold('on');
plotelem(Nodes,Elements(find(Elements(:,3)==4),:),Types,'Numbering',
'off')
title('Nodes and elements');

DOF = getdof(Elements,Types);
Coor = 0;
RID = [];
Matriz = [];
for i=1:size(Nodes,1)
    if Nodes(i,4)==Coor
        RID=[RID;Nodes(i,1)];
        Matriz = [Matriz;Nodes(i,:)];
    end
end
nodos_quitar = [Matriz(:,1)];
seldof = [nodos_quitar+0.01; nodos_quitar+0.02;nodos_quitar+0.03];
DOF = removedof(DOF,seldof);

[K,M] = asmkm(Nodes,Elements,Types,Sections,Materials,DOF);

%% Carga de la cubierta
CCoor = 6;
CRID = [];
CMatriz = [];
for i=1:size(Nodes,1)
    If Nodes(i,4)==CCoor
        CRID=[CRID;Nodes(i,1)];
        CMatriz = [CMatriz;Nodes(i,:)];
    end
end
nodos_cargar_cub=[CMatriz(:,1)];
seldof1=[nodos_cargar_cub+0.03];
cub=load('cargacubierta.txt');
ccub=cub;

%% Carga viva
CCoor = 3;
CRID = [];
CMatrizCV=[];
for i=1:size(Nodes,1)

```

```

    if Nodes(i,4)==CCoor
        CRID=[CRID;Nodes(i,1)];
        CMatrizCV = [CMatrizCV;Nodes(i,:)];
    end
end
nodos_cargar_viva=[CMatrizCV(:,1)];
seldof2=[nodos_cargar_viva+0.03];
cviva=load('Cargaviva.txt');
ccviva=cviva;
seldof=[seldof1; seldof2];
PLoad= [ccub; cviva];

% Ensamblaje de los vectores de carga:
P=nodalvalues(DOF,seldof,PLoad);

% Constrains
Coor=[load('nodos_para_constrains.txt')];
Lista=[];
for i=1:size(Coor,1)
    ID =
    find(and(and(Coor(i,1)==Nodes(:,2),Coor(i,2)==Nodes(:,3)),Coor(i,3)=
    =Nodes(:,4)));
    Lista=[Lista,Nodes(ID,1)];
    constraions=Lista.';
end
[m,n]=size(constraions);
Constr=ones((m*3),5);
Constr(:,1)=0;
a=[constraions(:,1)+0.01;constraions(:,1)+0.02;constraions(:,1)+0.03
];
u=[constraions(:,2)+0.01;constraions(:,2)+0.02;constraions(:,2)+0.03
];
Constr(:,3)=a;
Constr(:,4)=-1;
Constr(:,5)=u;
[K,F,M]=addconstr(Constr,DOF,K,P,M);

```

## Anexo 5 Códigos del análisis modal

```

run vivienda_pequeña, vivienda_ mediana o vivienda_grande.

nMode=10;          % El número de modos que se van a analizar
[phi,omega] = eigfem(K,M,nMode);

% Obtención del período y frecuencia
T=2*pi()./(omega);
frecuencia=1./T;

% Gráfico de los modos
figure;
animdisp(Nodes,Elements,Types,DOF,phi(:,1),'DispScal',150);
title('Primer modo de vibrar');

% Contribución modal
Eg=sum(selectdof(DOF,[0.01 0.02]),1).';
S=(M)*Eg;
gamma=phi.'*S;
Mtot=FindMass(M,DOF);
mp=(gamma.*gamma)/(Mtot)*100; % Porcentaje de participación modal
Masa_total_modal=(sum(diag(M/3)))*mp/100;

% Factor de contribución modal
Sj = M*phi*diag(gamma);
Sjtot = sum(sj).';

% Deformaciones causados por sj
Usj=K\sj;

figure;
animdisp(Nodes,Elements,Types,DOF,Usj(:,1),'DispScal',1000);
title('Primer modo de vibrar');

```

## Anexo 6 Códigos del análisis espectral

```

%Espectro de diseño de cuenca
%Para la Ciudad de Cuenca se tiene:
%Suelo Tipo C
%Datos NEC
z=0.25; % cuenca z
n=2.48; % sierra
r=1; % Suelo tipo C

Fa=1.3;
Fd=1.28;
Fs=0.94;

g=9.81;

%Obtención de Espectro elástico horizontal de diseño en
aceleraciones
%Cálculo de To y Tc

To=0.1*Fs*(Fd/Fa);
Tc=0.55*Fs*(Fd/Fa);

```

```

%Primer Tramo desde 0 a To
t1=(0:0.0001:To);
Sa1(1,1)=z*Fa;
for i=2:length(t1)
    Sa1(1,i)=(z*Fa)*(1+(n-1)*(t1(i)/To));
end
figure;
plot(t1,Sa1);

%Segundo Tramo desde To a Tc
t2=(To:0.0001:Tc);
Sa2(1,1)=Sa1(end);
for i=2:length(t2)
    Sa2(1,i)=n*z*Fa;
end
hold('on');
plot(t2,Sa2);

% Tercer Tramo desde Tc a Tmax
% Ingresar Tmax
Tmax=5;

t3=(Tc:0.01:Tmax);
Sa3(1,1)=Sa2(end);
for i=2:length(t3)
    Sa3(1,i)=(n*z*Fa)*(Tc/t3(1,i))^(r);
end
hold('on');
plot(t3,Sa3);
xlabel('Periodo [s]');
ylabel('Aceleración [m/s^2]');
% title('Espectro de Aceleración de Cuenca')
Sa = [Sa1 Sa2 Sa3];
Periodo = [t1 t2 t3];

%Para encontrar el valor de Sa que le corresponde a cada periodo
r=find(abs(Periodo-T(1,1))<0.0001);
k=Periodo(r)
y=Sa(1,r)

% Obtención de la fuerza sísmica total
% 0.806 es el valor de Sa
Fs=(0.806*sjtot*9.81)/1000;    % KN

```