



Universidad del Azuay

Facultad de Ciencia y Tecnología

**Carrera de Ingeniería Civil y Gerencia de
Construcciones**

**ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD
SÍSMICA DE LA EDIFICACIÓN PATRIMONIAL
“CASA LA CONDAMINE”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

Autor:

Eddy Andrés Pérez García

Director:

Hernán Alfredo García Erazo

Cuenca – Ecuador

2022

DEDICATORIA

A mi querida madre con mucho amor y cariño le dedico todo mi esfuerzo y trabajo puesto para la realización de este trabajo de tesis.

A mis hermanas y hermano que son las personas que me han ofrecido el amor y la calidez de la familia que amo.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este trabajo quiero utilizar este espacio para agradecer a mi director de tesis: Ing. Hernán García Erazo, por apoyarme y acompañarme pacientemente durante todo el proceso en medio de tiempos difíciles.

Al personal administrativo y docente de la Facultad de Ciencia y Tecnología y en especial al Ing. Jose Vázquez director de la Escuela de Ingeniería Civil y al Ing. Juan Carlos Malo docente de la facultad, quienes han sido guía durante mi formación como ingeniero.

ÍNDICE

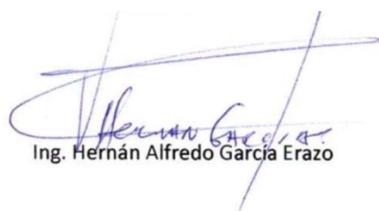
ÍNDICE	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
INTRODUCCIÓN	6
Contexto	6
Problemática.....	7
Objetivos de la tesis.....	7
Metodología	7
Organización del documento.....	8
Capítulo 1 Marco Teórico	10
Introducción	10
1.1 Definiciones	10
1.2 Peligro sísmico del Ecuador.....	13
1.3 Peligro sísmico de Cuenca	15
Capítulo 2 Metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica	18
Introducción	18
2.1 Estudios de vulnerabilidad sísmica	18
2.2 Métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica	19
2.3 Análisis dinámicos de estructuras	22
2.4 Revisión bibliográfica: Estudios de vulnerabilidad sísmica	28
Capítulo 3 Descripción del caso de estudio	32
Introducción	32
3.1 Edificación propuesta para el análisis de vulnerabilidad sísmica	33
3.1.1 Caso de estudio: casa “La Condamine”	33
Capítulo 4 Análisis de vulnerabilidad sísmica: metodología y resultados.....	50
Introducción	50
Generalidades del análisis	51
4.1 Modelación.....	52
4.2 Simulaciones y resultados	63
4.3 Cálculo de derivas	83
4.4 Resumen de resultados del análisis sísmico.....	92
CONCLUSIONES	95
BIBLIOGRAFÍA.....	99

RESUMEN

Los sismos constituyen una fuente importante de riesgos, debido a esto, es imperativo el estudio de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones e infraestructuras en general. El Ecuador debe su gran sismicidad a su ubicación geográfica ya que se encuentra emplazado sobre el “Cinturón de Fuego del Pacífico”, la zona de mayor actividad sísmica del planeta. El centro histórico de Cuenca es parte del patrimonio histórico de la humanidad, declarado como tal por la UNESCO en 1999, las edificaciones que componen este conjunto son susceptibles a sufrir daños considerables en caso de sismo, por lo que evaluar su comportamiento ante este fenómeno, permite establecer su grado de vulnerabilidad para tomar las medidas correctivas necesarias. El eje principal de este estudio es la determinación de la vulnerabilidad sísmica del inmueble “Casa La Condamine”, mediante la generación de un modelo matemático basado en el método de los elementos finitos, seguido del análisis modal – espectral realizado con la ayuda de la herramienta computacional SAP 2000, que permite establecer los índices para determinar la vulnerabilidad sísmica de la edificación. Estudios como este contribuyen a la conservación de los edificios patrimoniales y como base para estudios más profundos sobre el tema.

Palabras clave:

Vulnerabilidad sísmica, SAP 2000, Análisis modal-espectral, Análisis Sísmico.



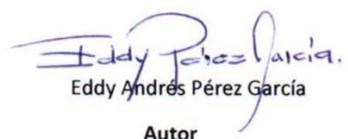
Ing. Hernán Alfredo García Erazo

Director del trabajo de titulación



Ing. José Fernando Vázquez Calero

Director de la Escuela



Eddy Andrés Pérez García

Autor

ABSTRACT

Earthquakes constitute an important source of risk, and due to this, the study of seismic vulnerability in buildings and infrastructure is imperative. Ecuador owes its significant seismicity to its geographical location on the “Pacific Ring of Fire”, the area of greatest seismic activity on the planet. The historic center of Cuenca was declared as part of the historical heritage of humanity by UNESCO in 1999. The buildings that make up this complex are susceptible to considerable damage in the event of an earthquake, thus evaluating their behavior in case of this phenomenon allows the degree of vulnerability to be established and the necessary corrective measures to be taken. The main axis of this study is the determination of the seismic vulnerability of the “Casa la Condamine” through the generation of a mathematical model based on the finite element method, followed by the modal-spectral analysis carried out with the help of the computational tool SAP 2000, which establishes the indices needed to determine the seismic vulnerability of the building. Studies like this contribute to the conservation of heritage buildings and serve as a basis for deeper studies on the subject.

Keywords:

Seismic vulnerability, SAP 2000, modal-spectral analysis, seismic analysis.



Ing. Hernán Alfredo García Erazo

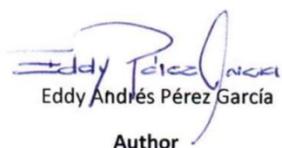
Director of degree work



Ing. José Fernando Vázquez Calero

Director of the School

Translated by



Eddy Andrés Pérez García
Author



Eddy Andrés Pérez García

Trabajo de Titulación

Ing. Hernán Alfredo García Erazo.

Junio, 2022

INTRODUCCIÓN

Contexto

La preservación y conservación del Patrimonio Arquitectónico de la ciudad de Cuenca constituye una problemática de interés público. El casco histórico de la ciudad es un área urbana consolidada, que alberga un porcentaje importante de la actividad económica y cultural de la urbe, donde la gran mayoría de la población realiza sus actividades cotidianas.

En las últimas décadas estos inmuebles han sido objeto de intervenciones, que han adicionado materiales “modernos” entre sus componentes, este grupo de inmuebles están constituidos principalmente de materiales como: adobe, bahareque, madera, cal, ladrillo y teja, por mencionar algunos, donde sus gruesas paredes de tierra cruda son el principal sustento de toda la estructura.

Gran parte de estas edificaciones fueron construidas antes de la promulgación del primer código de la construcción en 1977, que establecía ya principios de diseño sismo resistente. En este sentido, y considerando que el Ecuador se encuentra situado sobre una zona de alto riesgo sísmico, estas edificaciones precisan un reforzamiento estructural en base a estudios de vulnerabilidad sísmica.

Para el desarrollo de estudios de vulnerabilidad sísmica, es necesario considerar la historia de la sismicidad y las propiedades del suelo para estimar escenarios que proporcionen información sobre el nivel de vulnerabilidad de las edificaciones y poder aplicar los correctivos necesarios.

El caso de estudio analizado en este proyecto de tesis es la edificación conocida como “CASA LA CONDAMINE”, ésta, reúne muchas de las características presentes en la gran mayoría de las construcciones patrimoniales, además de contar con elementos

estructurales nuevos, adicionados durante el proceso de restauración arquitectónica y estructural.

Problemática

De lo expuesto anteriormente, el eje de este trabajo radica en estimar de manera adecuada la vulnerabilidad sísmica de la edificación en cuestión.

La problemática es abordada desde una perspectiva conceptual del riesgo, entendiéndolo como vulnerabilidad y exposición, se aplica una metodología mecánica - analítica, basada en la modelación matemática de la estructura sirviéndose del Método de Elementos Finitos y de la herramienta computacional SAP2000 que es un software especializado para análisis numéricos en el campo de la ingeniería estructural y así, obtener los resultados que posibilitan emitir un dictamen en términos de vulnerabilidad estructural en los elementos que conforman la edificación.

Objetivos de la tesis

Con el fin de estimar la vulnerabilidad sísmica de la edificación seleccionada para el estudio, este manuscrito se apoya en un acercamiento analítico, que, mediante una simulación numérica, permite llegar a obtener los resultados esperados, para cumplir con los objetivos planteados a continuación:

- **Objetivo general:** Determinar la capacidad sísmica de la edificación.
- **Objetivos específicos:**
 - Describir el método de análisis.
 - Determinar el comportamiento sísmico.
 - Determinar la vulnerabilidad de la edificación.

Metodología

La metodología expuesta a continuación, resume el proceso llevado a cabo para satisfacer los objetivos planteados.

Para comenzar, se abordó la base teórica que permitió definir el procedimiento y sustentar los resultados obtenidos, capítulos I y II. La siguiente etapa consistió en el análisis y la descripción del caso de estudio donde se pone en evidencia el estado actual de la estructura, sus características arquitectónicas y estructurales, capítulo III.

A continuación, se procedió con la aplicación del método de análisis y a la representación tridimensional del inmueble, capítulo IV, en esta etapa se integró los datos necesarios tales como: las características de los materiales, la geometría de los elementos estructurales, cargas permanentes y variables, y el espectro sísmico. Finalmente, el modelo fue sometido a simulaciones mediante una herramienta computacional especializada para el diseño y cálculo estructural, esto permitió el análisis de los resultados para establecer la vulnerabilidad sísmica de la edificación estudiada.

Organización del documento

La tesis se desarrolla en dos partes y está compuesta por cuatro capítulos, la primera parte describe el contexto del estudio y presenta el caso de análisis, necesario para la comprensión del fenómeno que se desea analizar.

La primera parte está compuesta por tres capítulos:

Capítulo I: evoca los conceptos que sirven de base para la elaboración del estudio, sirve para recordar el contexto sísmico particular del Ecuador y de la ciudad de Cuenca.

Capítulo II: relata el estado del arte concerniente a las metodologías existentes para el análisis de la vulnerabilidad sísmica, así como también de los estudios experimentales, numéricos o una combinación de ambos, relativos al estudio de la vulnerabilidad sísmica en el Ecuador y en la ciudad de Cuenca.

Capítulo III: tiene por objetivo presentar en detalle la estructura estudiada en este documento.

La segunda parte está compuesta por el capítulo IV y concierne específicamente a la descripción del análisis sísmico realizado a la estructura durante la tesis.

Capítulo IV: describe el estudio del edificio. El estudio de vulnerabilidad sísmica realizado y el análisis de los resultados obtenidos son minuciosamente descritos. La modelización de la estructura es detallada. Finalmente, la calidad de la predicción de la respuesta sísmica del edificio es evaluada para determinar el grado de vulnerabilidad frente a un evento sísmico.

Capítulo I Marco Teórico

Introducción

Este capítulo presenta en grandes líneas la base teórica que permite sustentar la metodología y encaminar el estudio hacia los resultados que se desea obtener, trata la vulnerabilidad y los conceptos que la definen, así como también lo establecido en la normativa nacional con respecto a la exposición sísmica del territorio ecuatoriano.

1.1 Definiciones

Para comprender el fenómeno de la vulnerabilidad sísmica, es necesario tener presentes los conceptos estrechamente ligados a este fenómeno, los cuales son descritos a continuación.

1.1.2 Sismo

Los sismos son el resultado del constante movimiento y colisión entre las placas tectónicas que conforman la superficie terrestre. Esta interacción da lugar a la liberación de la energía acumulada en forma de ondas, las cuales al desplazarse en todas direcciones hacen temblar la superficie del planeta.

Su magnitud y severidad dependen de la profundidad (hipocentro) en la que se produce; el punto de la superficie donde se lo registra se conoce como epicentro.

1.1.3 Vulnerabilidad sísmica

Barbat, Oller & Vielma (2005), la definen como el grado de daño que sufre una estructura frente a la acción de un sismo con determinadas características, la vulnerabilidad sísmica de una estructura está íntimamente ligada a sus características intrínsecas, pero independiente de la peligrosidad de su emplazamiento, por ejemplo: una estructura puede ser vulnerable, pero no estar en riesgo si no se encuentra en un sitio con cierta peligrosidad sísmica.

En el estudio realizado por (Arteaga Mora, 2016), el autor clasifica la vulnerabilidad sísmica por origen, cuando las edificaciones no han sido concebidas con los criterios del diseño sismorresistente, y vulnerabilidad sísmica progresiva, debida a la pérdida progresiva de las propiedades físico – mecánicas de los materiales y/o elementos que la conforman, causada principalmente por la acción de fenómenos climáticos y la falta de mantenimiento.

1.1.3.1 Vulnerabilidad sísmica en edificaciones

La vulnerabilidad sísmica en edificaciones puede determinarse en tres niveles, ver Figura 1.1, el análisis que se lleva a cabo en esta tesis se basa en el nivel estructural de vulnerabilidad sísmica, rama marcada en negro.

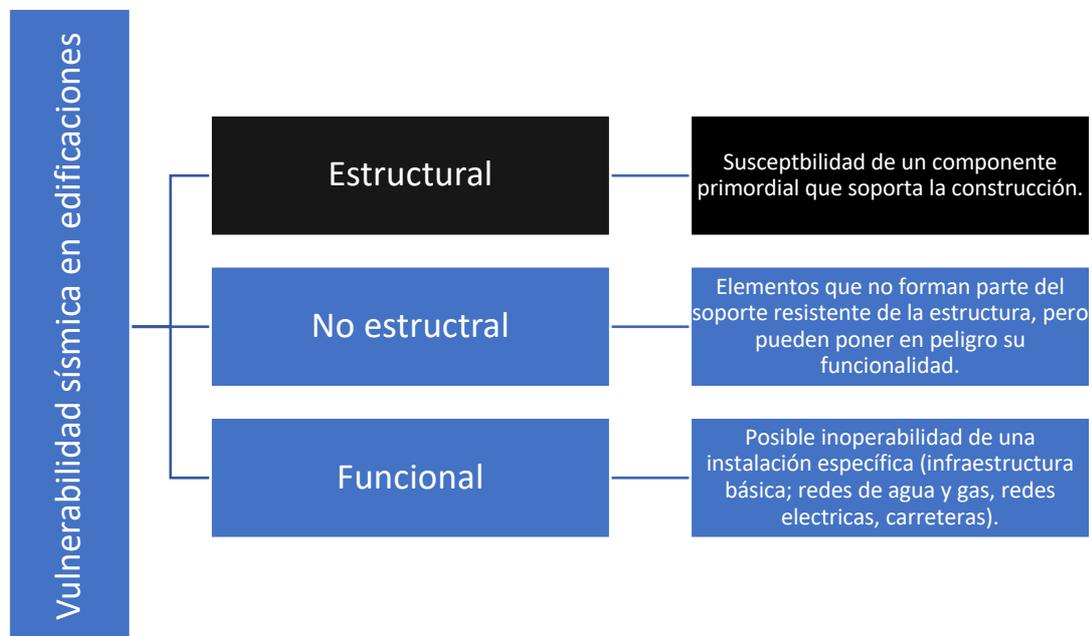


Figura 1.1 Niveles de vulnerabilidad en edificaciones. Fuente: (Flores Salazar & Ferreira, 2019. Pág. 11); elaboración propia.

1.1.4 Amenaza sísmica

Según (Barbat, Oller, & J. C, 2005), “La amenaza o peligrosidad sísmicas definida desde un punto de vista probabilístico, se entendería como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno sísmico con intensidades o magnitudes esperadas, en un área o región determinada y durante un periodo de tiempo específico” (pág. 6).

En otros términos, es la probabilidad de que el sismo de diseño se presente dentro de un periodo de tiempo determinado.

1.1.5 Riesgo sísmico

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-RE, pág. 14), el riesgo sísmico resulta de la combinación de tres factores:

1. Peligro sísmico: entendido como la amenaza o peligrosidad que expresa la probabilidad de ocurrencia de un evento telúrico.
2. Nivel de exposición: Cuan expuestas están las estructuras, dependiendo de la zona donde se encuentran emplazadas, y de las características propias de cada una.
3. Vulnerabilidad al daño de las edificaciones: Entendido como el grado o porcentaje de pérdida de elementos que conforman la estructura bajo el efecto probable de solicitaciones sísmicas.

La evaluación del riesgo total puede llevarse a cabo mediante la expresión dada a continuación (Barbat, Oller, & J. C, 2005):

Ecuación 1.1

$$R = H * V * E$$

Donde:

H = Amenaza, peligro o peligrosidad

V = Vulnerabilidad

E = Elementos en riesgo

R = Riesgo Sísmico

1.1.6 Reducción del riesgo sísmico

Como menciona (Arteaga Mora, 2016), es posible actuar efectivamente sobre dos de las tres variables que definen el Riesgo Sísmico R:

- Influyendo en las condiciones locales del suelo, para reducir la peligrosidad sísmica H.
- Para reducir la vulnerabilidad sísmica V, en el caso de edificaciones nuevas, se debe cumplir con todos los requisitos de las normativas de diseño y construcción sismorresistente; en el caso de estructuras

existentes, la única alternativa para reducir su vulnerabilidad sísmica es a través de su refuerzo, rehabilitación o, sencillamente, su demolición.

Por lo tanto, estudios como el que se presenta en este documento contribuyen con datos e información necesaria para la implementación de planes o medidas para reducir la vulnerabilidad de las edificaciones frente a un evento sísmico, así como también de base para estudios más profundos sobre el tema.

1.1.7 Índice de daño

En la definición propuesta por (Arteaga Mora, 2016), tenemos que: el índice de daño valora la degradación de un sistema estructural ante la acción de fuerzas verticales y/o horizontales ocasionados por fenómenos sísmicos.

Puntualmente para este estudio, el índice que permite establecer la vulnerabilidad sísmica del caso de estudio son las derivas de piso calculadas en la sección final del análisis modal – espectral y la deformación presenta en la mampostería, ver capítulo 4, sección 4.3.

1.2 Peligro sísmico del Ecuador

El territorio ecuatoriano se encuentra ubicado en una zona considerada de alta peligrosidad sísmica, conocida como el “Cinturón de Fuego del Pacífico”. Entre las fuentes preponderantes de energía liberada en forma de sismos tenemos: a) La interacción entre la placa Sudamericana, la placa de Cocos y la placa de Nazca (Rivadeneira et al., 2007). b) Las fuerzas sísmicas diferenciales en sentido norte-sur ocasionadas por la subducción de la cordillera submarina de Carnegie y las constantes fuerzas en varias direcciones que intentan abrir el golfo de Guayaquil en dos. (Correa, 2003)

La mayoría de los centros poblados del Ecuador son vulnerables al daño causado por sismos, Guayaquil, la totalidad de las ciudades costeras y la gran mayoría de las ciudades de la sierra como Quito y Cuenca, están altamente expuestas. En estas ciudades las edificaciones que conforman sus cascos históricos datan de épocas anteriores a la publicación del primer código de la construcción, por lo que se espera que su capacidad sísmica sea inaceptable.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción presenta una zonificación sísmica de 1 a 6 del territorio nacional, ver Figura 1.2; y establece el valor de aceleración máxima en roca para el sismo de diseño (factor Z), ver Tabla 1.1.

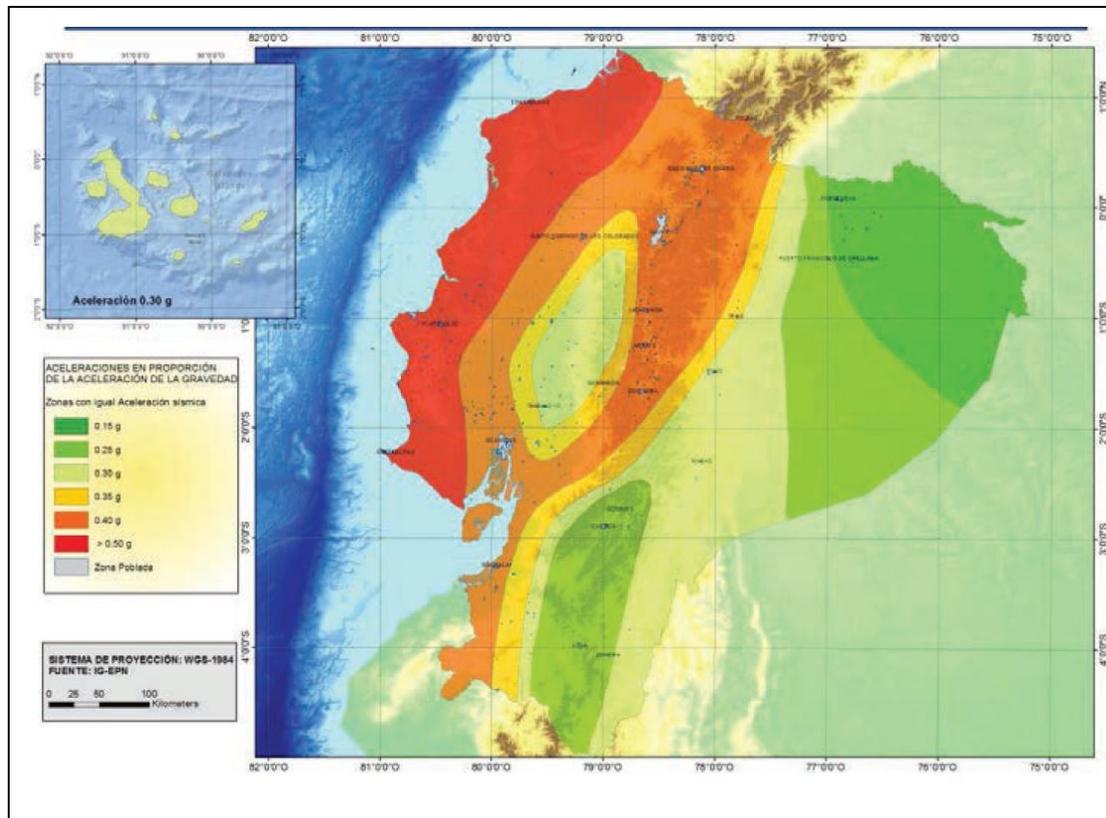


Figura 1.2 Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z. Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Todo el territorio ecuatoriano está catalogado como de amenaza sísmica alta, con excepción del nororiente que presenta una amenaza sísmica intermedia, y el litoral ecuatoriano que presenta una amenaza sísmica muy alta (NEC-SE-DS, 2015).

Tabla 1.1 Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada. Fuente: NEC-SE-DS. (2015). Peligro sísmico Diseño sismorresistente, pág. 27.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor Factor Z	0,15	0,25	0,30	0,35	0,40	>0,50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

La interacción entre las placas tectónicas crea fallas geológicas que atraviesan a lo largo y a lo ancho el territorio continental del país, convirtiéndolas en la principal fuente de liberación de energía en forma de sismos. Entre las fallas geológicas activas

más importantes descritas por (Alvarez Monroy & Morocho Torres, 2020) tenemos: el sistema de fallas Pallatanga-Chingual, el sistema de fallas ubicado en el borde subandino de la Cordillera Oriental de los Andes, el sistema de fallas de Quito y la falla de Girón.

En abril del 2016 el país sufrió el embate de un terremoto con una magnitud de Mw 7.8, con epicentro en la localidad de Pedernales en la provincia de Manabí.

Catástrofe que, según un informe publicado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en abril de 2020, dejó como saldo 700 personas fallecidas, más de 7000 heridos, 22000 personas refugiadas, miles de edificaciones destruidas o inhabitables y pérdidas económicas estimadas en alrededor de tres mil millones de dólares.

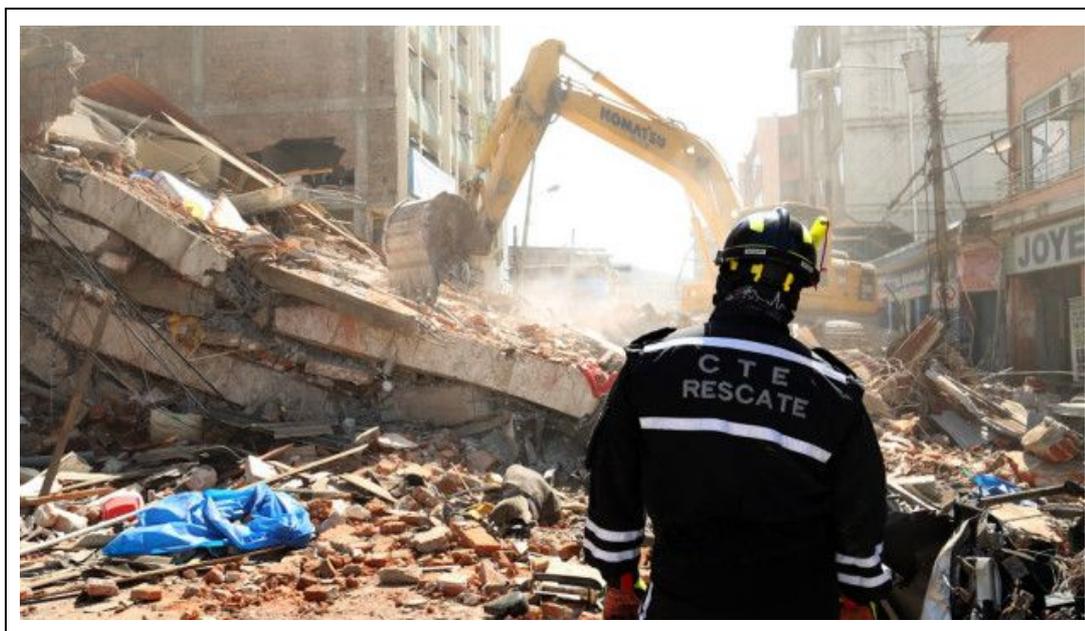


Figura 1.3 Un rescatista contempla las labores en Portoviejo, otra de las ciudades afectadas en el terremoto.

Fuente:

https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160416_ecuador_terremoto_magnitud_colombia_peru_bm

1.3 Peligro sísmico de Cuenca

Jiménez, J. et al (2018), hace referencia al estudio de vulnerabilidad sísmica llevado a cabo como parte del proyecto P-BID 400 *Amenaza sísmica en el Austro, vulnerabilidad y riesgo sísmico en la Ciudad de Cuenca*, por la Red Sísmica del Austro (1999-2002), donde se constató que: Cuenca es una ciudad con alta amenaza sísmica y que su centro histórico es particularmente vulnerable frente a este tipo de eventos.

En el marco del proyecto, se determinó que la fuente sismogénica crítica para la ciudad de Cuenca es la falla geológica de Girón. Ésta, inicia a 30km al sur del cantón Girón y se extiende por aproximadamente 200km atravesando la ciudad de Cuenca en su totalidad, ver Figura 1.4, y según Jiménez & Peñaherrera (2001), tiene un potencial sísmico estimado de 7.1 en magnitud de momento.

Los resultados del estudio que se menciona han sido corroborados por la Norma Ecuatoriana de la Construcción que ubica a Cuenca como una ciudad con alta amenaza sísmica.

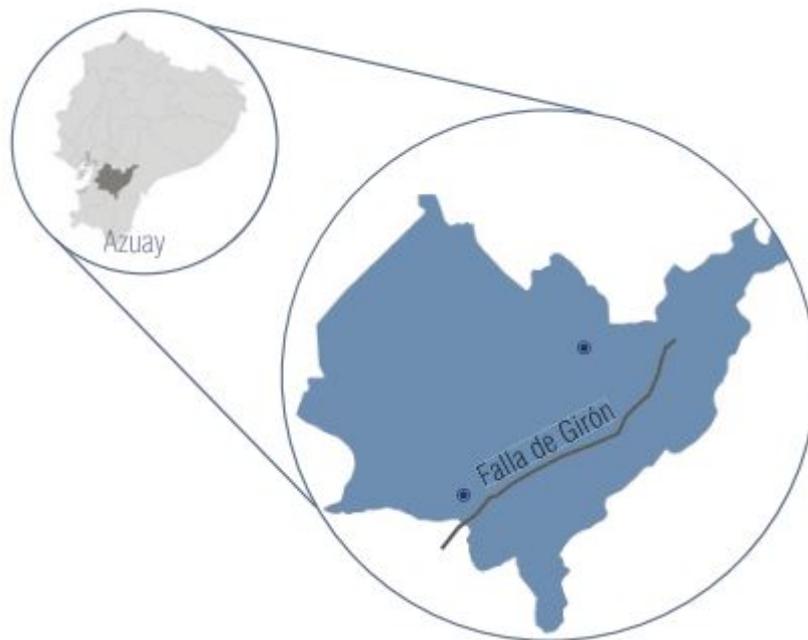


Figura 1.4 Ubicación de la Falla de Girón. Fuente: Alvarez, J. & Morocho, J. (2020) "Análisis sísmico de edificaciones aisladas con muros de mampostería en Cuenca."

El proyecto P-BID 400 estableció mapas de daño sísmico del patrimonio edificado de la ciudad, ver Figura 1.5 y 1.6, para los casos de un PGA de 0.05g y 0.25g, respectivamente.

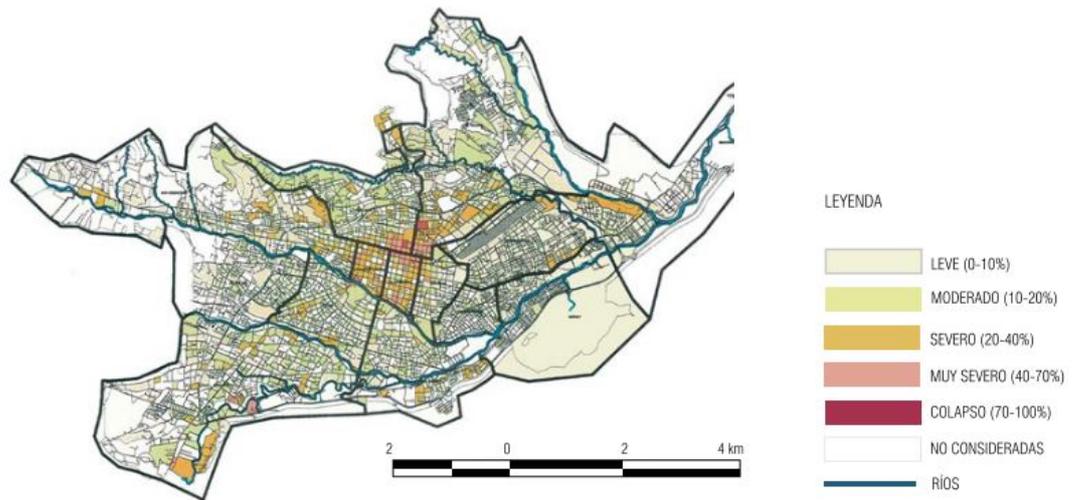


Figura 1.5 Mapa de daño sísmico en la ciudad de Cuenca con un PGA de 0.05g. Fuente: “Amenaza Sísmica del Austro, vulnerabilidad y riesgo sísmico en la ciudad de Cuenca”, de la Red Sísmica del Austro. (2002).

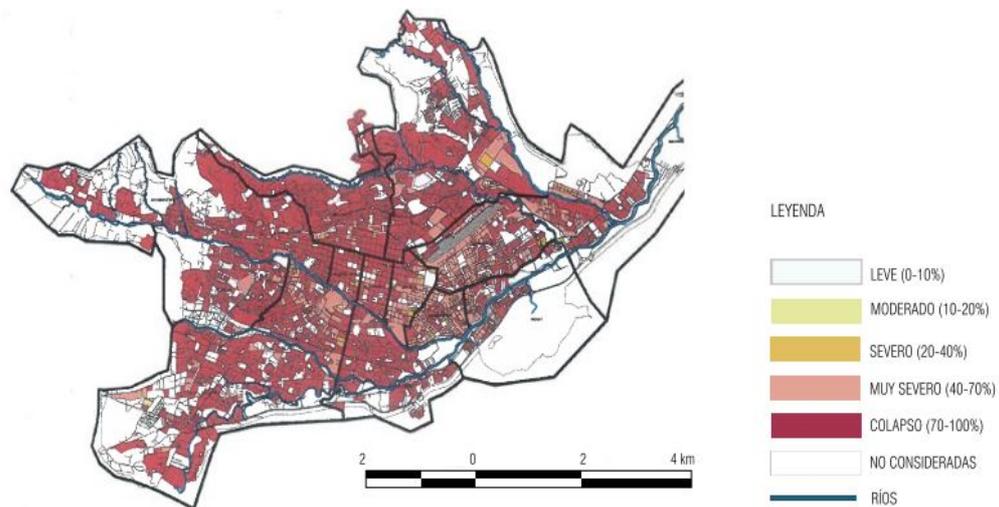


Figura 1.6 Mapa de daño sísmico en la ciudad de Cuenca con un PGA de 0.25g. Fuente: “Amenaza Sísmica del Austro, vulnerabilidad y riesgo sísmico en la ciudad de Cuenca”, de la Red Sísmica del Austro. (2002).

Como se puede observar en los mapas arriba indicados, la zona que presenta un daño sísmico elevado es el casco histórico de la ciudad, espacio que concentra la mayor parte de las edificaciones de mampostería no reforzada más antiguas de la urbe.

Capítulo II Metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica

Introducción

Con el fin de comprender mejor el estado actual relativo al estudio de la vulnerabilidad sísmica, este apartado ofrece una revisión condensada de algunas metodologías para el análisis y métodos de cálculo existentes en dinámica de estructuras empleados para la realización de estos estudios. Finalmente se presenta una breve reseña de estudios experimentales y numéricos disponibles dentro de la literatura que sirven como base para la ejecución de esta tesis.

2.1 Estudios de vulnerabilidad sísmica

En palabras de Flores Salazar & Ferreira (2019), las evaluaciones de vulnerabilidad sísmica surgen desde una óptica de inspección, para identificar los posibles daños existentes o futuros en caso de evento sísmico. Éstos, deben estar articulados dentro de un plan de prevención para proponer estrategias de mitigación y preparación ante el desastre.

En los últimos años, la ingeniería ha encaminado su interés hacia el mejoramiento del análisis de las construcciones, dichos análisis están relacionados principalmente con sus características mecánicas y efectos en estados estáticos y dinámicos.

2.1.1 Estudios de vulnerabilidad sísmica en edificaciones

En este tipo de estudio se evalúa básicamente: el uso del suelo, los materiales, la geometría, distribución de elementos estructurales, todo esto sumado a una posible intensidad de un sismo. El objetivo final es obtener un diagnóstico que permita tomar las medidas de prevención y/o de corrección que mejoren su capacidad de resiliencia ante eventos sísmicos.

Los estudios de vulnerabilidad sísmica pueden clasificarse en tres niveles, ver Figura 2.1, según la propuesta de (Flores Salazar & Ferreira, 2019).

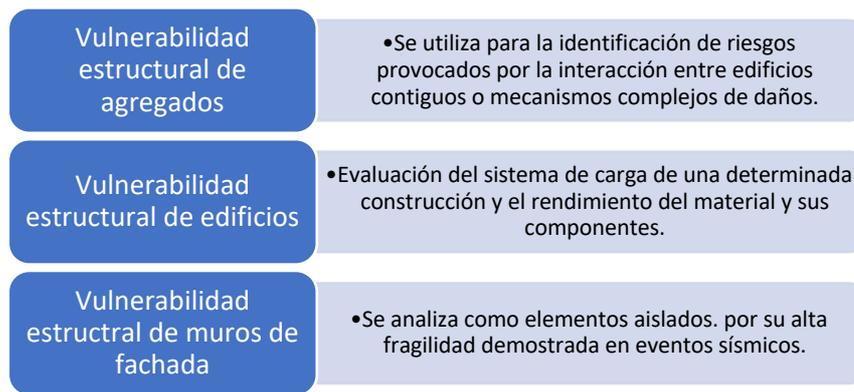


Figura 2.1 Niveles de estudios de vulnerabilidad en relación con los posibles objetivos de evaluación. Fuente: (Flores Salazar & Ferreira, 2019. Pág. 12); elaboración propia.

2.2 Métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica

La selección del método depende de la información disponible, el tiempo de emisión, el detalle requerido, el estado de conservación, el nivel de riesgo que presenta para los usuarios, la relevancia de la edificación y la cantidad de inmuebles considerados para el estudio (Flores Salazar & Ferreira, 2019. Pág. 13). Cabe señalar que los métodos están relacionados también con los objetivos de la evaluación, la disponibilidad de medios tecnológicos y la operatividad en el sitio.

De acuerdo con la literatura consultada, muchos de los autores concluyen que: es muy difícil procurar una revisión completa de todos los métodos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, siendo la principal limitante las características intrínsecas de cada uno de ellos.

La clasificación de la metodología depende de los datos, métodos empleados y los resultados, por lo tanto, será el especialista quien dirija o gestione el uso de uno o la combinación de varios de los instrumentos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica.

Para ilustrar de mejor manera algunas formas de abordar los estudios de vulnerabilidad sísmica, se presentan a continuación dos cuadros, cada uno muestra el enfoque tomado por sus respectivos autores, ver Figura 2.2 y Figura 2.3.



Figura 2.2. Métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica, Fuente:(Caicedo, Barbat, Canas & Aguiar, 1994, págs. 1-43), elaborado por: (Arteaga, 2016).



Figura 2.3. Metodología para evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Fuente: Flores Salazar & Ferreira, (2019), elaboración propia.

2.2.1 Método subjetivo o directo-tipológico

Dentro de las metodologías existentes, una de las más conocidas y aplicadas es el **FEMA 154 Procedimiento de investigación rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards (RSV)**, desarrollado en Estados Unidos y perfeccionado más tarde. Este método recomienda el rastreo visual rápido de edificios con algún grado de amenaza sísmica, se basa en una “encuesta in situ” y un formulario de recolección de datos. Si bien el RSV es aplicable a todos los edificios, su propósito principal es identificar:

- Edificios viejos, diseñados y construidos antes de la adopción de los requisitos sismo resistentes.
- Edificios en suelos suaves o de capacidad portante limitada.
- Edificios que tienen un esquema estructural en planta y elevación que influyen negativamente en su respuesta sísmica.

Arteaga (2016) ubica la metodología FEMA 154 dentro del grupo de métodos subjetivos, como un método que evalúa la capacidad sísmica, basado en un sistema de calificación. Por otro lado, Flores Salazar & Ferreira (2019) inscribe el método dentro del grupo de métodos directos – tipológicos. En este estudio no se aplica este tipo de métodos, sin embargo se considera importante realizar una breve introducción y señalar su relevancia.

2.2.2 Método mecánico-detallado o analítico

Los procedimientos de análisis lineal (estático o dinámico) y el análisis no lineal (estático o dinámico), entran dentro de los métodos directos – mecánicos – detallados, según Flores & Ferreira (2019) y dentro de los métodos analíticos para Arteaga (2016). Este tipo de análisis son modelos refinados, orientados a construcciones individuales con un alto grado jerárquico. La figura 2.4, resume los fundamentos de estos métodos.



Figura 2.4. Análisis lineal y no lineal (estático y dinámico). Fuente: (Bonnet Díaz, 2003, pág.14), elaboración propia.

Aunque para la tesis que se desarrolla en este manuscrito no se considera los métodos subjetivos, cabe señalar que, combinar un método analítico o mecánico con un método tipológico o subjetivo para abordar este tipo de estudios, ayuda a considerar la mayor cantidad de variables posibles, reduciendo el grado de incertidumbre de los resultados obtenidos.

El trabajo que se desarrolla en este manuscrito está centrado en el **análisis estático lineal**.

2.3 Análisis dinámicos de estructuras

Ya que el eje central de este proyecto es la estimación de la vulnerabilidad sísmica mediante la aplicación de un método analítico, en este apartado se abordan los métodos reglamentarios del análisis de estructuras, con el fin de comprender mejor el estado del conocimiento relativo al análisis del comportamiento sísmico de estructuras. Este apartado está inspirado del trabajo de (Vieux-Champagne, 2013).

2.3.1 Métodos reglamentarios para el análisis de estructuras

Ecuación de equilibrio dinámico

Se habla de problema de dinámica, no porque la carga varia en el tiempo, sino más bien, porque estas engendran fuerzas de inercia. Para una estructura modelada por un sistema de n grados de libertad (GDL), el equilibrio dinámico esta dado por la ecuación:

Ecuación 2.1

$$[M]\{\ddot{v}(t)\} + [C]\{\dot{v}(t)\} + [K]\{v(t)\} = \{f(t)\}$$

Donde: $f(t)$ es el vector de fuerzas externas, $v(t)$, $\dot{v}(t)$ y $\ddot{v}(t)$ son respetivamente los vectores desplazamiento, velocidad y aceleración, en tanto que M, C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente. Los vectores están compuestos por n términos y las matrices tienen un tamaño de $n \times n$.

- El termino, $K * v(t)$ modeliza las fuerzas internas, que se oponen a los desplazamientos. Dentro del caso general de sistemas no lineales, la matriz de rigidez no es constante, y depende de $v(t)$. En el caso de sistemas lineales, la matriz de rigidez es constante, lo que simplifica notablemente la resolución de la ecuación.
- El termino, $C * \dot{v}(t)$ modeliza las fuerzas de amortiguamiento viscoso que se oponen a la velocidad. Para un sistema lineal, el amortiguamiento global del sistema depende exclusivamente de este término. Por otro lado, en el caso de un sistema no lineal, la no linealidad va a la par con una disipación de energía, por lo tanto, un amortiguamiento, generalmente llamado estructural o histerético. El amortiguamiento global de la estructura es entonces la suma de amortiguamiento viscoso e histerético.
- El termino $M * \ddot{v}(t)$ modeliza las fuerzas de inercia, que se oponen a la aceleración. Las masas se encuentran ante todo al nivel de la cubierta y los entresijos.
- El vector $f(t)$ define para cada grado de libertad GDL la fuerza de sollicitación debida al sismo. Los términos de $f(t)$ son calculados a partir del acelerograma del sismo impuesto y de las masas vinculadas a cada GDL.

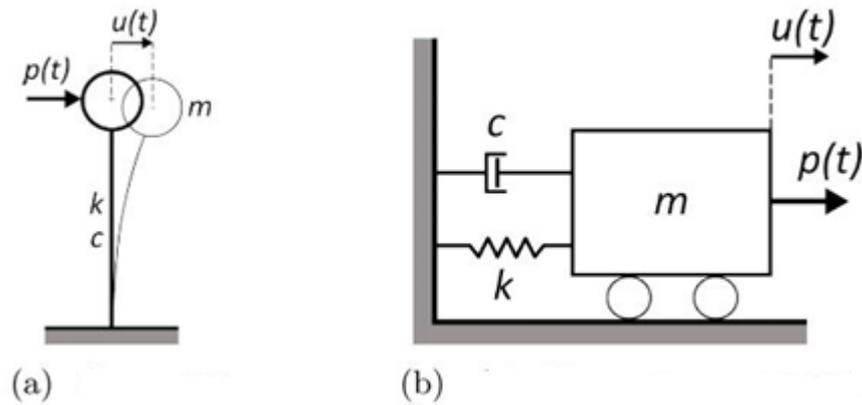


Figura 2.5. Representación de un sistema de un grado de libertad, (a) Estructura de 1 gdl, (b) Modelo masa-resorte-amortiguador equivalente.

Los modelos simplificados a un solo GDL son regularmente utilizados en dinámica de estructuras. La figura 2.5, esquematiza este tipo de modelo y su modelo masa-resorte-amortiguamiento equivalente

Análisis simplificados

Cuando un modelo con gran número de grados de libertad es necesario, el análisis demanda una importante cantidad de recursos para el cálculo. Este tipo de restricción a propiciado el surgimiento de métodos de análisis simplificados. Éstos vuelven los cálculos más abordables idealizando el comportamiento de la estructura, de manera lineal o bilineal, al calcular solamente una respuesta en particular, en general un desplazamiento o un esfuerzo máximo, en lugar de la respuesta temporal completa.

Los métodos lineales toman en cuenta la no linealidad a posteriori, gracias a un coeficiente apropiado. En contraparte, estos acercamientos no permiten proveer las informaciones sobre los componentes locales. Tres métodos de cálculo simplificado son generalmente utilizados:

- Análisis por fuerzas laterales.
- Análisis modal – espectral. (Método seleccionado para el estudio)
- Análisis “push-over”.

Los dos primeros son métodos lineales y el tercero es un análisis no lineal.

Método de análisis por fuerzas laterales

Este método es utilizable bajo el criterio de regularidad y que la respuesta de la estructura no debe ser significativamente afectada por otro modo de vibración que el modo fundamental. Este punto se comprueba si el periodo fundamental vale menos de $4 T_c$ dentro de un límite de 2,0s (T_c es el periodo del final de la parte plana del espectro de cálculo). El periodo fundamental puede ser obtenido de varias maneras diferentes:

- Como una función de la altura del edificio, con $T_1 = C_t * H^{3/4}$, donde H es la altura del edificio en metros y el valor C_t depende del tipo de edificio.
- Como una función de desplazamiento d bajo cargas gravitatorias aplicadas horizontalmente, $T_1 = 2\sqrt{d}$.
- A través de un método más elaborado como el método de Rayleigh.

El esfuerzo cortante sísmico en la base de la estructura V es el esfuerzo equivalente para la sollicitación dinámica esperada. Éste, está calculado para cada dirección principal como el producto de la aceleración espectral y de la masa.

Un factor R aparece para tomar en cuenta criterios relacionados con aspectos de agrupamiento de estructuración, diferencias entre realidades constructivas y de la calidad entre los materiales y la construcción, y penalizaciones dirigidas hacia cierto tipo de estructuras que no permiten disponer de ductilidad global apropiada para soportar las deformaciones inelásticas requeridas por el sismo de diseño (NEC-SE-DS, 2015, pág. 63).

Ecuación 2.2

$$V = \frac{I S_a(T_a)}{R \phi_P \phi_E} W$$

Dónde:

$S_a(T_a)$ Espectro de diseño en aceleración; (NEC-SE-DS, sección 3.3.2).

ϕ_P y ϕ_E Coeficientes de configuración en planta y elevación; (NEC-SE-DS, sección 5.3)

I Coeficiente de importancia, (NEC-SE-DS, sección 4.1)

R Factor de reducción de resistencia sísmica, (NEC-SE-DS, sección 6.3.4)

V	Cortante basal total de diseño.
W	Carga sísmica reactiva; (NEC-SE-DS, sección 6.1.7)
T_a	Periodo de vibración; (NEC-SE-DS, sección 6.3.3)

En el caso de estructuras de varios pisos, el cortante V debe estar distribuido sobre cada nivel. La fórmula general consiste en calcular estos esfuerzos a partir de V , los desplazamientos y las masas modales.

Ecuación 2.3

$$V_i = V \frac{s_i m_i}{\sum s_j m_j}$$

Dónde:

V_i esfuerzo cortante al nivel i (N).

m_i, m_j masas de los niveles i y j (kg).

s_i, s_j desplazamientos de las masas m_i y m_j dentro del modo fundamental (m).

En el caso de la hipótesis de una evolución lineal de desplazamientos en función de que la altura haya sido utilizada, se propone una formula simplificada.

Ecuación 2.4

$$V_i = V \frac{z_i m_i}{\sum z_j m_j}$$

z_i y z_j son las alturas de las masas m_i y m_j (m).

Los desplazamientos son calculados de manera lineal a partir de las solicitaciones proveídas por el espectro de diseño. La deriva máxima inelástica Δ_M de cada piso esta dada por $\Delta_M = 0.75R\Delta_E$, Δ_E es el desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas.

Método general por análisis modal-espectral

Para los edificios cuya respuesta está afectada de manera no despreciable por los efectos de varios modos de vibración, y que no cumplen entonces los criterios de

utilización del análisis por fuerza lateral, es el método de análisis modal que es retenido.

El modelo de la estructura es elástico lineal y es el espectro de cálculo que sirve de referencia para las solicitaciones. Como para el análisis por fuerza equivalente, la no linealidad de la estructura es tomada en cuenta dentro del espectro de cálculo por la utilización del coeficiente de comportamiento.

Para justificar que las respuestas de todos los modos significantes están tomadas en cuenta, es necesario comprobar que la suma de las n masas modales es superior al 90% de la masa total, o que todos los modos para los cuales la masa modal es superior al 5% de la masa total están considerados.

Método push-over

El método push-over está compuesto por dos fases distintas: en primer lugar, una curva de capacidad es calculada mediante un análisis estático no lineal bajo cargas gravitatorias constantes y bajo cargas horizontales monótonas. A continuación, una curva de demanda sísmica es calculada mediante la reducción del espectro de respuesta elástica.

La curva de capacidad puede ser obtenida a partir de dos modelos planos (uno dentro de cada dirección principal) en el caso donde los criterios de regularidad son respetados. En caso contrario, un modelo espacial debe ser utilizado y estudiado independientemente en dos direcciones. La curva de capacidad representa el esfuerzo cortante en la base de la estructura en función del desplazamiento de control, generalmente el del techo de la edificación.

La selección de la repartición vertical de cargas laterales es un aspecto crucial del método. En efecto, para cada modo de la estructura corresponde una repartición vertical de cargas laterales. Así, la distribución vertical correspondiente al modo propio fundamental será igual a la distribución de los esfuerzos al momento de un sismo para una estructura ficticia teniendo un solo modo propio. Por tanto, la distribución vertical de la carga es una aproximación (Vieux-Champagne, 2013).

2.4 Revisión bibliográfica: Estudios de vulnerabilidad sísmica

Como se establece en el apartado 1.1.3, la vulnerabilidad depende de las condiciones intrínsecas o extrínsecas propias de cada edificación. En cuanto al caso específico de la ciudad de Cuenca y su centro histórico, se han llevado a cabo algunos estudios de vulnerabilidad sísmica cuyos resultados, aportan datos que permiten caracterizar el comportamiento sísmico de estas edificaciones, así mismo, ayudan a continuar y profundizar en el proceso de estudio de la vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Cuenca. Entre los resultados a los que llegan los autores, cabe destacar:

Los mapas de vulnerabilidad elaborados por Jiménez, J. (2002). *Vulnerabilidad Sísmica de las edificaciones de la ciudad de Cuenca mediante técnicas de simulación*. Estos mapas consideran tres niveles de acción sísmica: leve, moderado y severo, este estudio se inscribe dentro del marco del proyecto P-BID 400.

El proyecto P-BID 400 *Amenaza sísmica en el Austro, vulnerabilidad y riesgo sísmico en la Ciudad de Cuenca*, por la Red Sísmica del Austro (1999-2002), en lo tocante a vulnerabilidad sísmica estableció mapas de diseño sísmico del patrimonio edificado de la ciudad para cinco niveles de acción sísmica, medidos en términos de aceleración máxima en roca: 0.05g, 0.10g, 0.20g, 0.25g y 0.30g. El mapa integrado de daño estructural, ver Figura 4, correspondiente a 0.05g (sismo leve), evidencia la mayor vulnerabilidad sísmica del CHC, en donde se encuentran las edificaciones de mampostería no reforzada.

Como resultado del análisis comparativo entre prototipos de viviendas con paredes macizas de ladrillo y paredes con aberturas, Bravo & Flores (2015), concluyen que el tamaño de la abertura y la carga axial aplicada, son las variables que influyen directamente en la resistencia lateral máxima de las paredes.

El artículo, *Vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto*, de Jiménez et al, (2018), se plantea como un avance con respecto al proyecto realizado en el marco

del proyecto P-BID 400, la mejora propuesta es fundamentalmente en lo concerniente al modelo de capacidad de las edificaciones. En relación con el proyecto de vulnerabilidad, adopta una modelización 3D, de esta manera, es posible encarar aspectos como la flexibilidad en el plano del sistema de piso y la distribución de paredes. De este primer avance queda establecido lo siguiente:

- a) Los entre pisos de envigado y entablado, típicos en las edificaciones el CHC, no presentan gran variabilidad. Son pisos que van de flexibles a muy flexibles, esto puede ocasionar grandes desplazamientos e inducción a la falla fuera del plano.
- b) En cuenta a la distribución de paredes se constató un bajo grado de tipicidad, más grave aún, se constata una importante discontinuidad entre estas, sobre todo en la dirección larga de la edificación.

Arteaga (2016), realiza un análisis de vulnerabilidad sísmica de una edificación patrimonial, desde una aproximación subjetiva mediante el uso de la metodología FEMA 154 (2002), y desde una aproximación analítica mediante una valoración del índice de daño ante la presencia de un sismo de diseño, como establece la NEC. El autor recalca la importancia de realizar este tipo de evaluaciones en detalle y específicamente para cada edificación, debido a las características propias de sus materiales y configuración estructural.

En la tesis, *Capacidad Sísmica de las Estructuras de Mampostería del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca*, realizado por García & Guatarazaca, (2019). Los autores tipifican las estructuras considerando su tamaño, clasificándolas en tres grupos: edificaciones de tamaño pequeño, mediano y grande, a continuación, seleccionan una estructura representativa de cada categoría para someterlas a un análisis sísmico, finalmente analizan la capacidad en el plano y fuera del plano de los edificios de mampostería del CHC. Con base en los resultados obtenidos se comprueba que:

- a) En el prototipo de vivienda pequeña, el modo de falla preponderante es el volcamiento, con el 36% de paredes

comprometidas, por lo tanto, se espera el colapso global de la estructura.

- b) En cuanto a las tipologías de vivienda mediana y grande, se observa que los modos de falla son principalmente el agrietamiento en las esquinas y el balanceo, por lo que se espera un colapso parcial de las estructuras.

Alvarez & Morocho (2020), en el estudio *Análisis sísmico de edificaciones aisladas con muros de mampostería en Cuenca*, resalta la estrecha relación que existe entre la configuración arquitectónica y el comportamiento sísmico de las edificaciones. Luego de contrastar los resultados obtenidos de los tres casos de análisis, establecen que:

- a) La relación entre la alineación de las paredes y el porcentaje de masa que se desplaza ante fuerzas sísmicas es directa. Por el contrario, se tiene una relación inversa entre el porcentaje de alineación de paredes y las derivas máximas de piso; a mayor porcentaje de alineación de paredes menor es el valor de las derivas de piso.
- b) Mientras más alejado de 1 se encuentre el valor de la relación largo/ancho, existe un mayor porcentaje de participación de masa, por último, se identificó que a mayor masa se tiene un mayor desplazamiento.

Finalmente, en el trabajo de grado, *Caracterización del patrimonio edificado irregular de baja altura del centro histórico de Cuenca, orientado a estudios de Vulnerabilidad Sísmica*, los autores Cornejo & Zúñiga (2020), realizan una caracterización de las edificaciones del CHC basándose en criterios de orden arquitectónico, mecánico y estructural, estableciendo indicadores de las características generales de las viviendas. Mediante el uso de herramientas estadísticas para el procesamiento de las variables obtenidas en la fase de caracterización, los autores determinan las edificaciones que cumplen con la mayoría de los criterios, de las cuales seleccionan dos viviendas, una de tipo MNR y otra de tipo VAP que son sometidas a un análisis sísmico, sirviéndose de la herramienta computacional Stabil.

Los resultados obtenidos demuestran que ambos sistemas MNR y VAP fracasan; estos resultados reflejan claramente como las modificaciones realizadas en las viviendas por el cambio de uso, afectan la estructura e impiden un adecuado comportamiento sísmico.

Capítulo III Descripción del caso de estudio

Introducción

Este capítulo presenta en detalle la edificación seleccionada como caso de estudio, sus características formales, funcionales y estructurales.

3.1 Edificación propuesta para el análisis de vulnerabilidad sísmica

3.1.1 Caso de estudio: casa “La Condamine”



Figura 3.1 Casa "La Condamine" años 30. Fuente: Lloret (2016) "Estudio para la restauración, rehabilitación y adecuación a nuevo uso del inmueble de propiedad de S.A. Arthoteles Ecuador"



Figura 3.2 Casa "La Condamine" estado previo a su restauración. Fuente: Lloret (2016) "Estudio para la restauración, rehabilitación y adecuación a nuevo uso del inmueble de propiedad de S.A. Arthoteles Ecuador"

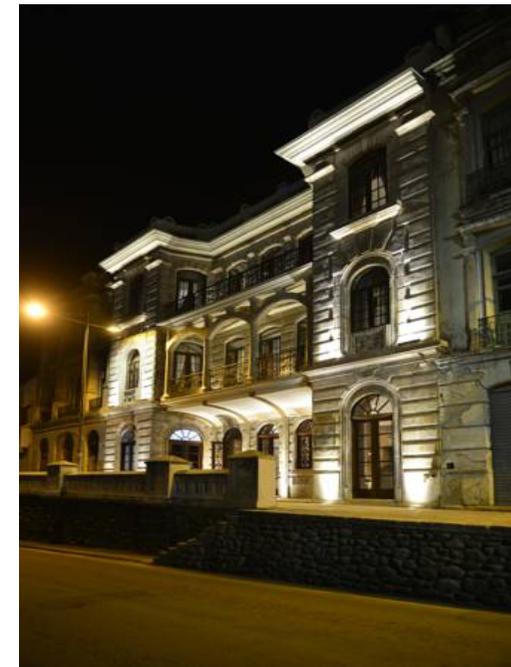


Figura 3.3 Hotel Cruz del Vado, edificación conocida como "Casa La Condamina", estado actual luego de su restauración. Fuente: Google Fotos

DATOS GENERALES	
Parroquia:	Gil Ramírez Davalos
Dirección:	Calle La Condamine 12-56 y Tarqui, (Sector Plaza del Vado)
Ubicación geográfica:	Posición Este (m): 721329.10
	Posición Norte (m): 967953.79
	Altura sobre el nivel del mar (m): 2540.50
	Área aproximada del predio (m2): 495,2
Datos municipales:	Clave catastral: 01-02-047-030-000
	Zona: 01
	Sector: 02
	Manzana: 047
	Predio: 030
	Área aproximada de construcción (m2): 1486.6
	Longitud de frente (m): 15.6
Propietario actual:	ART HOTELES S.A.
Año de construcción:	Estimado durante el decenio 1925 a 1935
Implantación:	En banda, adosada a sus dos costados
Número de plantas:	4

Tabla 3.1. Datos Generales edificación "Casa Condamine". Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del archivo de catastros del GAD Cuenca

Ubicación

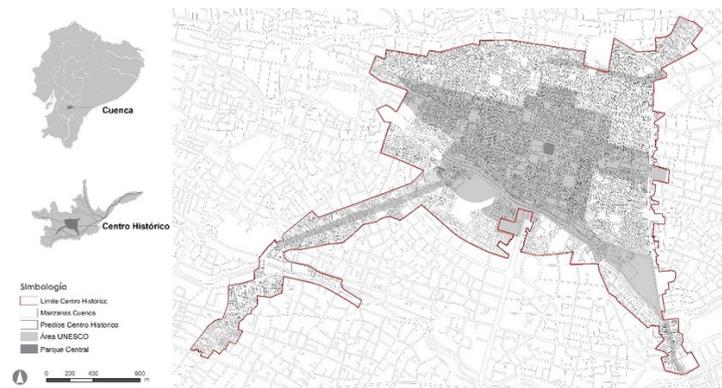


Figura 3.4 Zona UNESCO dentro del Centro Histórico de Cuenca. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Zona-UNESCO-dentro-del-centro-historico-de-Cuenca_fig1_342315625



Figura 3.5 Ubicación del caso de estudio. Fuente: (Cornejo Pintado & Zúñiga Saca, 2020), elaboración propia.

Categorización de la edificación según la ordenanza municipal local: edificación de valor arquitectónico A (VAR A) (3)

Edificación de valor arquitectónico A (VAR A) (3): Se denomina de esta forma, las edificaciones que, cumpliendo con rol consultivo en la morfología del tramo, de la manzana o del área en el que se insertan por sus características estéticas, históricas, o por su significación social, cuentan con valores sobresalientes, lo que les confiere un rol especial dentro de su propio tejido urbano o área (GADMCC, 2020).

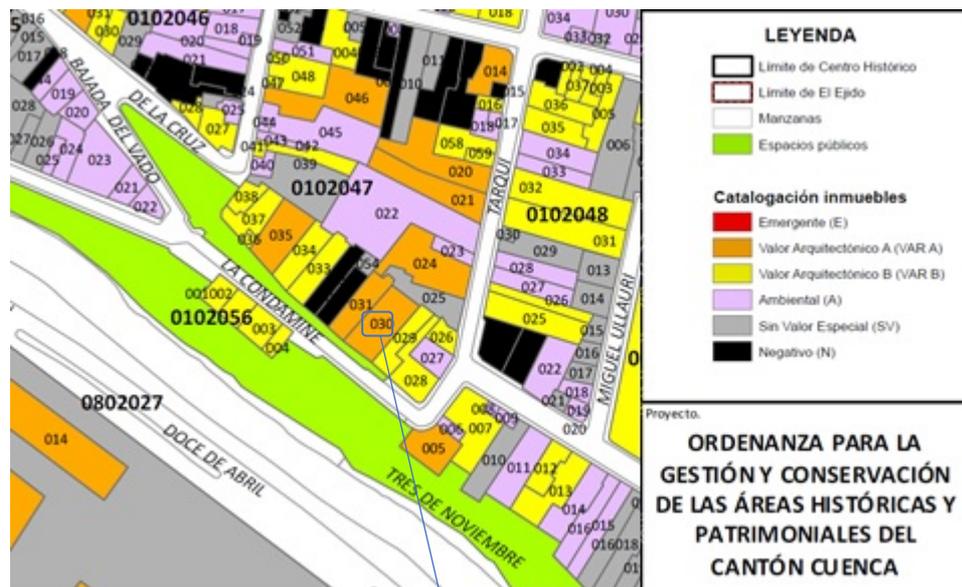


Figura 3.6 Edificaciones Patrimoniales Registradas en el Centro Histórico. Fuente: Dirección de Áreas Históricas y Patrimoniales (2015)



Figura 3.7 Emplazamiento de la edificación. Fuente: elaboración propia

Emplazamiento

La edificación se encuentra ubicada en la calle La Condamine 12-56 y Tarqui, ver figura 3.7, en el sector 01 de la parroquia Gil Ramírez Davalos. La implantación del edificio es en banda, sin retiro y adosada en cada costado a viviendas de características similares. El inmueble está emplazado con frente a la actual calle Condamine, forma parte del conjunto monumental conocido como el Barranco, que es un corredor natural que atraviesa y divide la ciudad, junto a la orilla norte del río Tomebamba.

Específicamente la edificación tomada para este estudio está ubicada en el barrio “El Vado”, actualmente pertenece a una cadena hotelera nacional, el inmueble ha sido sometido a un proceso de rehabilitación y restauración con el fin de convertirlo en un hotel de primer nivel, esto ha contribuido a mejorar la imagen del sector que en distintas épocas ha sido mal visto por múltiples factores.



Figura 3.8 "Barrio de Vado" años 30. Fuente: J.S. Sánchez. Archivo personal Arq. G. Lloret O. Fotos antiguas Cuenca

3.1.1.2 Breve análisis arquitectónico

El análisis arquitectónico a profundidad no es el objetivo de este trabajo, sin embargo, se presenta una breve reseña arquitectónica del estado del inmueble, esto ayuda a construir de mejor manera una idea general del caso de estudio.

Tabla 3.2 Breve reseña arquitectónica. Fuente: (Lloret Orellana, 2016), elaboración propia.

Tipología

- Patio central alrededor del cual se desarrollan los corredores y habitaciones.
- Arquitectura simple y sin adornos, paredes blancas, nichos profundos para puertas y ventanas, teja clonial, molduras para marcos de puertas, , hierro para rejas y barrotes para ventanas, pisos de terracota, cargadores para puertas y ventanas, y arcos de medio punto en galerías.

Estilo y composición

- Diseño de fachada muy bien logrado, desde sus balcones y terrazas se tiene visuales hacia la parte sur este y oeste de la ciudad en perspectiva de caso 180°, y al mismo tiempo hacia la edificación desde la Av. 12 de Abril.
- Edificio simétrico, concebido a partir de un eje vertical central de tres cuerpos y a tres niveles rematado con una terraza a todo lo ancho como un cuarto nivel.
- En el cuerpo intermedio se destaca una liviana arquería compuesta por tres arcos rebajados construidos en marmol que soportan la terraza del tercer nivel.
- La fachada de estilo frances, esta compuesta por almohadillado en marmol, que enmarca puertas y ventanas en arcos de medio punto.

Función

- Fue ocupada desde su concepción como vivienda.
- Es una edificación en hilera o medianera, al rededor del primer patio se emplazan seis habitaciones que habrían tenido la función de dormitorios, no existen galerías o portales.

Etapas constructivas

- Todo lo que rodea el primer patio. La crujía frontal costruida con muros de ladrillo y paredes medianeras en adobe a nivel de planta baja y para la división de espacios internos la utilización de bahareque.
- Los remates escultóricos que tenía la edificación, son originales del diseño y posiblemente fueron retirados a inicios de la decada de los sesenta para dar paso a dos ampliaciones.
- Lo construido en el segundo patio obedece a una serie de adiciones que se dieron a través del tiempo y que no tienen valor patrimonial.



Figura 3.9 Fachada original “Casa Condamine” años 30. Fuente: J.S. Sánchez. Archivo personal Arq. G. Lloret O. Fotos antiguas Cuenca

3.1.1.3 Plantas arquitectónicas

Planta Baja

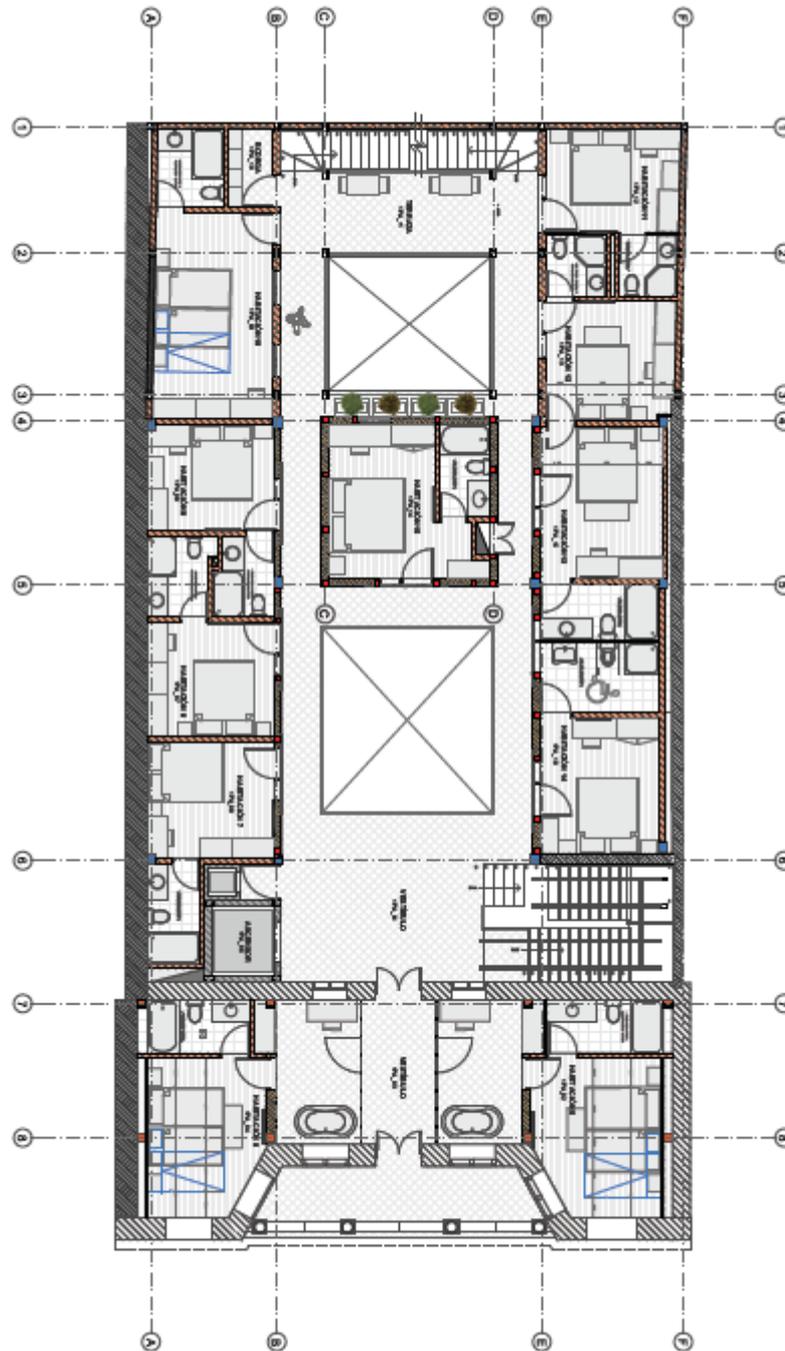


Figura 3.10 Planta Baja. Fuente: Arq. Sebastian Lloret, 2018.

Primera Planta Alta

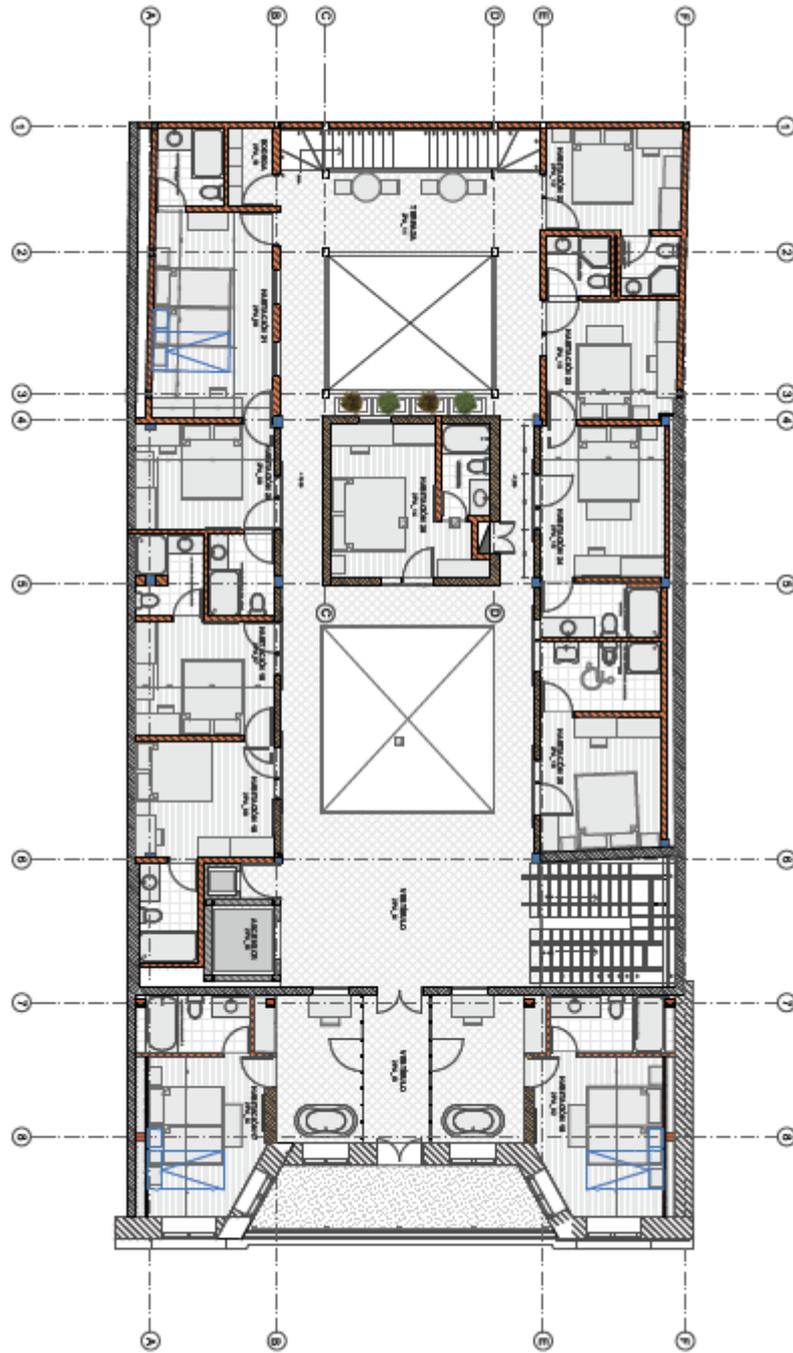


Figura 3.11 Primera Planta Alta. Fuente: Arq. Sebastian Lloret, 2018.

Segunda planta alta

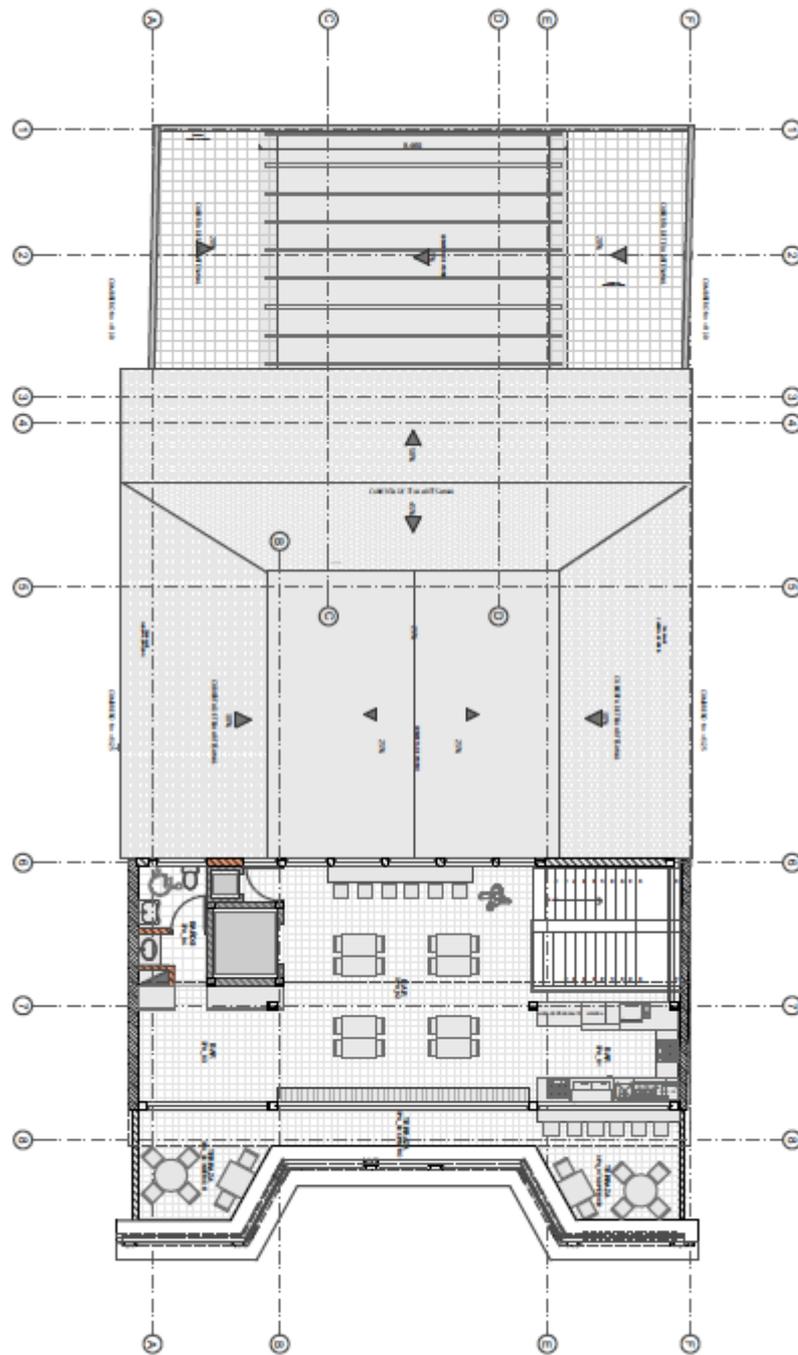


Figura 3.12 Segunda Planta alta. Fuente: Arq. Sebastian Lloret

Elevaciones-Secciones

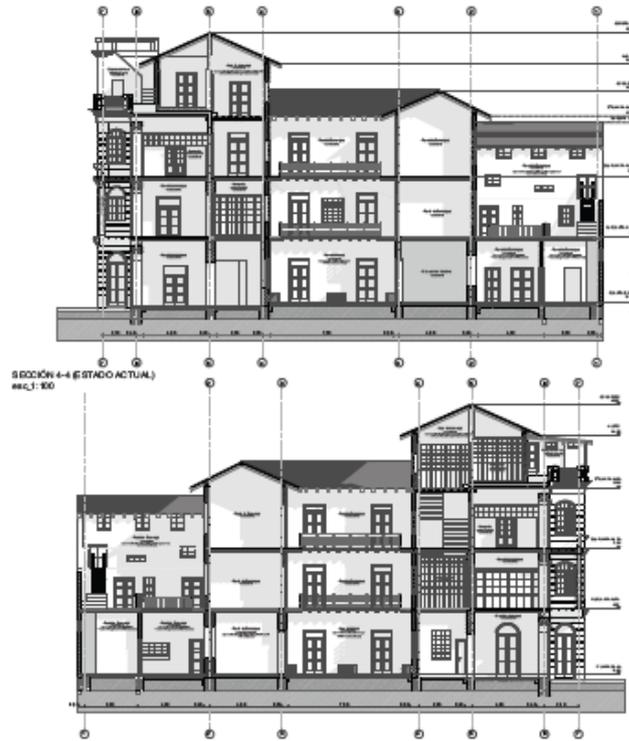


Figura 3.13 Elevaciones-Secciones. Fuente: Arq. Sebastian Lloret, 2018.

3.1.1.4 Descripción de la edificación propuesta

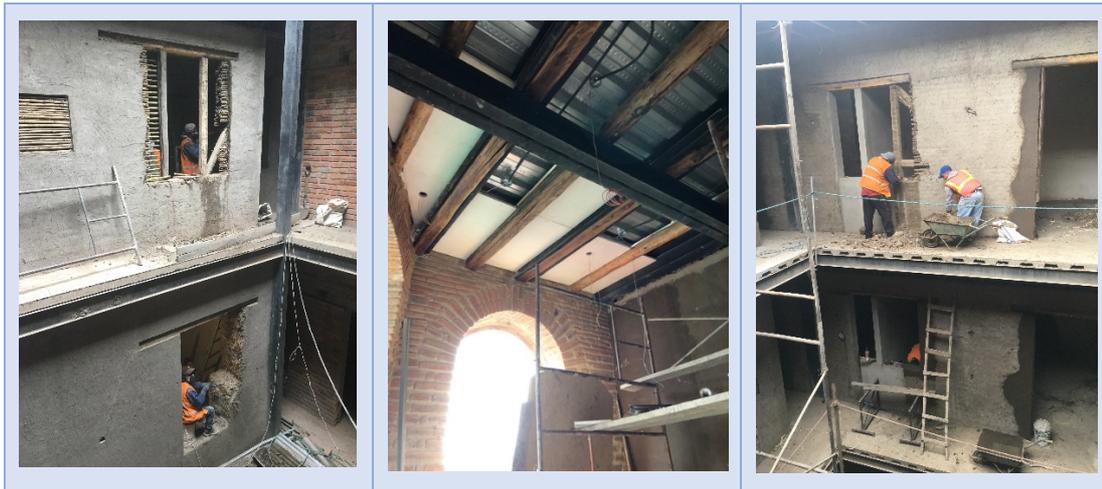
Como se menciona en apartados anteriores, la edificación elegida para este estudio fue sometida a un proceso de restauración y rehabilitación para su nuevo uso como hotel. Este proceso le otorgó características particulares, se puede decir que es un híbrido entre técnicas de construcción y materiales antiguos y modernos, por lo tanto, se espera un comportamiento particular de cada uno de los sistemas que la conforman.

Debido a esto, la descripción a continuación se enfoca estrictamente en el estado actual de la estructura. Los parámetros como: características morfológicas, geométricas, mecánicas y su materialidad, ver tabla 3.3, constituyen la base del modelo matemático y del análisis que se ha realizado más adelante.

Las imágenes presentadas en la tabla 3.3 provienen del archivo personal del profesional a cargo del proyecto de restauración de la edificación objeto del presente estudio.

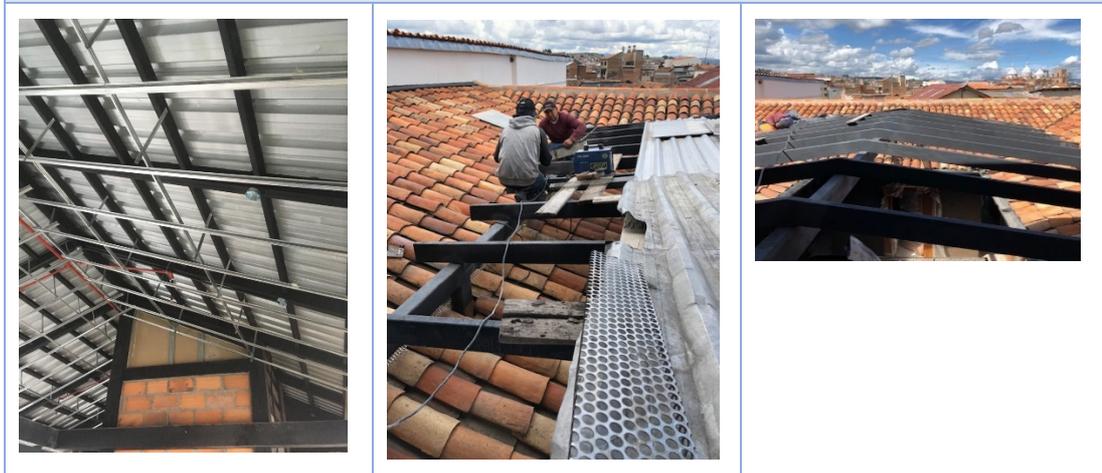
Tabla 3.3 Materialidad de la "Casa La Condamine"

MATERIALIDAD DE LA EDIFICACIÓN		
Paredes (Mampostería)		
Adobe	Bahareque	Ladrillo
		
Fachada		
Mármol	Cal + Ladrillo	
		
Estructura (Perfilería en acero)		
Columnas	Vigas	Entrepisos



Cubierta

Estructura en acero, DEC metálico y teja



Forma y distribución de paredes

La edificación tiene forma rectangular regular, las paredes laterales que colindan con las dos viviendas vecinas, son las paredes de adobe originales, los frontispicios y la siguiente pared de la primera crujía están construidas en base a lo que se conoce como “cal y ladrillo”. Si bien la distribución espacial original fue modificada, las paredes que siguen los ejes principales se conservan hoy, así mismo sus característicos patios principales y corredores, figuras 3.15 y 3.16.

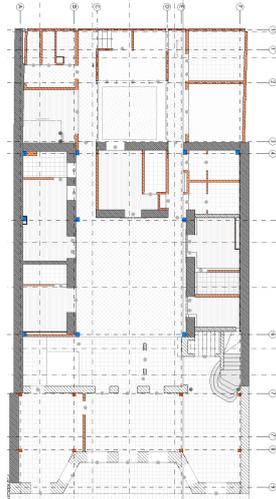


Figura 3.15 Planta proyecto. Fuente: Arq. Sebastian Lloret

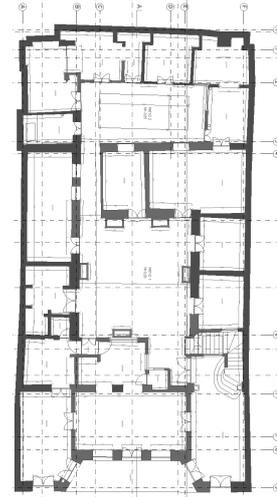


Figura 3.16 Planta original. Fuente: Arq. Sebastian Lloret

Altura de entrepiso

El inmueble tiene una altura de 4.08m en planta baja, 3.82m en la primera planta alta, 3.75m en la segunda planta alta, 3.30m en la tercera planta alta. En cuanto a las cubiertas, el cumbrero de la cubierta posterior culmina a una altura del 11.30m, el cumbrero de la cubierta intermedia culmina en 13.30m y el cumbrero de la cubierta de la tercera planta alcanza una altura de 16.95m, ver figura 3.17.

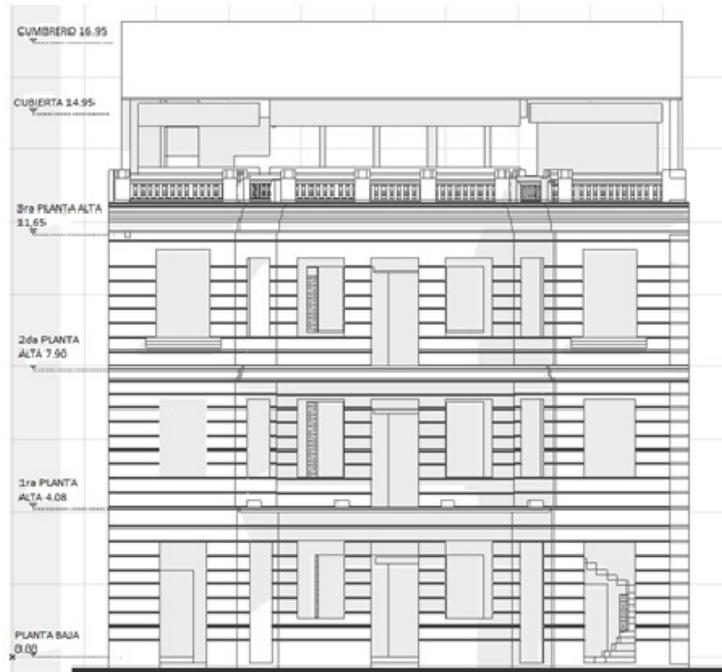


Figura 3.17 Elevación frontal. Fuente: Arq. Sebastian Lloret, 2018.

Relación de aspecto

La edificación posee una forma rectangular, figura 3.18, el frente tiene una longitud de 15.60m y el fondo alcanza 31.44m, por lo tanto, presenta una relación de aspecto de 0.50.

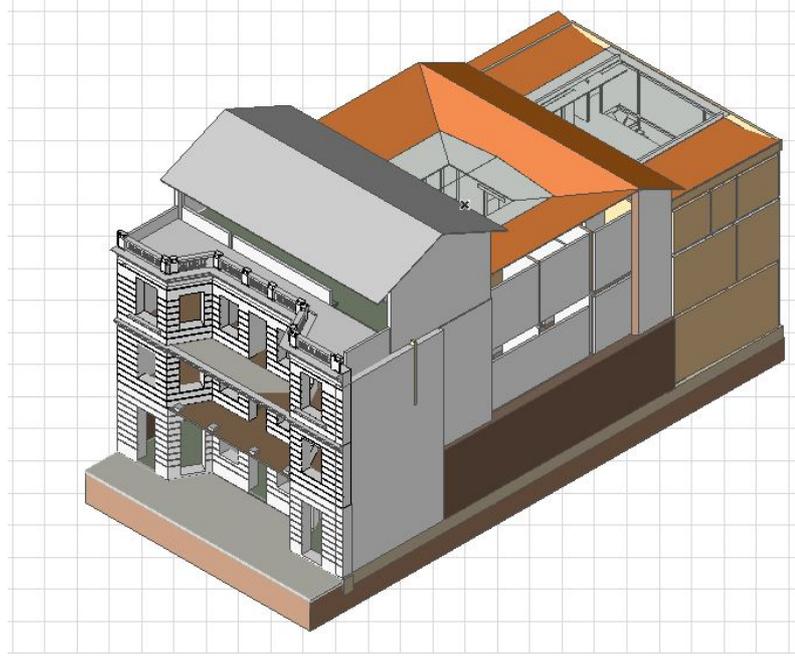


Figura 3.18 Axonometría. Fuente: Proyecto de restauración de la casa “La Condamine”, elaboración: Arq. Sebastian Lloret O.

Espesor de paredes

La edificación presenta gran variabilidad en cuanto a espesores debido a los materiales que constituyen la mampostería y al proceso de restauración del que fue sujeto, donde se preservó gran parte de la mampostería original, y se construyó nueva mampostería en bahareque para preservar las características originales del inmueble.

Las paredes exteriores laterales de adobe, que colindan con las viviendas vecinas tienen un espesor de 50cm, la fachada principal es una pared de “cal y ladrillo” revestida de mármol con espesor total de 70cm, la segunda crujía, igualmente en “cal y ladrillo” de 50cm de espesor. Al interior varía en todas las plantas, entre el eje 1 y el eje 3 toda la mampostería nueva en ladrillo con un espesor de 15cm en todos los niveles.

A partir del eje 3 se conservan las paredes originales en adobe de 50cm de espesor en planta baja; en las siguientes plantas la mampostería es de bahareque con espesores de 20 y 30cm.

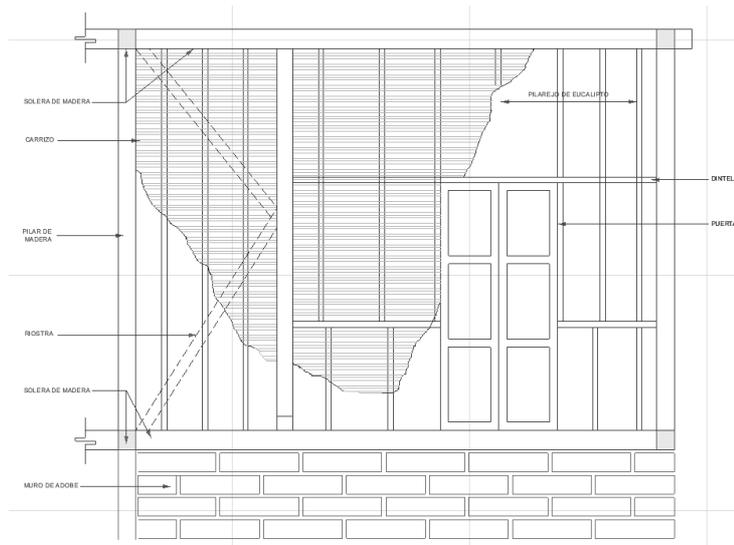


Figura 3.19 Esquema de composición de la mampostería. Fuente: Proyecto de restauración de la casa “La Condamine”, elaboración: Arq. Sebastian Lloret O.

Sistema estructural

Para modelar la edificación y determinar su comportamiento sísmico, es necesario analizar su estructura y la materialidad que posee el sistema de piso y el sistema de cubierta, ver figuras 3.20 y 3.21.

El inmueble posee en la actualidad un sistema mixto, conserva sus grandes paredes de adobe y ladrillo, y un sistema estructural constituido por vigas y columnas de acero. Éste, absorbe las cargas distribuidas liberando de cualquier sollicitación a los muros de adobe y ladrillo que originalmente tenían una función estructural. Esto no quiere decir que estas paredes dejan de trabajar, pues existe el efecto causado por su propio peso.

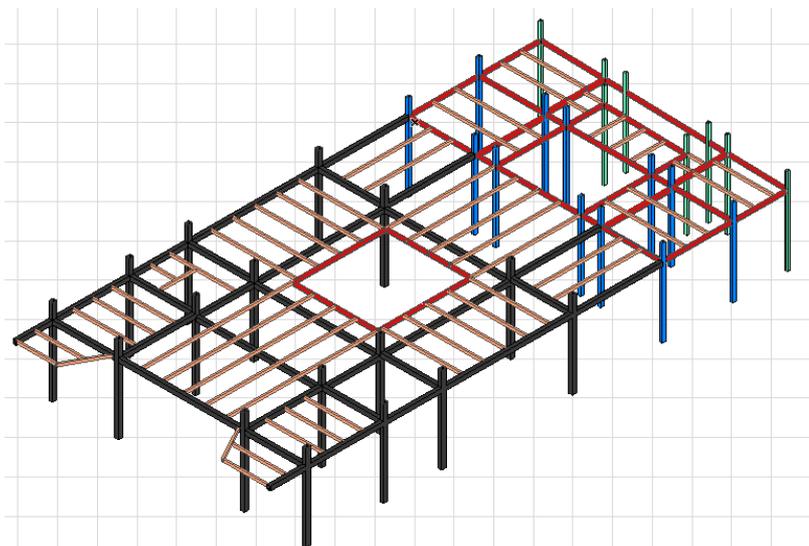


Figura 3.20 Estructura 1PA y 2PA. Fuente: Proyecto de restauración de la casa “La Condamine”, elaboración: Arq. Sebastian Lloret O.

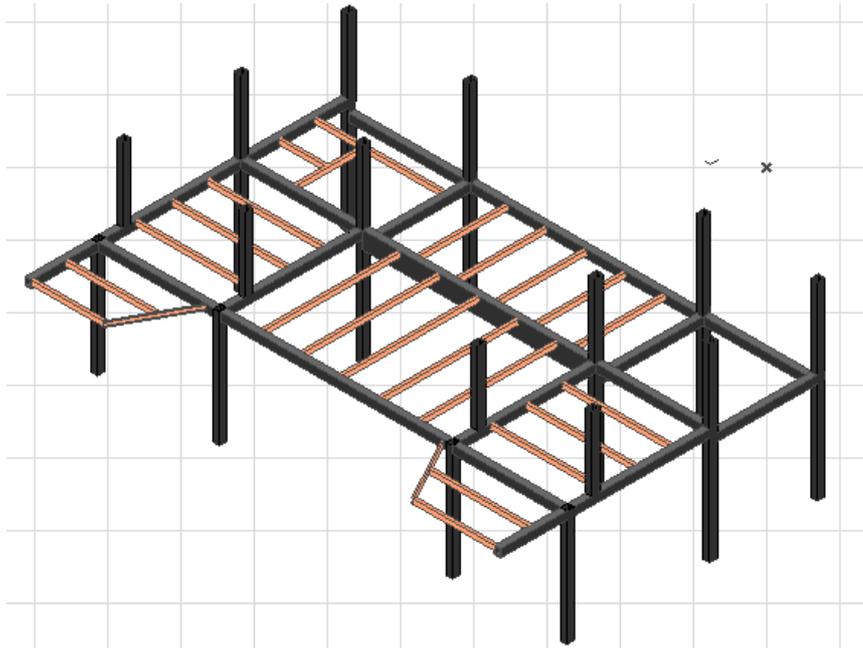


Figura 3.21 Estructura 3PA. Fuente: Proyecto de restauración de la casa “La Condomine”, elaboración: Arq. Sebastian Lloret O.

Sistema de entrespiso

El sistema de entrespiso está constituido por vigas y correas metálicas soldadas entre sí, éstas, soportan la placa colaborante sobre la que se encuentra una chapa de hormigón, ver figura 3.22. Los primeros elementos trabajan con la estructura total del edificio, en tanto que la placa colaborante, sirve a manera de encofrado a la chapa de compresión del hormigón. Las placas están soldadas en algunos puntos de contacto con las correas con el fin de evitar corrimientos en eventos sísmicos severos.

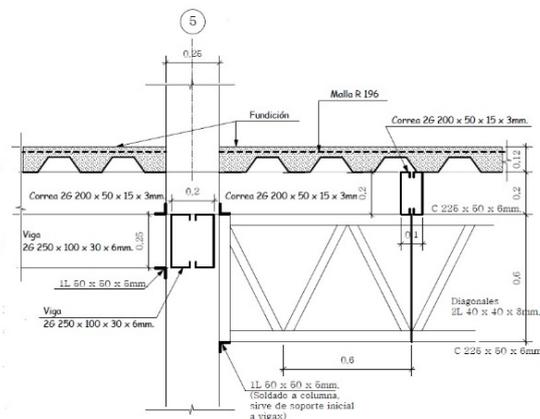


Figura 3.22 Sistema de entrespiso. Fuente: Proyecto de restauración de la casa “La Condomine”, elaboración: Arq. Sebastian Lloret O.

Sistema de cubierta

Debido a sus características particulares, la edificación posee tres tipos de cubiertas. La cubierta posterior entre los ejes 1 a 3 tiene una pendiente del 30% y 5%, conformada por estructura metálica sobre la cual se asientan planchas de Eternit y teja artesanal y vidrio para el pozo de luz.

La cubierta central tiene pendientes de 45%, 30% y 25%, constituida por estructura metálica sobre la cual reposan las planchas de Eternit y la teja artesanal, el vidrio cubre la parte central o el pozo de luz. La tercera cubierta se encuentra sobre la tercera planta alta, en dos aguas con una pendiente del 45% cada una, constituida de igual forma que las dos anteriores. La figura 3.23 ejemplifica la conformación de las cubiertas.

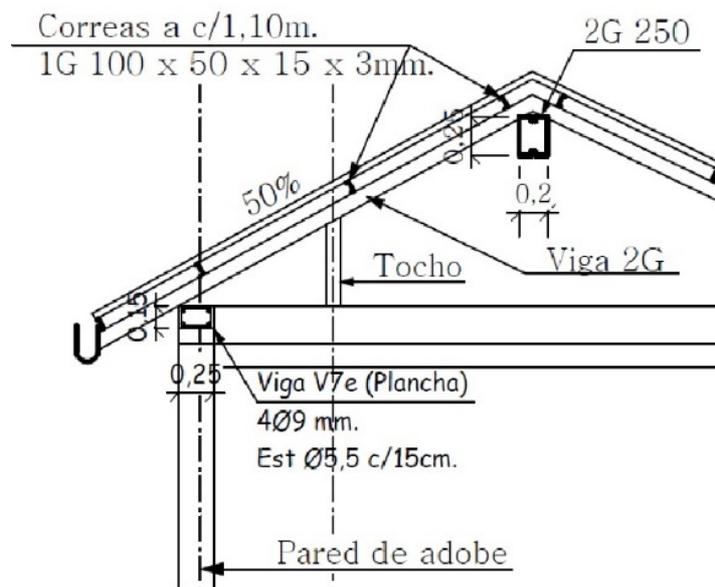


Figura 3.23 Esquema del sistema de cubierta. Fuente: Proyecto de restauración de la casa “La Condamine”, elaboración: Arq. Sebastian Lloret O.

Capítulo IV Análisis de vulnerabilidad sísmica: metodología y resultados

Introducción

Este capítulo describe el estudio sísmico de la edificación para la determinación de la vulnerabilidad sísmica. La modelación de la estructura basada en el método de los elementos finitos es detallada. Después, se describe el análisis sísmico compuesto por: el análisis modal, análisis espectral y el cálculo de las derivas de plantas y paredes. Finalmente, los resultados obtenidos permiten conocer el comportamiento de la estructura frente a un evento sísmico, lo que da paso a la estimación de la vulnerabilidad sísmica del inmueble.

Generalidades del análisis

Dentro del trabajo presentado en este manuscrito, uno de los objetivos planteados es la utilización de un modelo matemático que, mediante una herramienta computacional permite develar el comportamiento sísmico de la estructura.

El análisis se desarrolla en cuatro etapas:

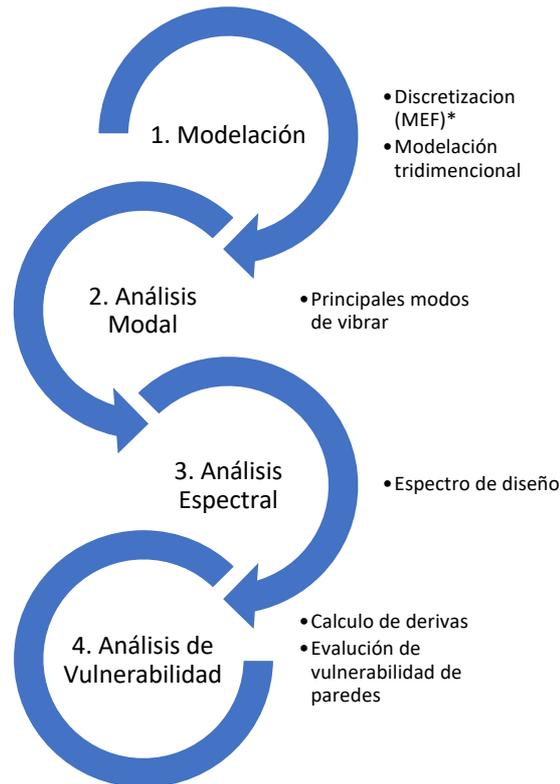


Figura 4.1 Etapas del análisis sísmico. Fuente: Elaboración propia

*Método de Elementos Finitos

Si bien la edificación posee una forma rectangular, el edificio presenta irregularidades, por lo tanto, es idealizada para su posterior modelado. El proceso de modelado está compuesto por: la identificación de los elementos estructurales, la discretización de los elementos, revisión y adaptación del modelo, finalmente se traslada el modelo BIM al software aplicado al cálculo de estructuras. Luego de haber realizado la modelación, se procede a realizar las simulaciones mediante la herramienta informática SAP 2000, finalmente se analiza los resultados obtenidos para determinar la vulnerabilidad sísmica de la edificación.

4.1 Modelación

4.1.1 Identificación de elementos estructurales

La base para la identificación de los elementos estructurales que conforman la edificación está constituida por la documentación actualizada, planos arquitectónicos y estructurales, y los estudios realizados para la restauración del inmueble. El procedimiento seguido se expone a continuación:

1. Para un mejor manejo de la información y para facilitar el análisis del inmueble, se establecieron ejes en las direcciones (x, y) del plano donde se encuentran los elementos estructurales y paredes. Estos ejes sirven también para conectar todo el sistema soportante.
2. Se identificó los elementos estructurales principales:
 - a. Columnas y vigas de acero
 - b. Paredes de mampostería en adobe, bahareque y ladrillo
 - c. Lozas de entre piso y sistema de cubiertas
3. Los elementos que no se consideran estructurales como el mobiliario, dinteles de ventanas y puertas cuya carga no es representativa, fueron suprimidos del modelo.
4. La estructura de cubierta no fue considerada, sin embargo, las cargas que esta transmite se incluyen en el estudio.

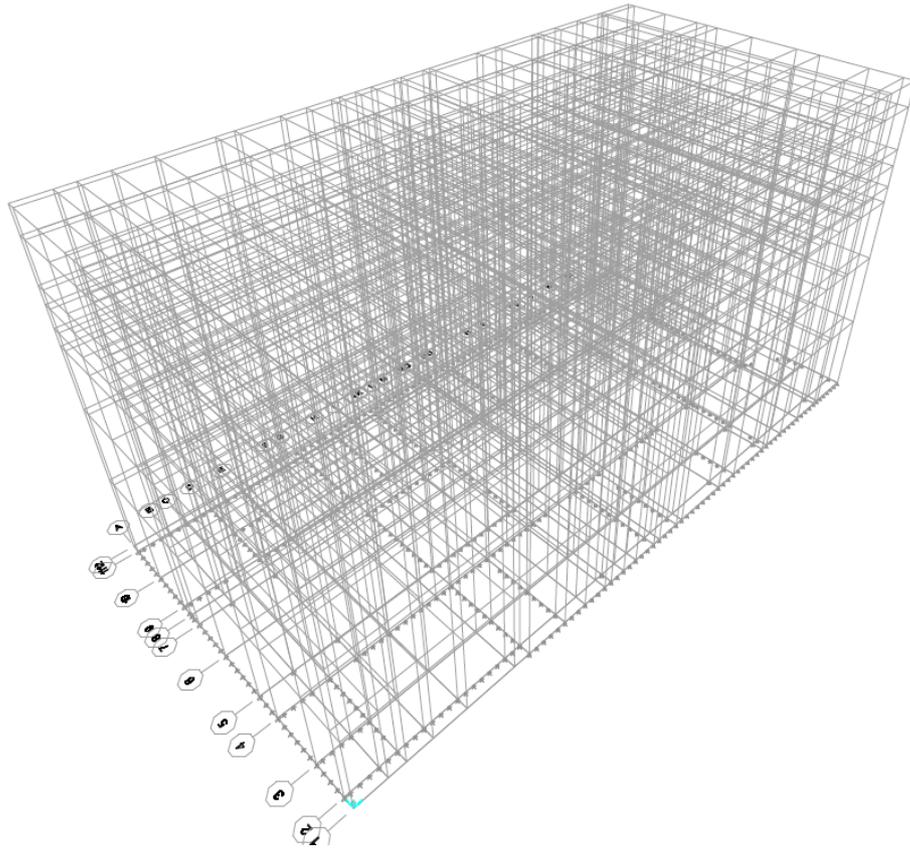


Figura 4.2 Grilla construida para el modelo. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

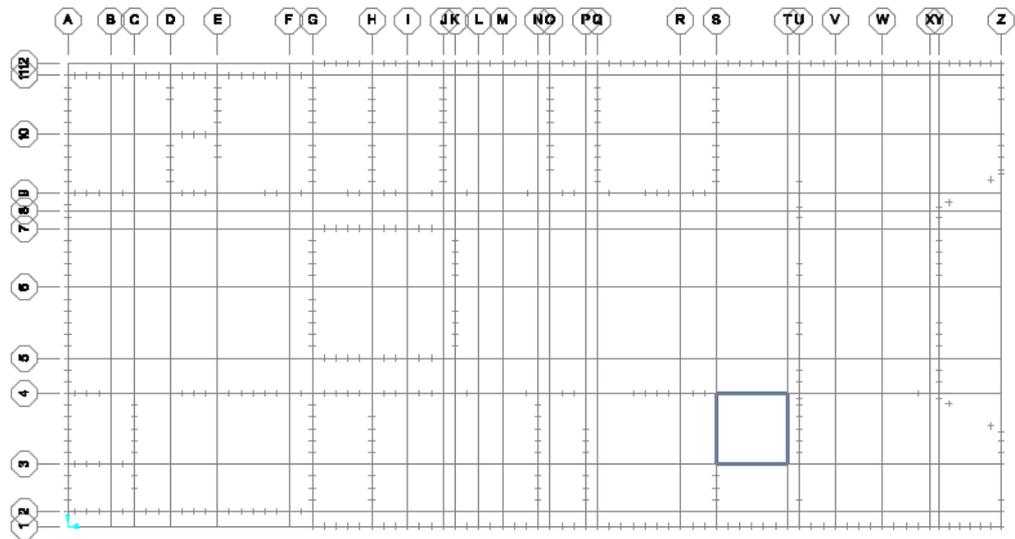


Figura 4.3 Sistema de ejes X y Y. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

4.1.2 Discretización de los elementos

El Método de los Elementos Finitos MEF, consiste en la transformación de un medio continuo en un medio discreto, por lo tanto, las vigas, columnas, paredes y entrepisos fueron sujetos a un mallado o discretización.

- Los elementos bidimensionales (paredes y entrepisos) divididos en módulos de 0.40 x 0.40cm
- Los elementos lineales (vigas y columnas) divididos en módulos de 0.40cm de longitud

Estas dimensiones fueron adoptadas para crear una correcta conexión entre los módulos que conforman cada elemento, esto permite una adecuada integración para obtener las deformaciones y la información de su comportamiento ante la acción de fuerzas sísmicas. El proceso de discretización o mallado no debe alterar la configuración arquitectónica ni las características estructurales y mecánicas de la estructura.

4.1.3 Revisión y adaptación del modelo

La discretización realizada entrega como resultado un sinnúmero de pequeños elementos que dan forma a la estructura, lo que aumenta su complejidad a la hora del análisis. Debido a esto, fue necesario revisar y analizar en detalle todo el modelo y su configuración espacial para garantizar que no existan elementos duplicados y la correcta unión entre ellos en sus puntos nodales.

- Las vigas y columnas son representadas mediante elementos lineales llamados FRAMES
- Los entresijos y paredes son representados mediante elementos bidimensionales llamados SHELL

4.1.4 Exportación del sistema 3D o modelo BIM al programa computacional aplicado al cálculo de estructuras

El traslado del modelo se realiza en dos etapas:

1. El modelo tridimensional discretizado BIM generado en Archicad es exportado al formato IFC (Industry Foundation Classes File). El formato IFC es un estándar global para compartir, describir e intercambiar información sobre la gestión de un modelo 3D de edificaciones.
2. El archivo IFC es importado a SAP 2000, que es un software de cálculo y de concepción de estructuras, particularmente adaptado a edificios y obras de ingeniería civil. Permite en un mismo entorno la entrada gráfica de las obras con un catálogo de elementos que permite un acercamiento al comportamiento de estas estructuras.

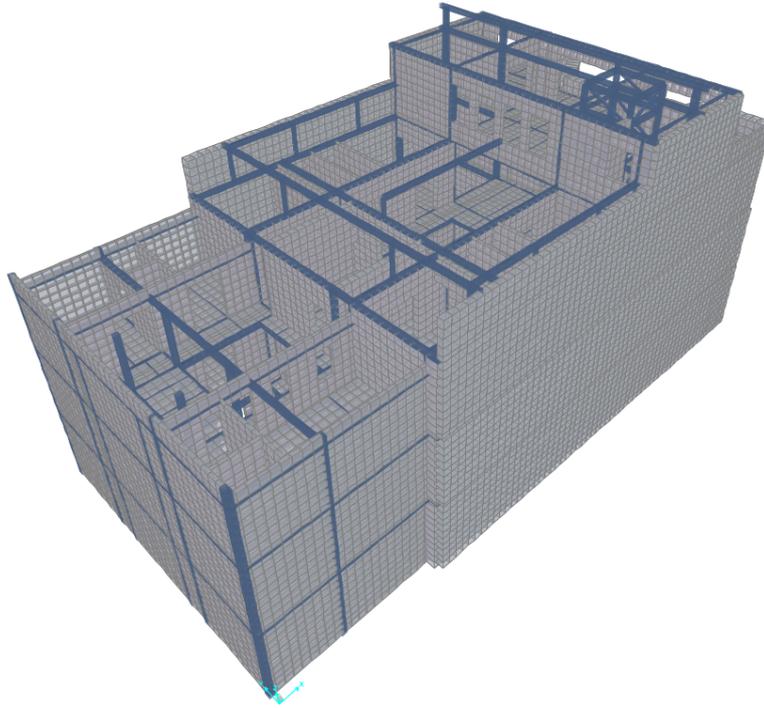


Figura 4.4 Modelo extruido de la "CASA CONDAMINE". Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

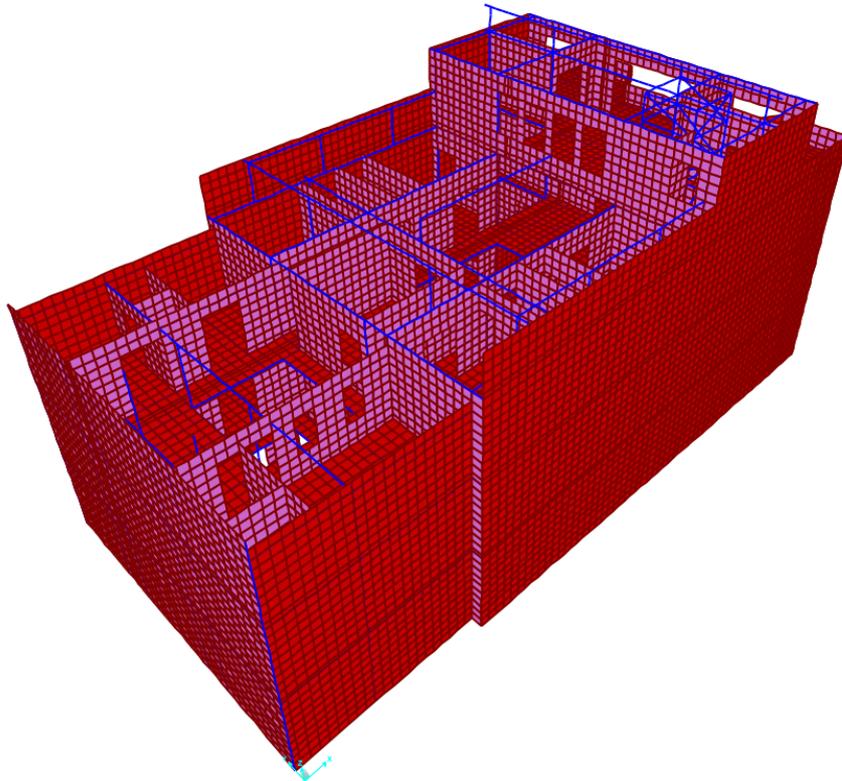


Figura 4.5 Modelo tridimensional con elementos SHELL y FRAME. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

4.1.5 Componentes del modelo

Como resultado se obtiene un modelo compuesto por nodos (NODES), elementos estructurales conformados por vigas y columnas (FRAMES), paredes y pisos compuestos por elementos (SHELLS), cada uno de los elementos modelados tienen sus propias características de ubicación y dimensiones representadas por el sistema de coordenadas. Una vez la concepción geométrica del modelo está finalizada, se debe asignar las propiedades de cada elemento, como son: secciones y materiales.

Nodos

Los nodos se crean automáticamente en los extremos de los elementos SHELL y FRAME, éstos, conectan cada uno de los elementos que componen el modelo. Los nodos son fundamentales en la representación del modelo, pues en estos actuarán los desplazamientos. Los desplazamientos en los nodos son conocidos como grados de libertad (GDL) y pueden ser de traslación y/o rotación, el número de grados de libertad depende del tipo de elemento que conforman los nodos.

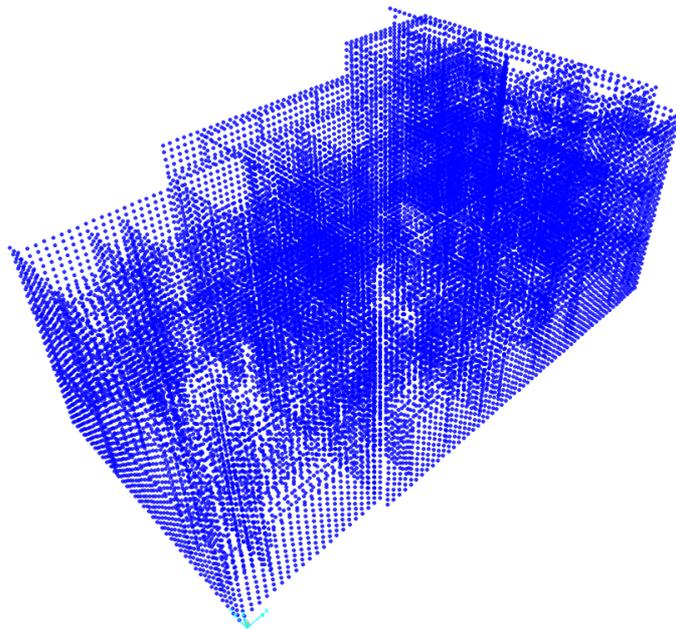


Figura 4.6 Nodos que conforman el modelo de la "CASA LA CONDAMINE". Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Elementos de área (SHELL)

Dentro del modelo las paredes y losas son representadas por elementos tipo SHELL, estos elementos bidimensionales sirven para representar planos o superficies. Como resultado de la discretización realizada en paredes y losas de entrapiso se obtuvo un determinado número de elementos bidimensionales de 0.40m x 0.40m, cada uno de estos elementos se identifican dentro del modelo mediante las coordenadas de los 4 nodos que los conforman. Cada nodo posee 6 GDL, por lo tanto, los elementos SHELL poseen 24 GDL, en conjunto estos elementos representan el comportamiento de pisos y paredes.

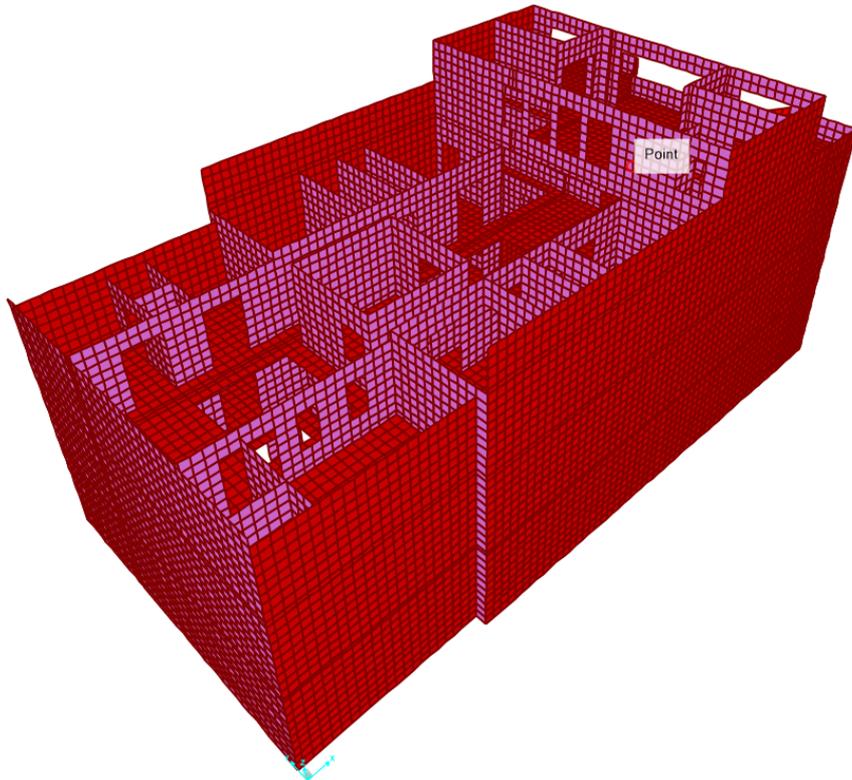


Figura 4.7 Elementos tipo SHELL que conforman las paredes de la "CASA CONDAMINE". Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

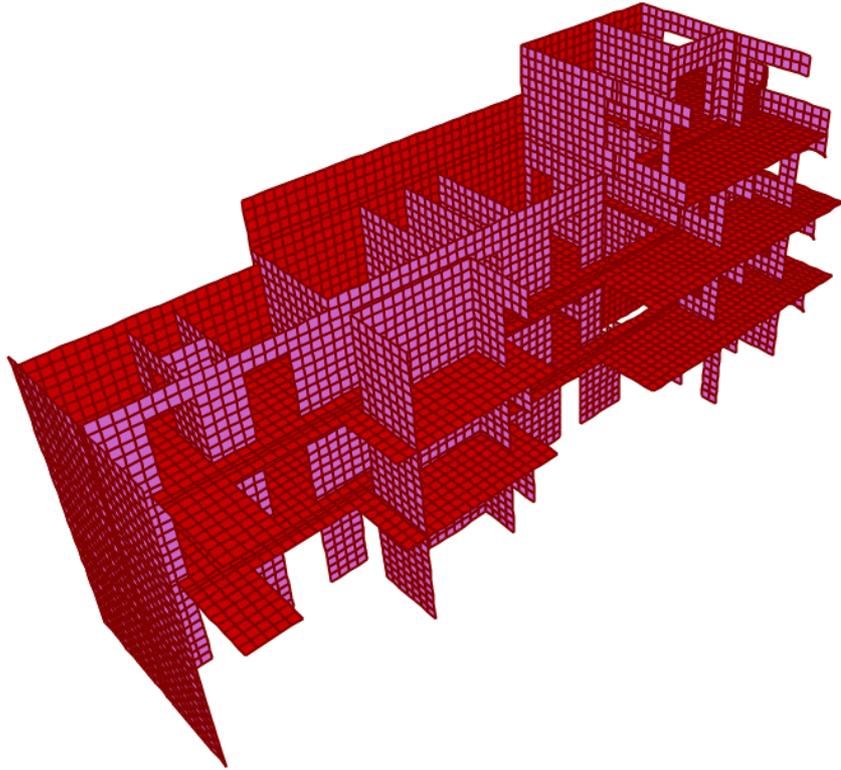


Figura 4.8 Corte longitudinal del modelo, permite observar la modelación detallada realizada. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Elementos lineales (FRAME)

Las vigas y las columnas están representadas por elementos FRAME, estos elementos sirven para modelar los componentes lineales de las estructuras. Los FRAME están compuestos por una línea recta entre dos nodos, al inicio y al final del elemento, cada nodo posee 6 GDL, estos elementos tienen 12 GDL en total, se identifican dentro del modelo mediante las coordenadas de sus puntos modales o nodos. Como con cada tipo de elemento, se debe asegurar la interconexión de los nodos entre elementos.

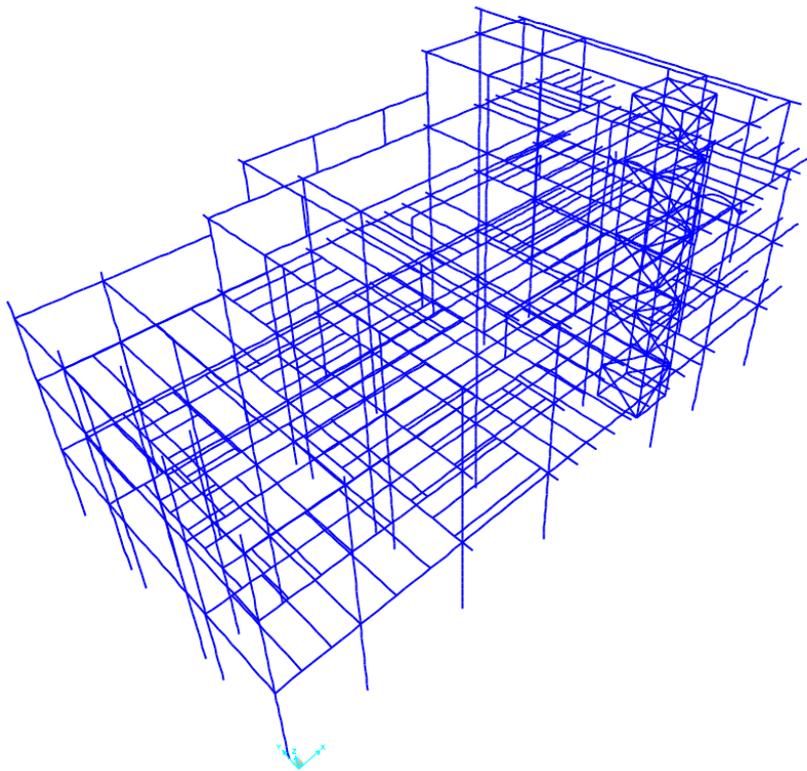


Figura 4.9 Elementos tipo FRAME que conforman el modelo de la "CASA CONDAMINE". Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

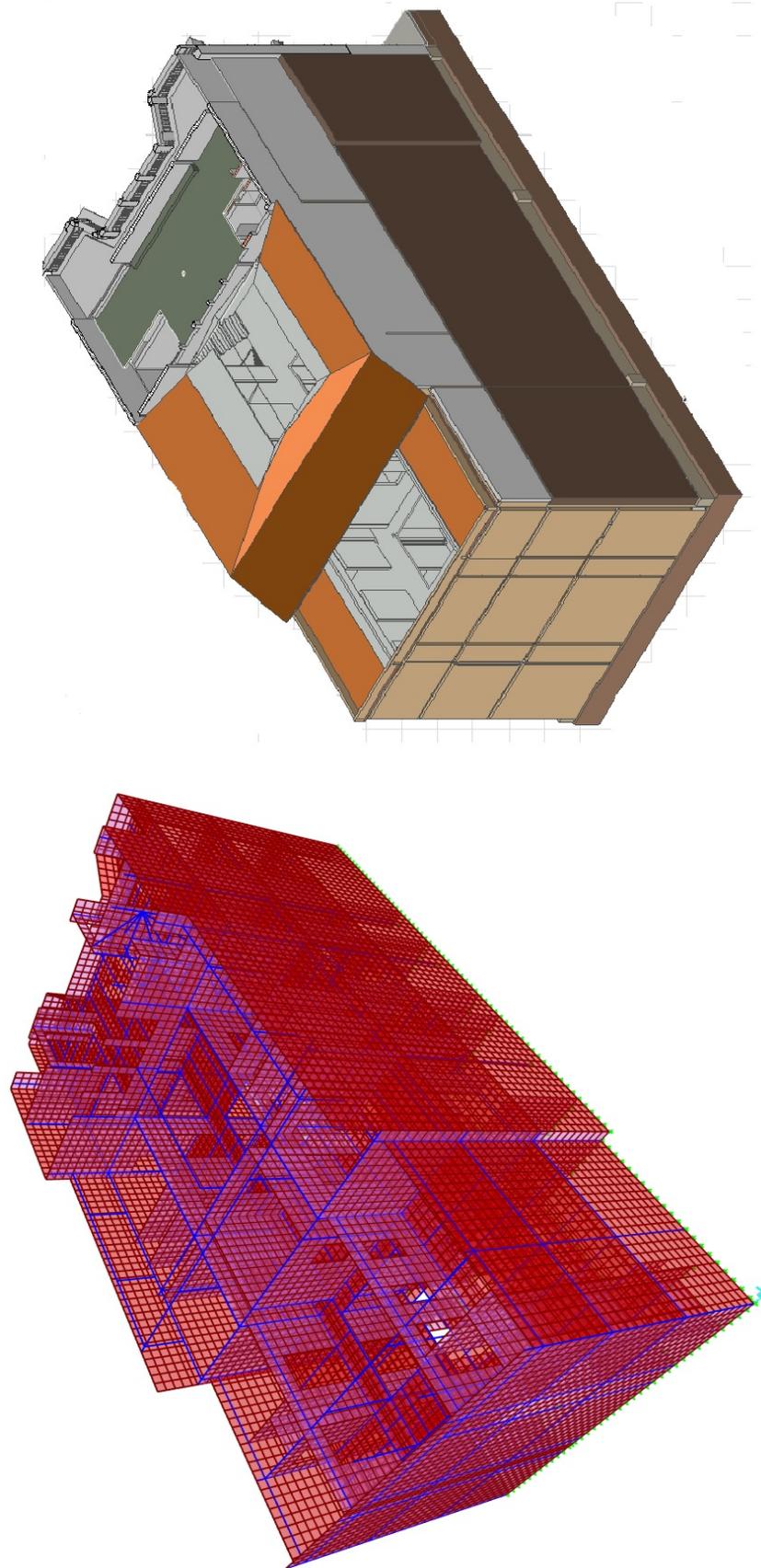


Figura 4.10 Modelo 3D realizado en SAP 2000 y axonometría del proyecto ejecutado muestra la precisión del modelado realizado. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

4.1.6 Resultados de la modelación

Finalmente, el modelo completo posee 133506 grados de libertad. En la tabla 4.1, se describe el número de elementos que conforman del modelo.

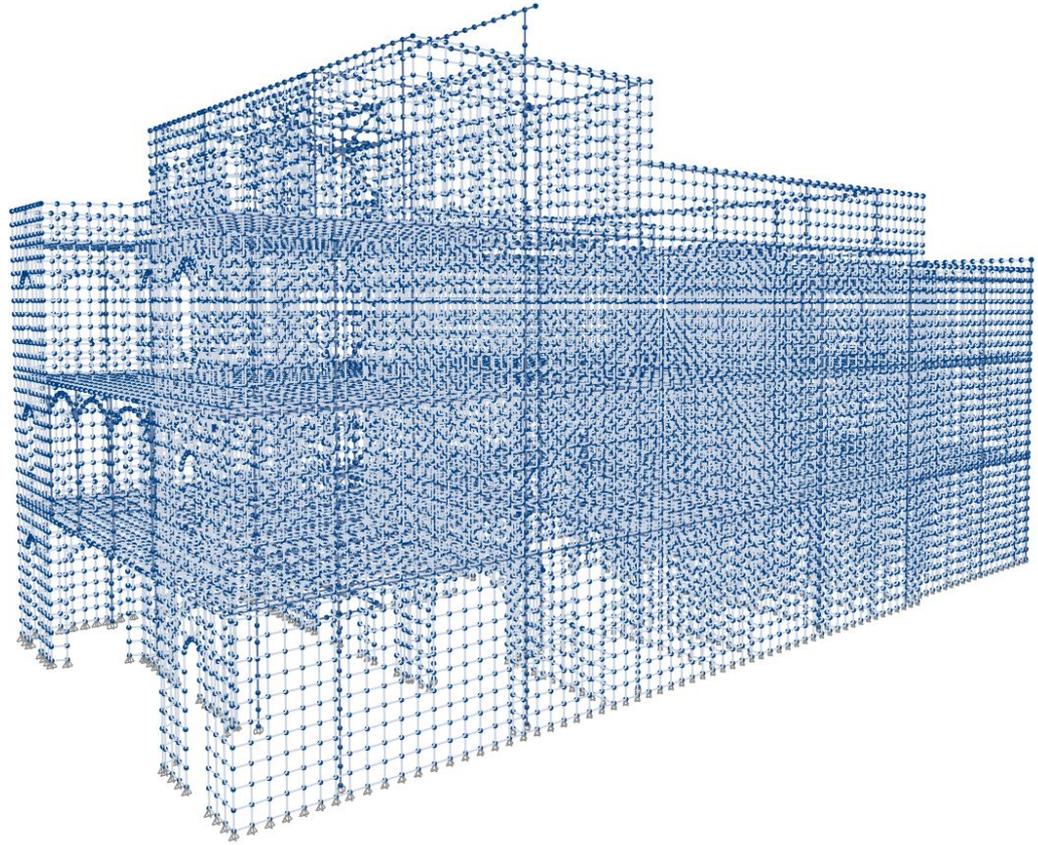


Figura 4.11 Modelo 3D resultante. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

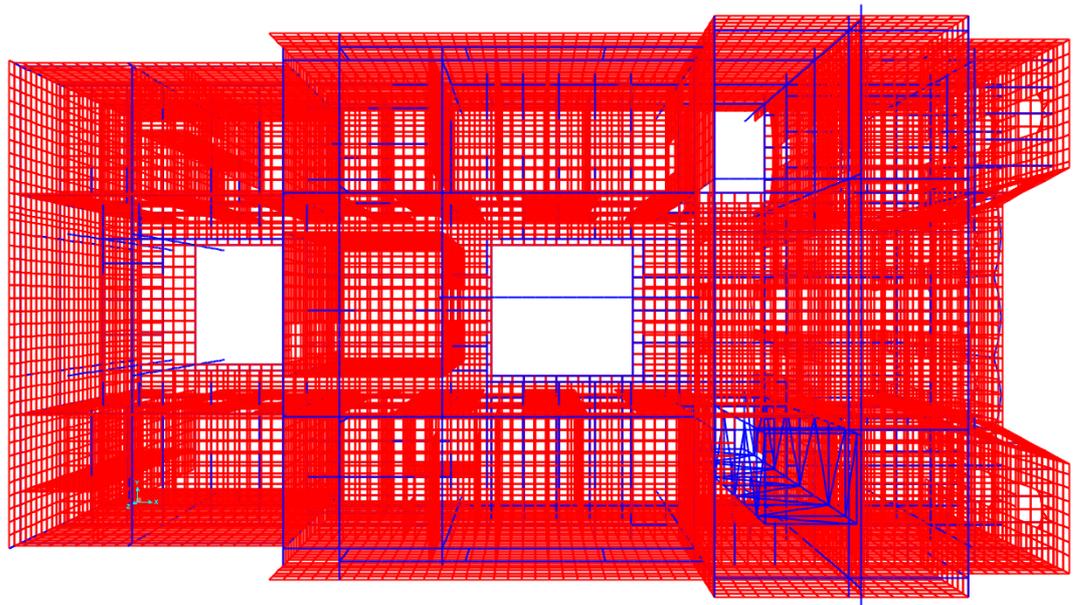


Figura 4.12 Modelo 3D resultante, vista superior. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

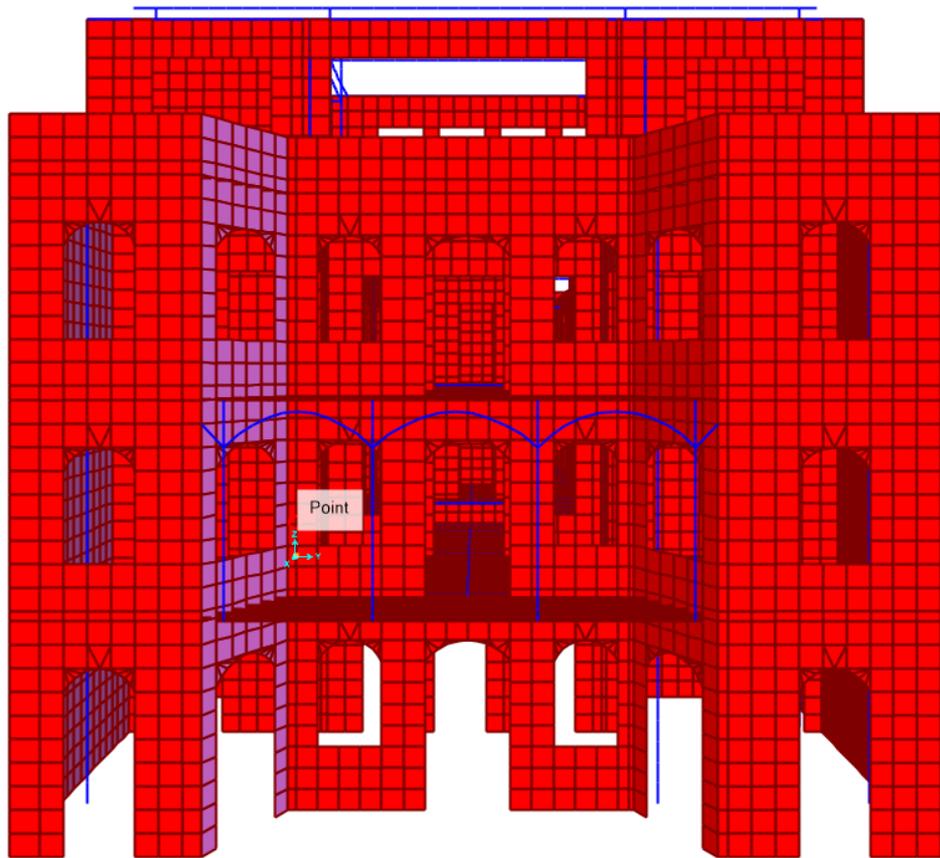


Figura 4.13 Modelación de la fachada del inmueble SAP 2000. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Tabla 4.1 Número de elementos del modelo de la "CASA LA CONDAMINE". Fuente: elaboración propia.

Composición del modelo	
Número de nodos	25968
Nodos con restricciones	536
Elementos FRAME	5653
Elementos SHELL	24773

4.2 Simulaciones y resultados

Para realizar el análisis del comportamiento sísmico de la estructura, es necesario conocer las características de los materiales que constituyen la edificación, la geometría de los elementos, las solicitaciones o cargas que actúan sobre el inmueble, condiciones de borde y rigidez, y las características del suelo de emplazamiento.

4.2.1 Secciones de los elementos estructurales y características de los materiales

Finalizado el modelo tridimensional y verificadas todas las conexiones entre nodos, se procedió a la asignación de las secciones y características mecánicas de los materiales que conforman los elementos SHELL y FRAME.

Las secciones de vigas, columnas, losetas de entrepiso y mampostería vienen dadas por los planos arquitectónicos y estructurales del inmueble, estos documentos se obtuvieron de manos del profesional encargado del diseño y ejecución del proyecto de rehabilitación y restauración de la “CASA LA CODAMINE”. La tabla 4.2 y 4.3 resumen las secciones de los elementos estructurales presentes en la edificación.

Tabla 4.2. Secciones de los componentes estructurales. Fuente: Estudio estructural “Casa la Condomine”, elaboración propia.

Secciones de la estructura	
Estructura	
Columnas	0.25m x 0.30m
	0.25m x 0.20m
Vigas	0.25m x 0.20m
Correas entrepiso	0.20m x 0.10m
Cubierta	
Cumbreros	0.25m x 0.20m
Soleras	0.15m x 0.05m
Correas	0.10m x 0.05m

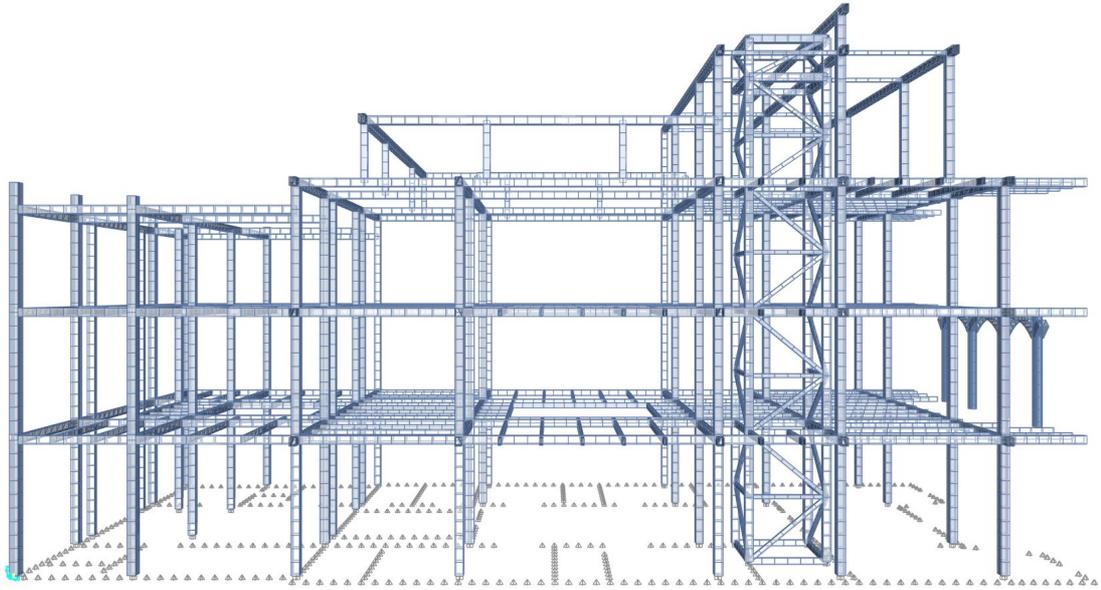


Figura 4.14 Estructura en perfilería de acero "CASA CONDAMINE". Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Tabla 4.3 Espesor de losas y paredes. Fuente: Estudio estructural "Casa la Condamine", elaboración propia.

Espesor de la mampostería y losas de entepiso	
Paredes	
Fachada – ladrillo	0.70m
Primera crujía - ladrillo	0.50m
Paredes de adobe	0.50m
Paredes de bahareque	0.30m
Paredes de bahareque	0.20m
Paredes de ladrillo	0.15m
Losas	
Losa de entepiso 1PA, 2PA y 3PA	0.12m

En cuanto a las características mecánicas de los materiales es necesario conocer el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de poisson (μ), densidad del material (ρ), medidas y espesores de cada elemento, tabla 4.4 y figura 4.15.

Los valores fueron obtenidos del trabajo de (Cornejo Pintado & Zúñiga Saca, 2020), se consideró que estos valores cuentan con el sustento bibliográfico necesario para ser adoptados como válidos, para más información, referirse al trabajo de (Cornejo Pintado & Zúñiga Saca, 2020) pág. 131, tabla 53.

Tabla 4.4 Características mecánicas de los materiales de la CASA CONDAMINE. Fuente: Cornejo Pintado & Zúñiga Saca, 2020.

Características mecánicas de los materiales				
	Módulo de elasticidad (kg/m ²)	de Coeficiente poisson	de Densidad material (kg/m ³)	del
Ladrillo	2,4e8	0,22	1710	
Adobe	2,04e7	0,2	1610	
Bahareque	2,04e7	0,325	1400	
Hormigón	2,17e9	0,25	2400	
Acero	2,039e10	0,3	7849	

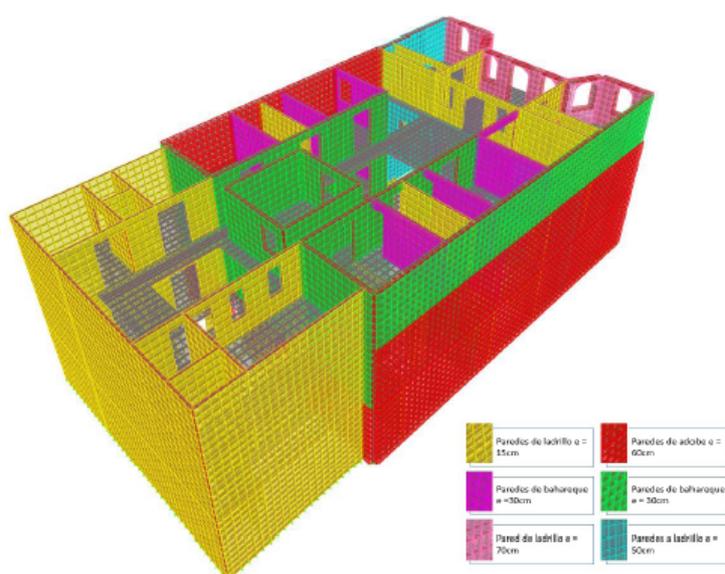


Figura 4.15 Vista extruida, composición de la mampostería "CASA CONDAMINE". Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

4.2.3 Definición de las cargas

Para el análisis estructural es necesario conocer previamente las cargas gravitatorias y sísmicas que actúan sobre el edificio, estas cargas van definidas en SAP 2000 como: patrones, casos y combinaciones de carga. A nivel de la cimentación no se consideró carga alguna.

La carga permanente o DEAD, están constituidas por los pesos de todos los elementos estructurales, tales como: muros, paredes, recubrimientos, instalaciones y todo artefacto integrado permanente a la estructura. Esta es calculada automáticamente por el software empleado para el estudio.

▪ Entrepiso

Para la investigación se adoptó un valor de 2kN/m^2 para el entrepiso de la 1PA y la 2PA, y 4.80kN/m^2 para la 3PA propuestos por la *NEC-SE-CG-Cargas*, tabla 9 pág. 29.

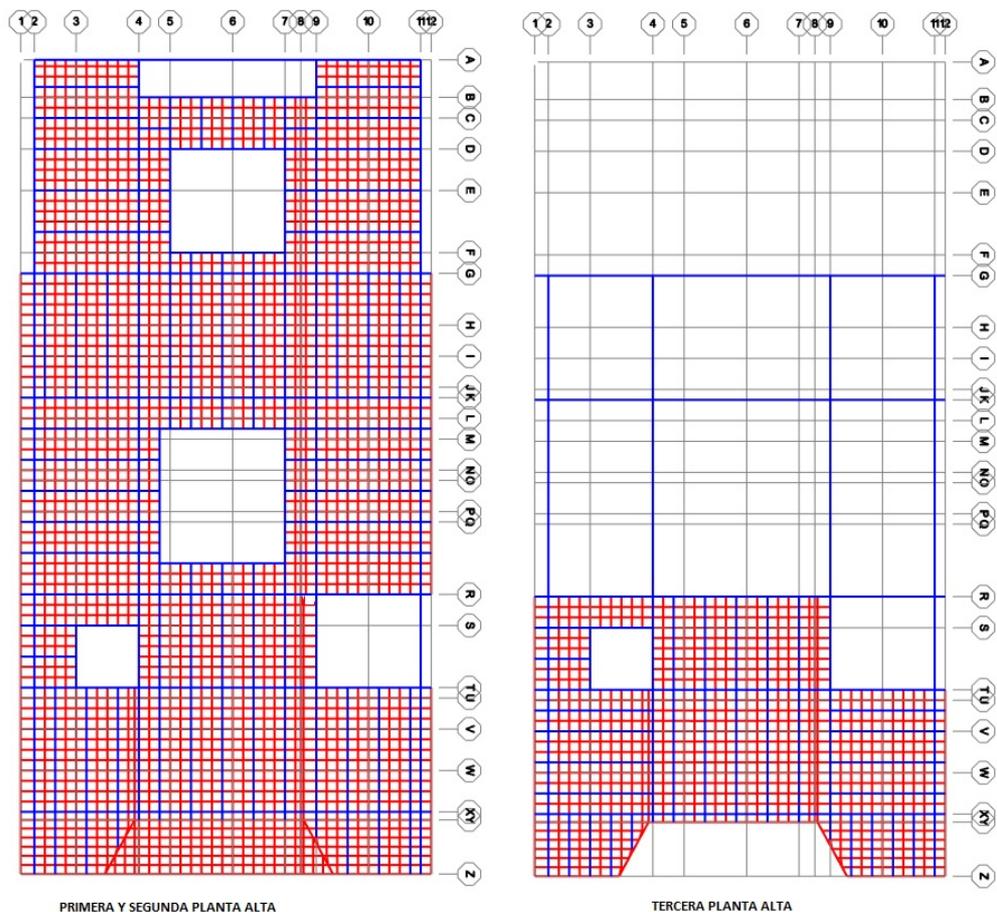


Figura 4.16 Plantas de entrepiso del modelo. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

La figura 4.16, muestra las plantas modeladas del entrepiso, la malla en color rojo representa las losas, las líneas en color azul representa las vigas principales y las correas que sirven de soporte para la losa.

- **Cubierta**

Como se había dicho, las cubiertas no fueron consideradas como parte del modelo, sin embargo, se consideró el peso de estas como una carga uniformemente distribuida a lo largo de los elementos longitudinales o vigas de solera que soportan su peso. La tabla 4.5, muestra la composición de la carga de cubierta.

Tabla 4.5 Cargas de cubierta.

	Carga de cubierta (kg/m²)
Eternit	10
Teja	60
Peso propio de la estructura	12
Instalaciones en general	8
Carga viva (hombres trabajando)	40
Viento	9.24
TOTAL	139.24

La carga de 139.24 kg/m², fue distribuida según el área de aporte respectiva sobre las vigas de solera.

4.2.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno o condiciones de borde permiten definir los grados de libertad en los nodos. Los grados de libertad que definen el movimiento de los nodos en una edificación son: rotación y traslación en (x, y, z), y dependen del número de elementos y del tipo de apoyo. Los elementos tipo FRAME poseen 12 grados de libertad y los elementos tipo SHELL tienen 24 grados de libertad.

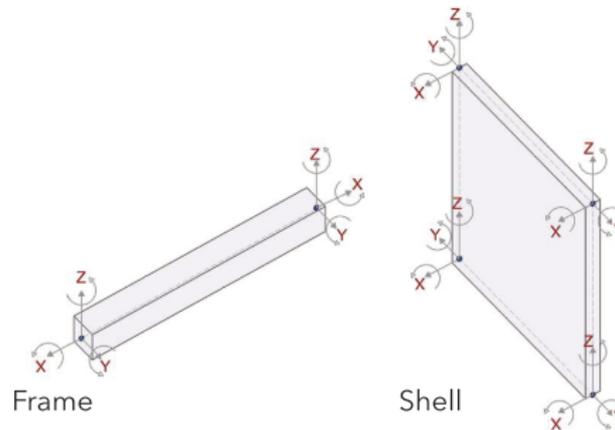


Figura 4.17 Esquema de condiciones de borde. Fuente: (Cornejo Pintado & Zúñiga Saca, 2020)

Para la investigación se consideró apoyos fijos para todos los nodos en el nivel 0+000, esto liberó los giros o movimientos de rotación y restringió los desplazamientos en la dirección x, y & z.

Cada entrepiso fue considerado como diafragma rígido, gracias a esta condición se unifica la rotación de todos los nodos al enlazarlos a un nodo maestro. Esta condición se representa por medio de “constraints” para cada nivel en el plano xy; los extremos de las vigas de entrepiso en contacto con las paredes fueron liberados al asignar “releases”.

4.2.5 Análisis modal

Establecido el modelo matemático e ingresados todos los datos necesarios se realizó el análisis modal, su objetivo es identificar los periodos propios de cada modo de oscilación. Chopra (2014) plantea que los modos o formas de vibrar son propiedades únicas e irrepetibles que posee cada estructura, dependen del tamaño de la matriz de rigidez y masa, y existen tantos como grados de libertad posea la estructura.

En este estudio se analizan los 20 primeros modos de vibración con la finalidad de identificar el periodo máximo.

Período de vibración (T)

Guzmán (2015) establece el periodo de vibración como el tiempo que transcurre durante un ciclo de oscilación completo, en otras palabras, el tiempo que tarda la estructura en volver a su posición original durante un movimiento vibratorio. Los valores de los periodos de una estructura deben estar comprendidos entre 0.1 a 1seg;

valor indicado en la *Norma Ecuatoriana de la Construcción* en el capítulo *Peligro Sísmico Diseño Sismorresistente*. La tabla 4.6, muestra los veinte primeros modos de vibración con su respectivo periodo.

Tabla 4.6 Propiedades de vibración natural del modelo de la "CASA LA CONDAMINE". Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

	ω	T	F
Modo	[rad/s]	[s]	[Hz]
1	22,85	0,275	3,64
2	25,26	0,249	4,02
3	26,30	0,239	4,19
4	27,70	0,227	4,41
5	27,85	0,226	4,43
6	28,27	0,222	4,50
7	28,53	0,220	4,54
8	28,82	0,218	4,59
9	29,52	0,213	4,70
10	32,13	0,196	5,11
11	32,47	0,194	5,17
12	33,56	0,187	5,34
13	34,53	0,182	5,50
14	39,90	0,157	6,35
15	40,21	0,156	6,40
16	41,46	0,152	6,57
17	42,33	0,148	6,74
18	42,37	0,148	6,74
19	43,12	0,146	6,86
20	43,26	0,145	6,89

Modos de vibración

Los modos de vibrar son los estados de deformación que el sistema alcanza en cada periodo de vibración natural (Φ_n). Para estudiar la estructura se analizan estos modos para determinar de qué manera el sistema es más fácilmente excitado frente a la acción de fuerzas sísmicas.

Como está establecido en la *NEC-SE-DS Peligro sísmico, Diseño sismorresistente (2015)* pág. 58, el número de modos a considerar en el análisis son los que contribuyen significativamente a la respuesta total de la estructura, mediante los varios periodos de

vibración, y/o todos los modos que involucren la participación de una masa modal acumulada de al menos el 90% de la masa total de la estructura en cada una de las direcciones horizontales principales consideradas. En las figuras 4.18 a 4.27 se presentan los 10 primeros modos de vibrar.

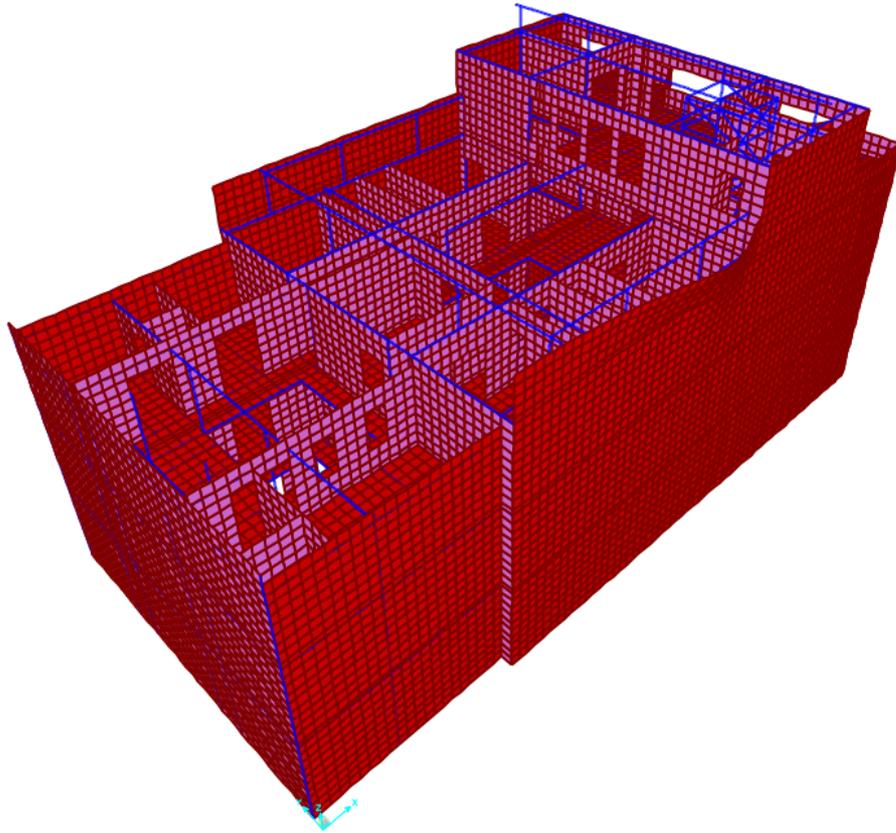


Figura 4.18 Primer modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

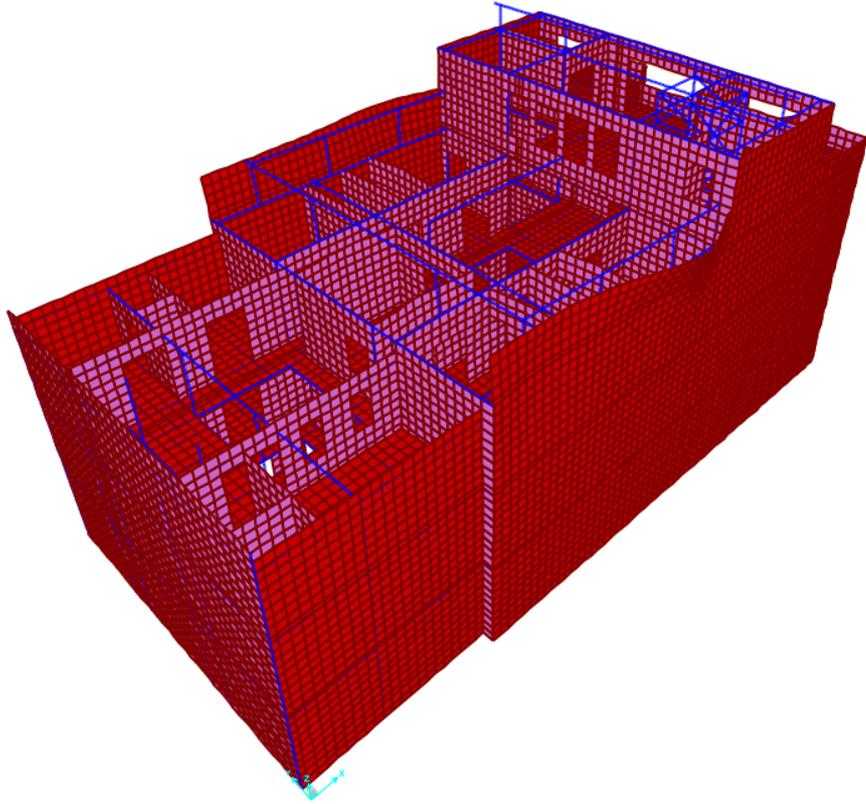


Figura 4.19 Segundo modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

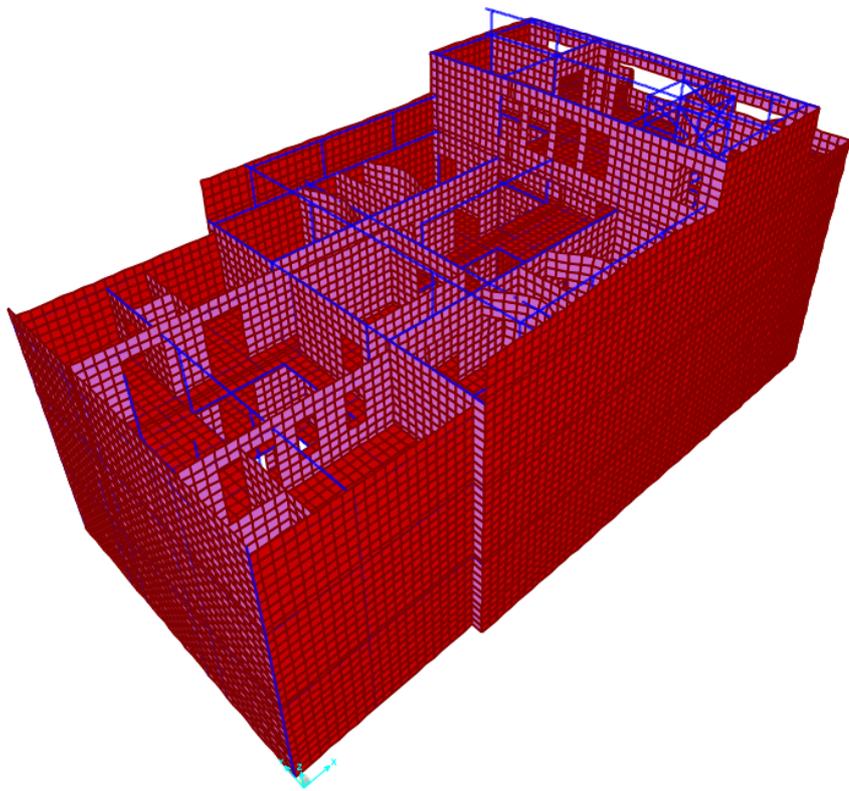


Figura 4.20 Tercer modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

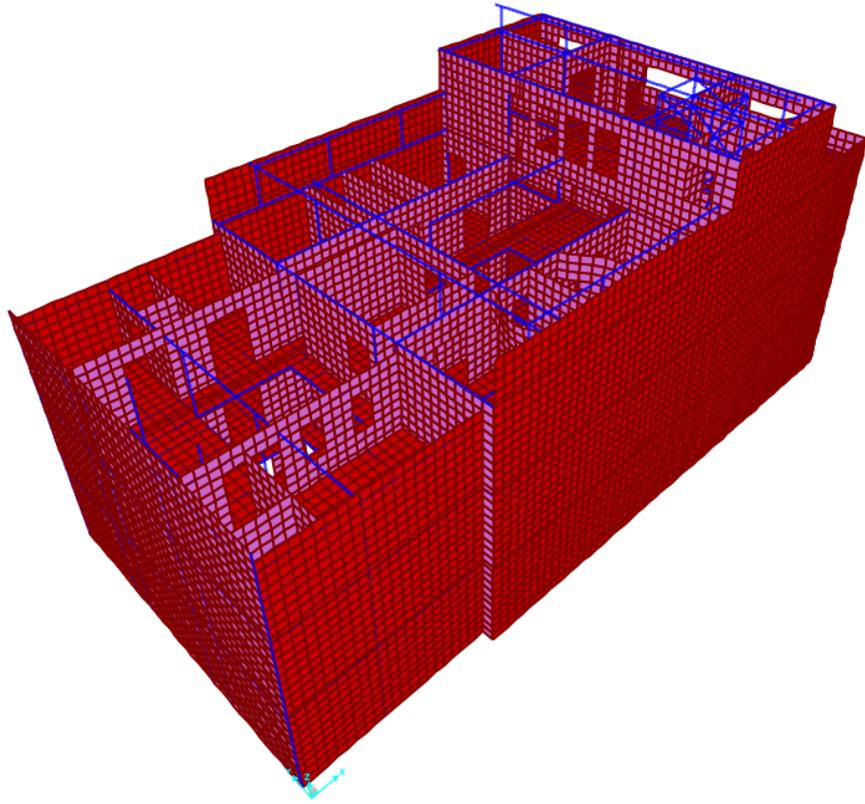


Figura 4.21 Cuarto modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

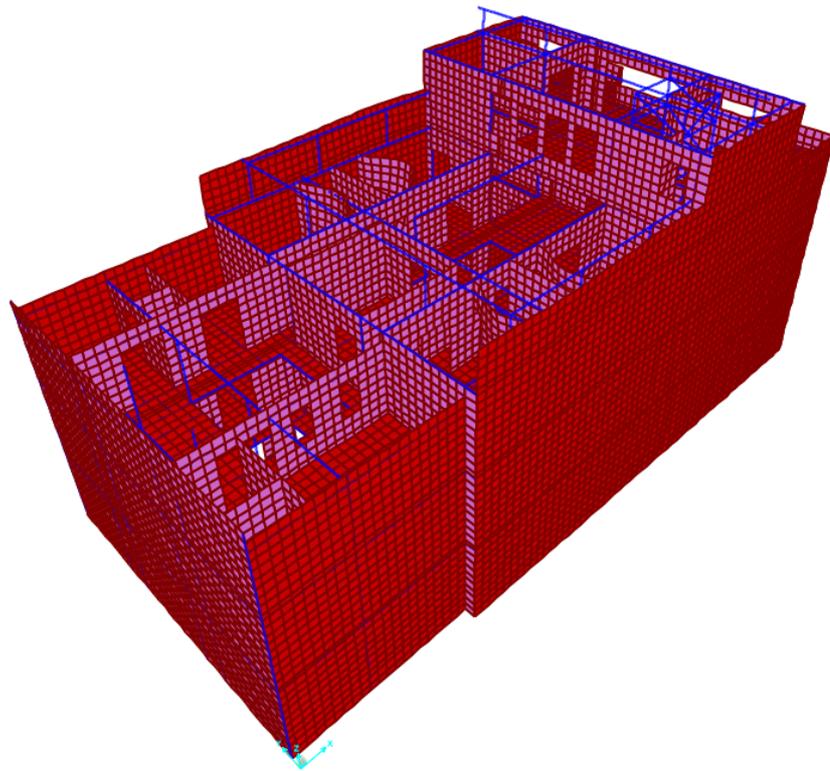


Figura 4.22 Quinto modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

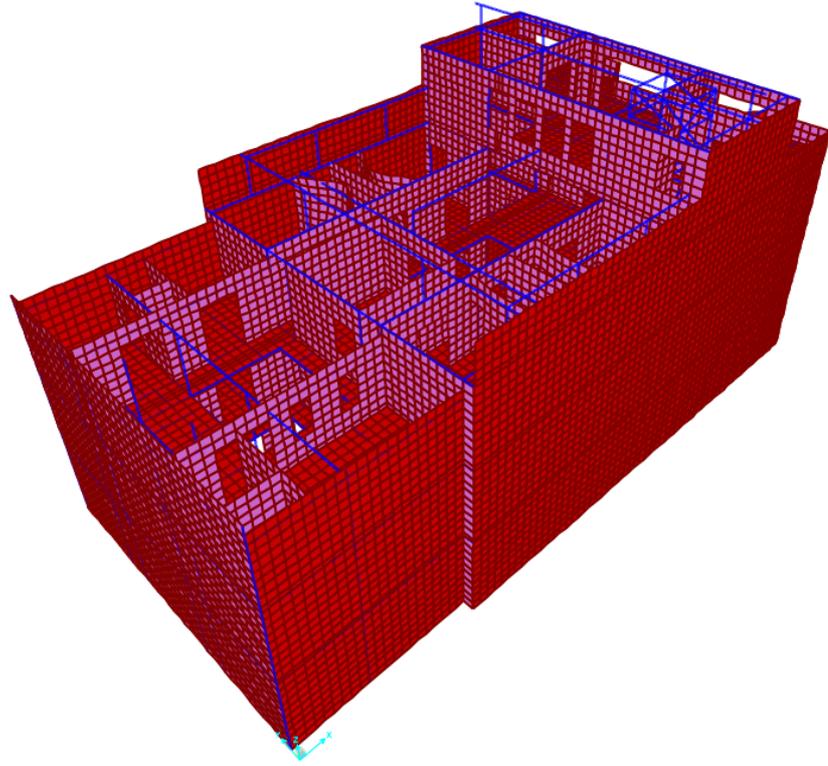


Figura 4.23 Sexto modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

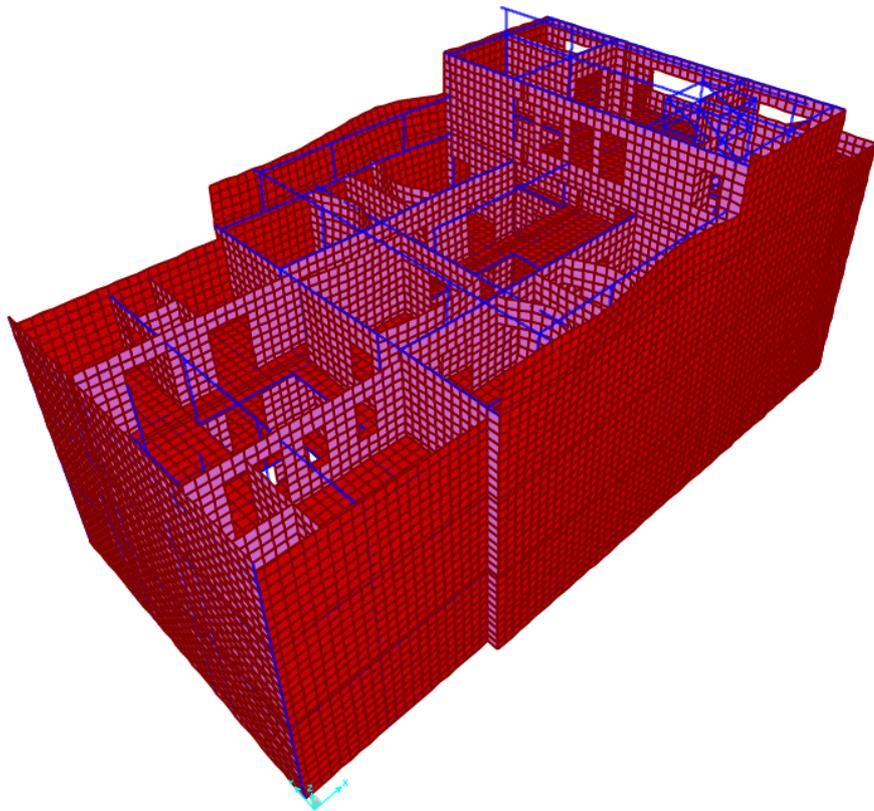


Figura 4.24 Séptimo modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

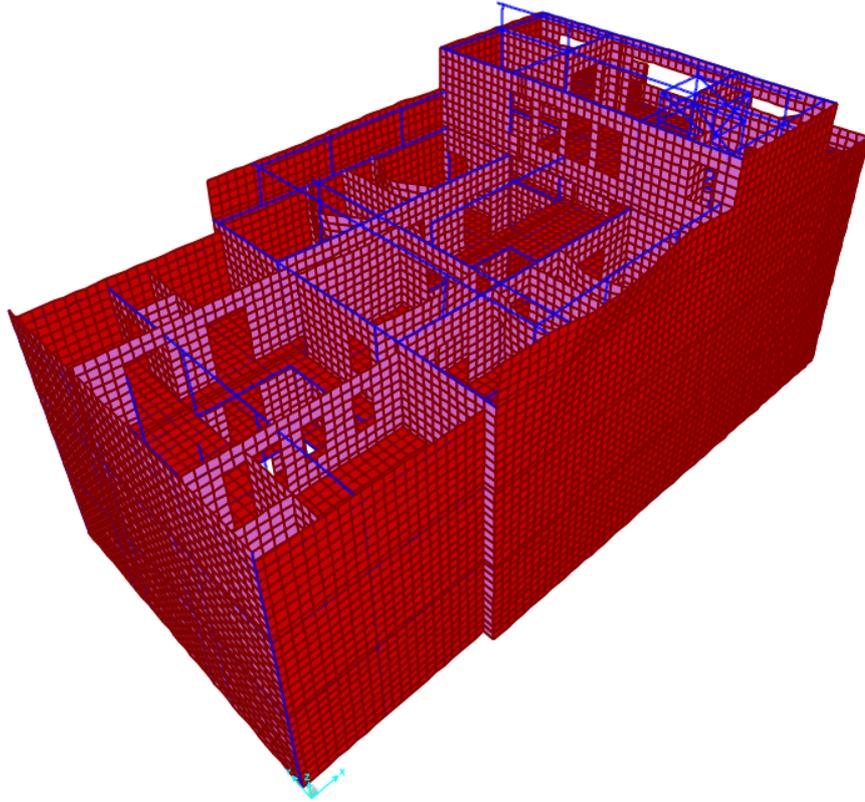


Figura 4.25 Octavo modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

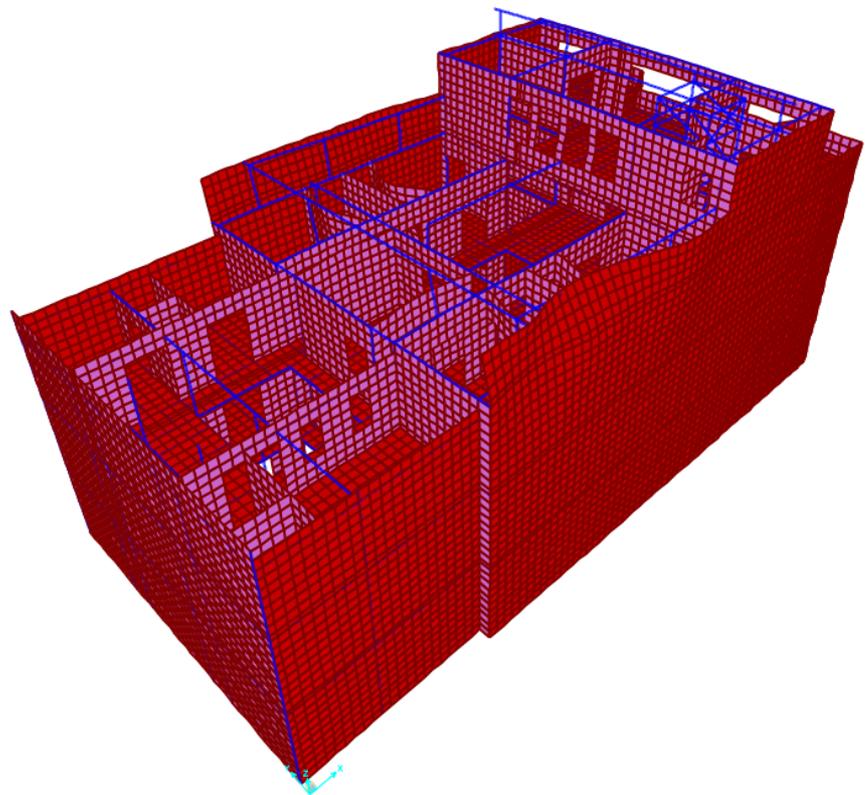


Figura 4.26 Noveno modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

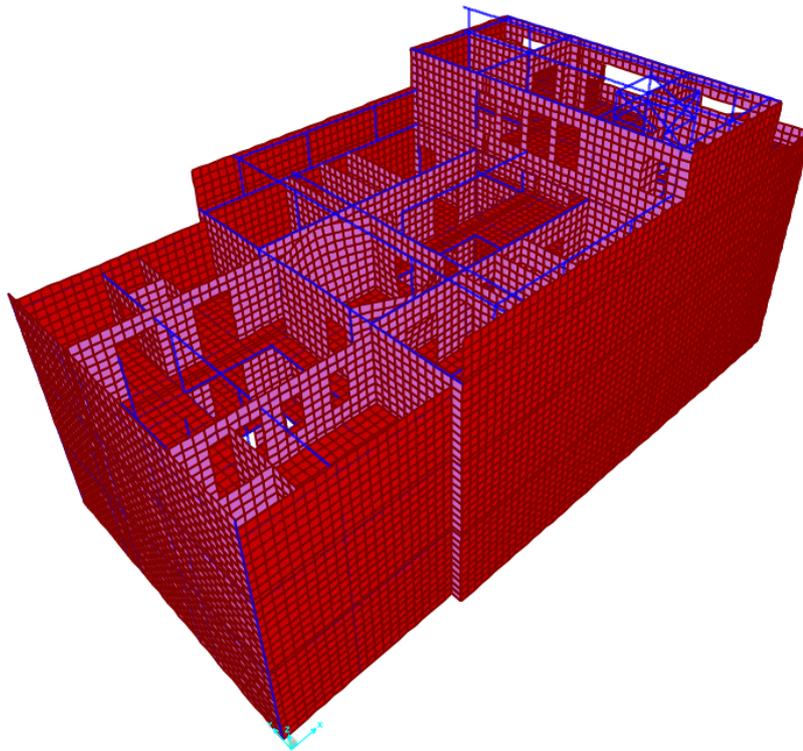


Figura 4.27 Décimo modo de vibrar. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

4.2.6 Análisis espectral

El análisis espectral permite simular el comportamiento de una edificación frente a la acción de fuerzas sísmicas. Dentro del procedimiento de análisis es necesario establecer el espectro de diseño con el que se realiza la evaluación del inmueble y que determina los desplazamientos provocados por la acción del sismo.

Respuesta de una estructura ante un sismo

El contenido espectral de la señal sísmica específica del sitio es decisivo para la respuesta del sistema, la reacción de una construcción a las sacudidas sísmicas del suelo está caracterizada por las aceleraciones, las velocidades y los desplazamientos de sus elementos.

Durante un sismo, los diferentes modos se superponen, el edificio es sometido al mismo tiempo a acciones traslacionales y torsionales. La participación de ciertos modos es despreciable, y cada modo tiene su propio periodo de oscilación. El periodo fundamental es el del modo que tiene el periodo más largo (1er modo), los siguientes

modos tienen periodos más cortos y frecuencias más elevadas. Es la señal del suelo, en función de la energía asociada a cada frecuencia de oscilación que va a excitar más un modo u otro.

Espectro de diseño

Es una herramienta que permite estimar la respuesta del edificio ante el sismo, se trata de la respuesta en términos de la aceleración, pero existen otros en desplazamientos y en velocidades. Los espectros no permiten tomar en cuenta la duración del suceso, las fluctuaciones de las oscilaciones del suelo y la interacción suelo – estructura, las construcciones son consideradas perfectamente encastradas en un suelo infinitamente rígido.

El espectro de diseño es una “curva” sobre la cual se leen los valores máximos de la amplificación del movimiento del suelo. Caracterizado por el tipo de suelo, se evalúa para el pico del movimiento sísmico y se establece para una amortiguación relativa de la estructura dada. Las características del espectro varían según el coeficiente de amortiguamiento y la naturaleza del suelo.

Para el análisis espectral de la “CASA LA CONDAMINE”, en la investigación se consideró un suelo tipo D, para una zona sísmica tipo II (alta peligrosidad) con una aceleración de suelo de 0.25 g, valores establecidos en la *Norma Ecuatoriana de la Construcción* en el capítulo *Peligro sísmico – Diseño sismorresistente (2015)*. La tabla 4.7, resume los factores utilizados para la generación del espectro, y la figura 4.28, presenta el espectro obtenido.

Valores sísmicos para el estudio	
Zona sísmica:	Z II
Coeficiente (z):	0.25 g
Relación de amplificación espectral (η):	2.48
F_a	1.4
F_d	1.45

Coeficientes de amplificación de suelo tipo D	F_s	1.06
Factor de importancia (I):		1
Factor de modificación de respuesta (r):		1

Tabla 4.7 Coeficientes utilizados para la generación del espectro. Fuente: NEC 2015, elaboración propia.

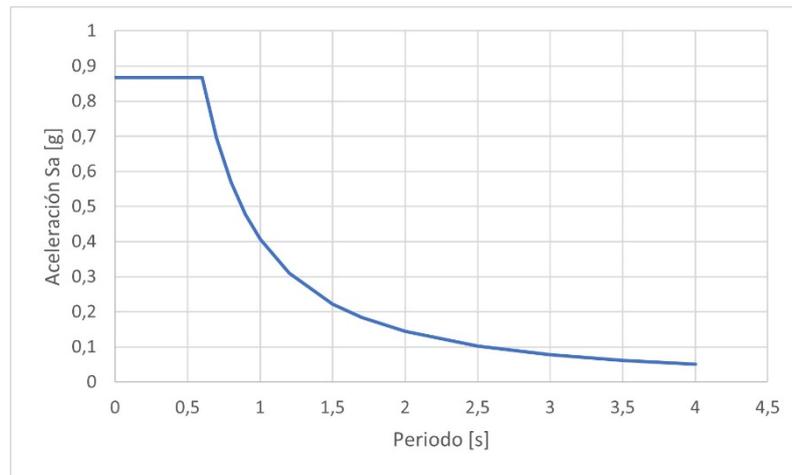


Figura 4.28 Espectro de diseño. Fuente: elaboración propia.

Las figuras a continuación muestran el desplazamiento causado por las componentes de la fuerza sísmica S(x), figura 4.29 y 4.30, y S(y) figura 4.31 y 4.32 respectivamente.

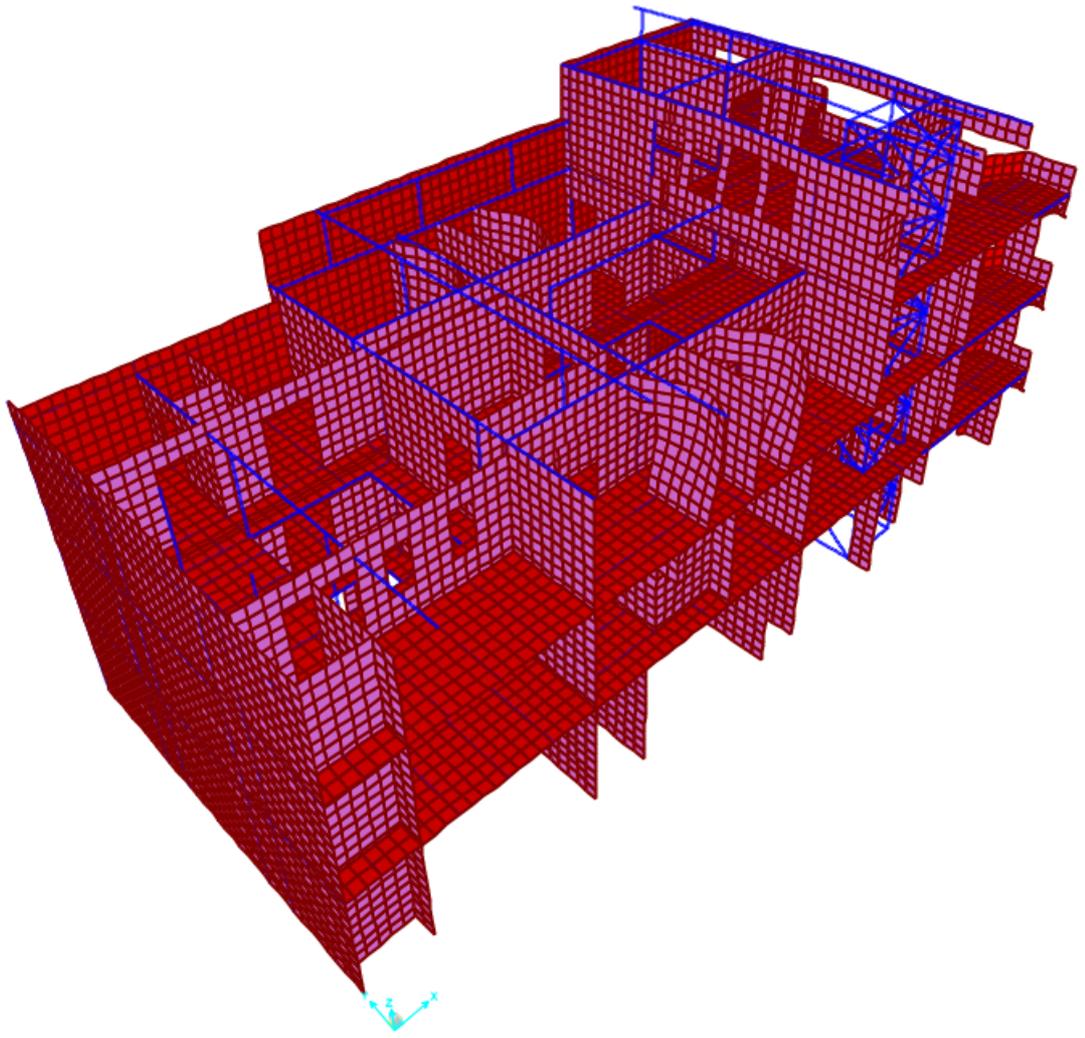


Figura 4.29 Efecto de la componente $S(x)$ de la fuerza sísmica visata 3D. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

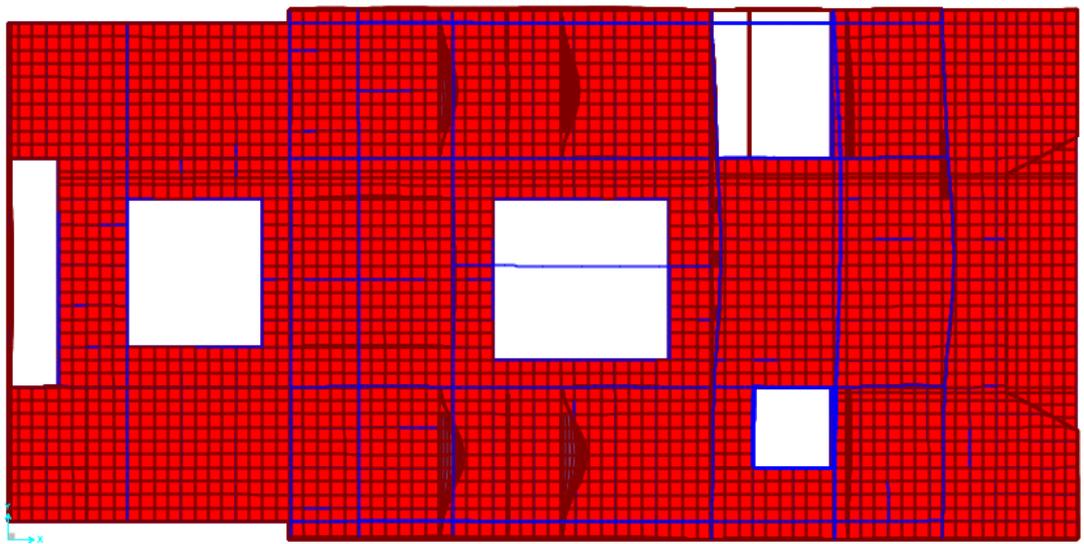


Figura 4.30 Deformaciones causadas por la fuerza $S(x)$ vista en planta. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

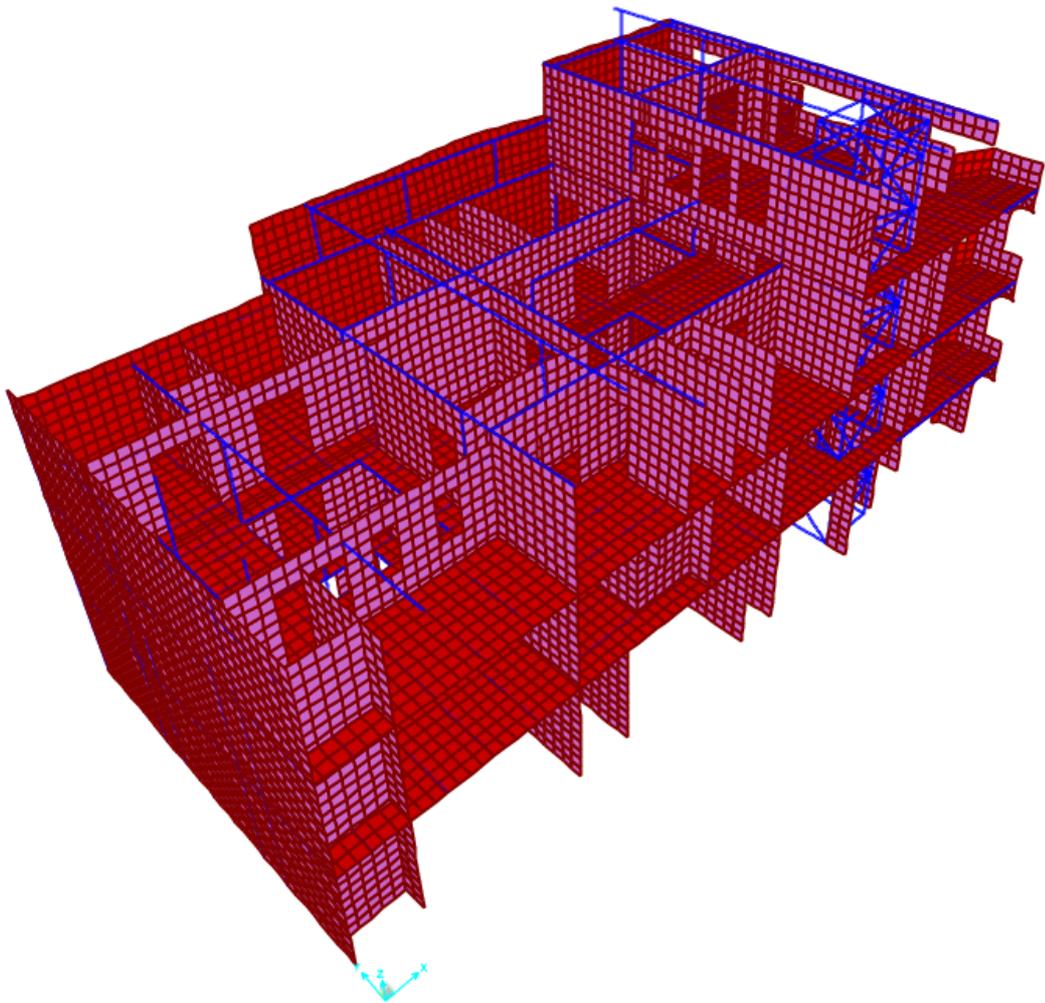


Figura 4.31 Efecto de la componente $S(y)$ de la fuerza sísmica. Vista 3D. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

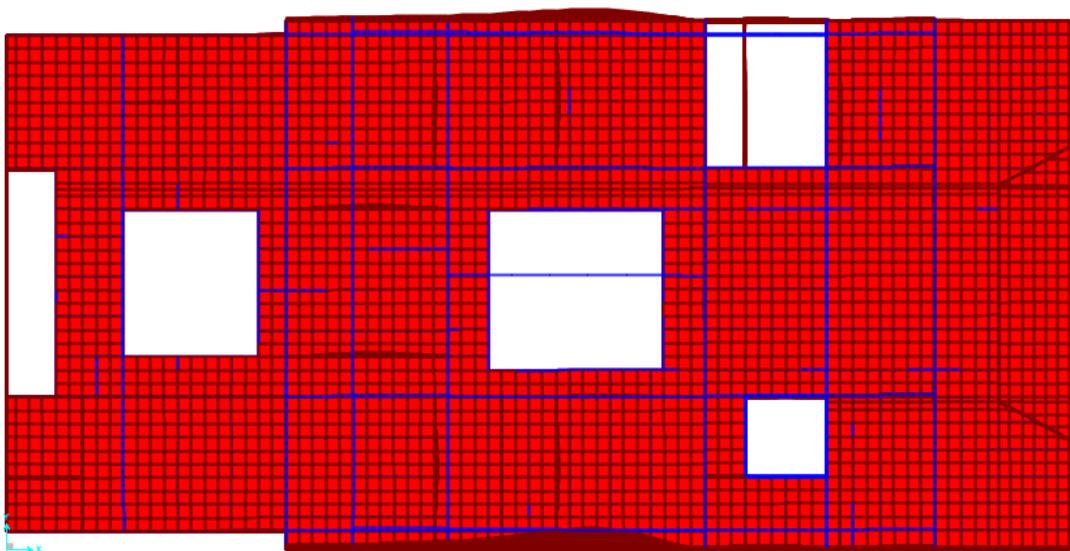


Figura 4.32 Deformaciones causadas por la fuerza $S(y)$, vista en planta. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

4.2.7 Resultados

Análisis eje (x)

El modo 3, figura 4.33, tiene una frecuencia de 4.19Hz y corresponde a un periodo de 0.239 s. Este modo permite poner en movimiento 44.60% de la masa total del edificio en la dirección del eje (x), ver Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Masa desplazada en dirección del eje (x). Fuente: SAP2000, elaboración propia.

Dirección eje X			
	Masa total (kg)	1725383,64	
	Periodo	Masa	Porcentaje de participación
Modo	[s]	[kg]	[%]
1	0,275	33,42	0,00%
2	0,249	20671,18	1,20%
3	0,239	769521,10	44,60%
4	0,227	1725,38	0,10%
5	0,226	48310,74	2,80%
6	0,222	13803,07	0,80%
7	0,220	41409,21	2,40%
8	0,218	153559,14	8,90%
9	0,213	115600,70	6,70%
10	0,196	0,00	0,00%
11	0,194	0,00	0,00%
12	0,187	0,00	0,00%
13	0,182	160460,68	9,30%
14	0,157	8626,92	0,50%
15	0,156	0,00	0,00%

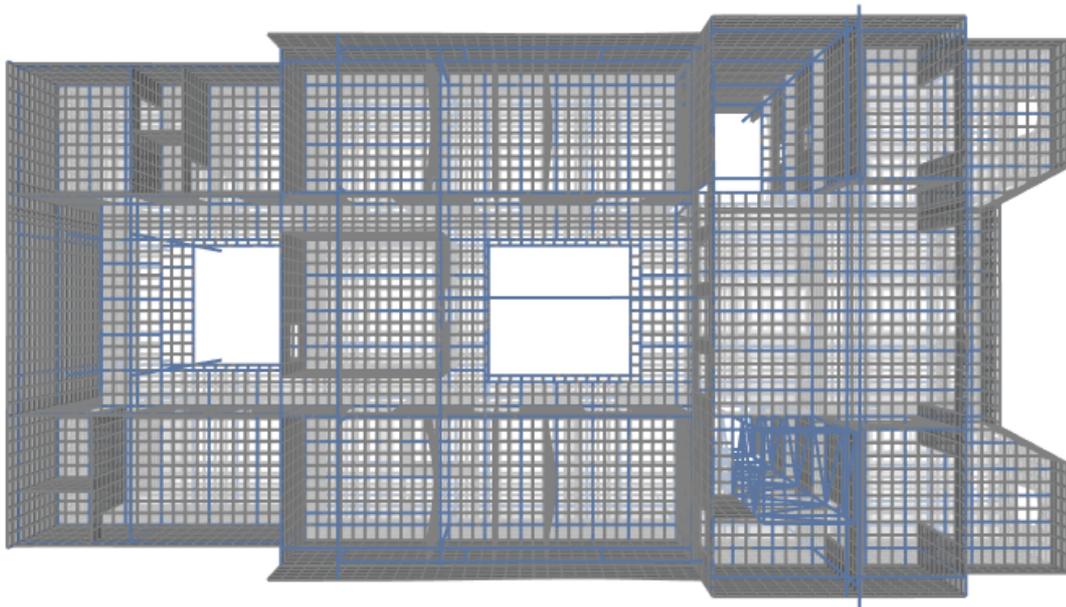


Figura 4.33 Deformada (MODAL)-Modo 3; $T = 0,23892$; $F = 4.19$ Hz y $m = 44.60$ %. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Análisis eje (y)

El modo 2, figura 4.34, tiene una frecuencia de 4.02 Hz y corresponde a un periodo de 0.239 s. Éste, permite poner en movimiento 37.30 % de la masa total del edificio en la dirección del eje Y. Ver tabla 4.9.

Tabla 4.9 Masa desplazada en la dirección del eje (y). Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Dirección eje Y			
Masa total (kg)			1725383,64
	Periodo	Masa	Porcentaje de participación
Modo	[s]	[kg]	[%]
1	0,275	177714,51	10,30%
2	0,249	643568,10	37,30%
3	0,239	6901,53	0,40%
4	0,227	0,00	0,00%
5	0,226	12077,69	0,70%
6	0,222	27606,14	1,60%
7	0,220	112149,94	6,50%
8	0,218	3450,77	0,20%
9	0,213	127678,39	7,40%
10	0,196	0,00	0,00%
11	0,194	0,00	0,00%

12	0,187	0,00	0,00%
13	0,182	6901,53	0,40%
14	0,157	143206,84	8,30%
15	0,156	3450,77	0,20%

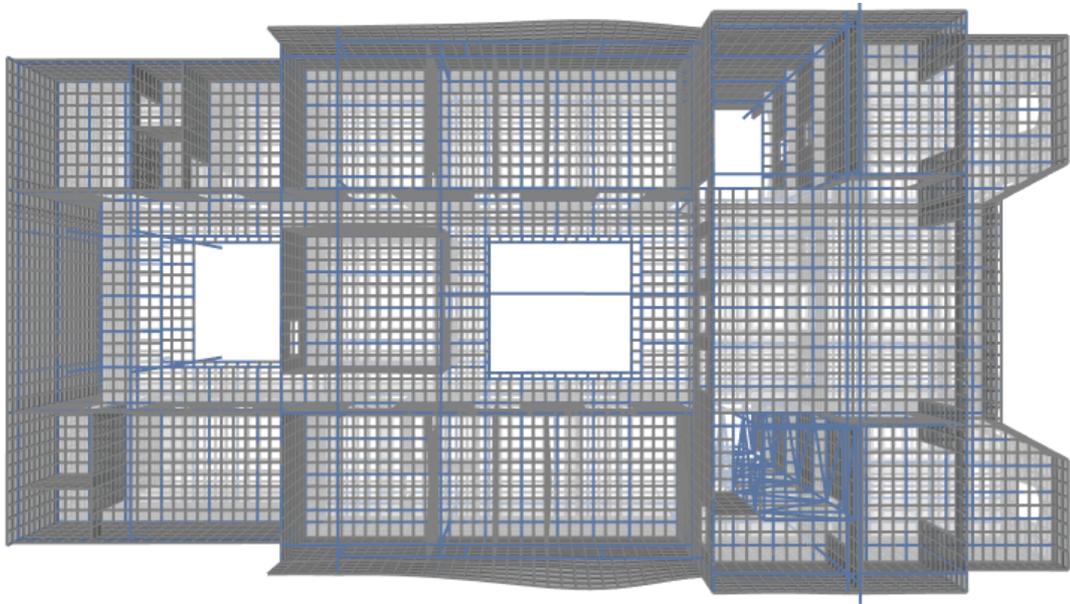


Figura 4.34 Deformada (MODAL)-Modo 2; $T = 0,24871$; $f = 4,02074$; $m = 37,30\%$. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

4.3 Cálculo de derivas

Derivas de piso

Los desplazamientos laterales elásticos (Δ elástico) son calculados en el centro de masa de cada planta mediante la creación de un punto que posee las coordenadas de dicho centro. Estos puntos representan los centros de masa de cada nivel y están incluidos dentro del diafragma respectivo para vigilar el desplazamiento ocasionado por la acción de la fuerza sísmica.

- Si el valor de la deriva es igual o mayor a 0,006, el edificio corre riesgo de colapso.
- Si el valor de la deriva es superior a 0,003 y menor a 0,006 se presentarán daños considerables.
- Si el valor de la deriva es inferior a 0,003, el edificio no presentará daños importantes.

La deriva de piso (δ elástico) es igual a la diferencia entre los Δ de cada nivel. Las tablas 4.10 y 4.11 y las figuras 4.35 y 4.36, muestran los resultados del análisis en las direcciones de los ejes (x) y (y).

Tabla 4.10 Desplazamientos en dirección (x). Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Deriva X			
	Nivel	Δ	δ
	(m)	(m)	(m)
3era Planta Alta	11,61	0,020969	0,006738
2da Planta Alta	7,77	0,014231	0,006634
1era Planta Alta	4	0,007597	0,007597
Planta Baja	0	0	0

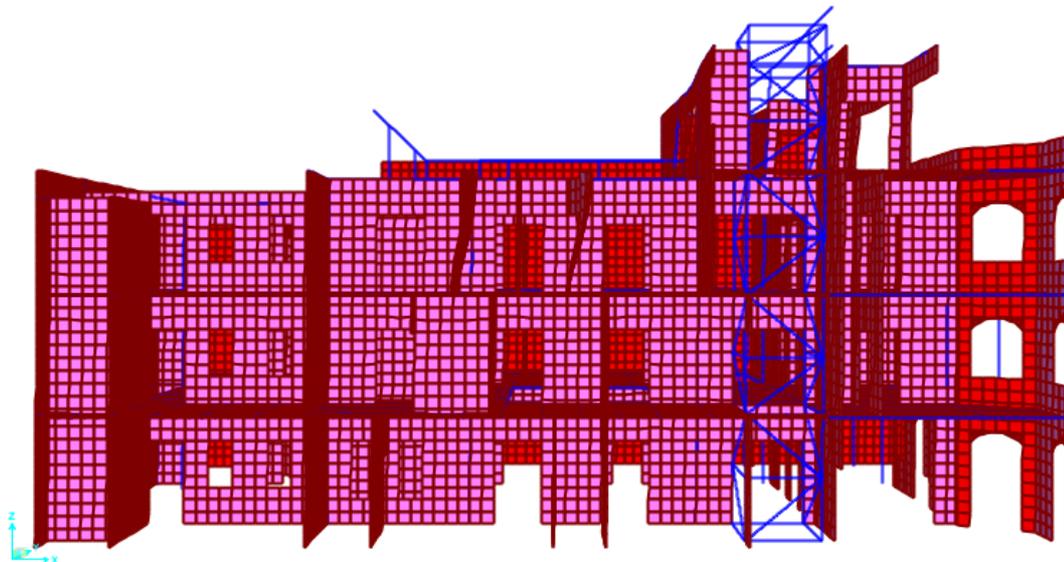


Figura 4.35 Deformaciones por niveles en dirección del eje X. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Tabla 4.11 Desplazamientos en dirección (y). Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Deriva Y			
	Nivel	Δ	δ
	(m)	(m)	(m)
3era Planta Alta	11,61	0,023269	0,008898
2da Planta Alta	7,77	0,014371	0,006434
1era Planta Alta	4	0,007937	0,007937
Planta Baja	0	0	0

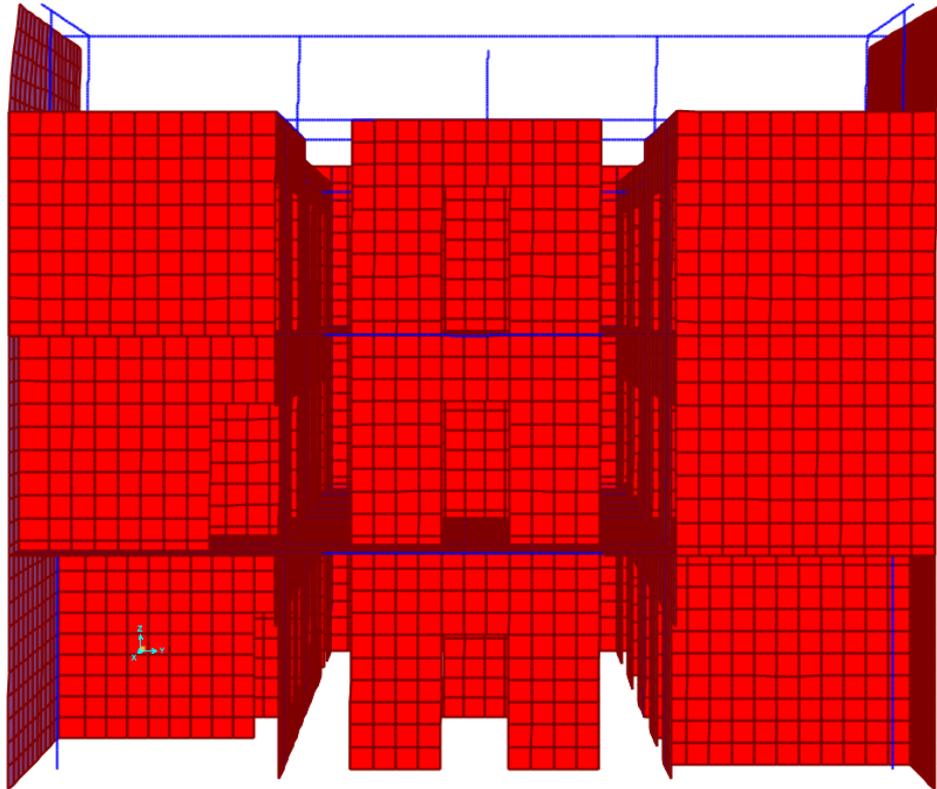


Figura 4.36 Deformaciones por niveles en dirección del eje (y). Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Derivas de paredes

El análisis de las derivas de paredes se realizó mediante la utilización del sistema de ejes establecidos, de esta manera se obtuvo una visualización completa de todas las paredes que confirman el inmueble, cabe señalar que ninguno de los muros tiene una función estructural en la edificación “CASA LA CONDAMINE”, y las paredes que presentan mayor riesgo de desplome son aquellas situadas en la tercera y cuarta planta alta, los datos y gráficos que se exponen a continuación fueron obtenidos en función al cálculo realizado en SAP 2000.

Análisis de derivas en paredes en dirección del eje (X)

Como se menciona anteriormente, las paredes que se ven mayormente afectadas por la fuerza sísmica son las ubicadas en la tercera y cuarta planta del edificio. La figura 4.37, muestra como estas áreas se deforman ante la acción de la componente $S(x)$ de la fuerza sísmica aplicada.

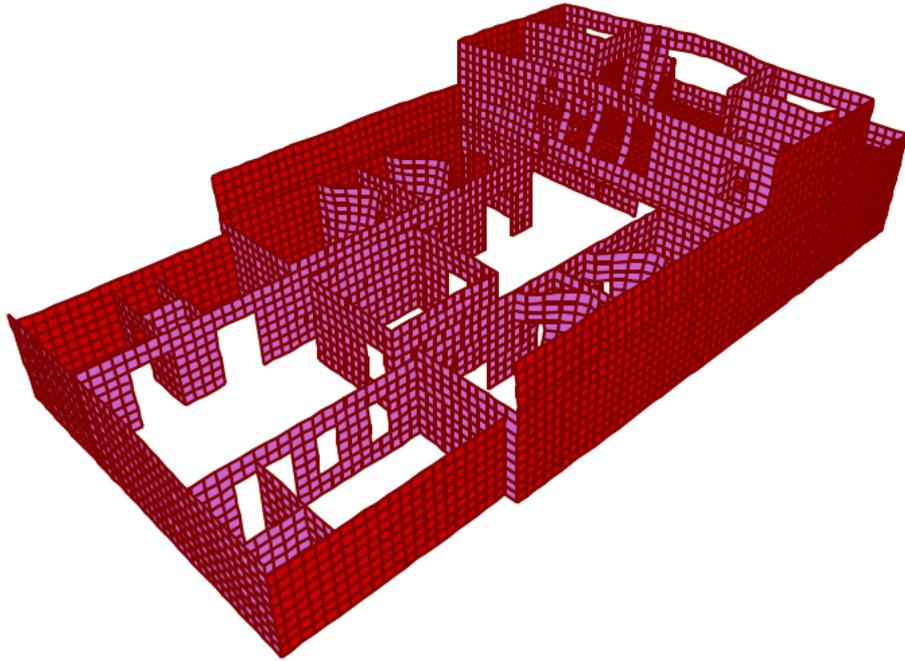


Figura 4.37 Deformación en paredes tercera y cuarta planta por la acción de $S(x)$. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Para mejorar la apreciación del fenómeno y determinar la vulnerabilidad del inmueble, a continuación, se puede observar por ejes las paredes más afectadas y que a causa de la deriva que presentan se las considera de alto riesgo pues se estima que se desplomarán en caso de sismo.

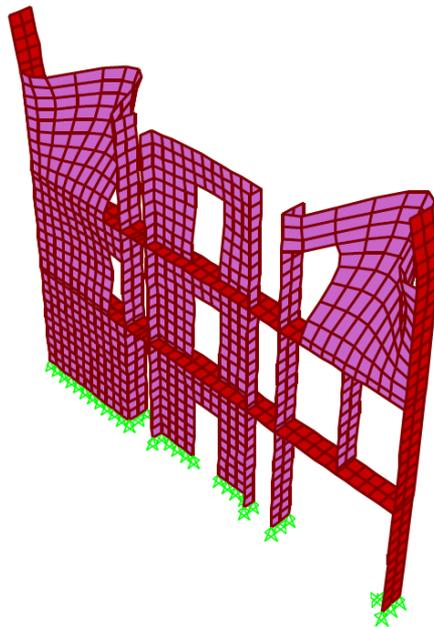


Figura 4.38 Eje M, N = +7.77m, deriva máxima mayor a la permitida. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

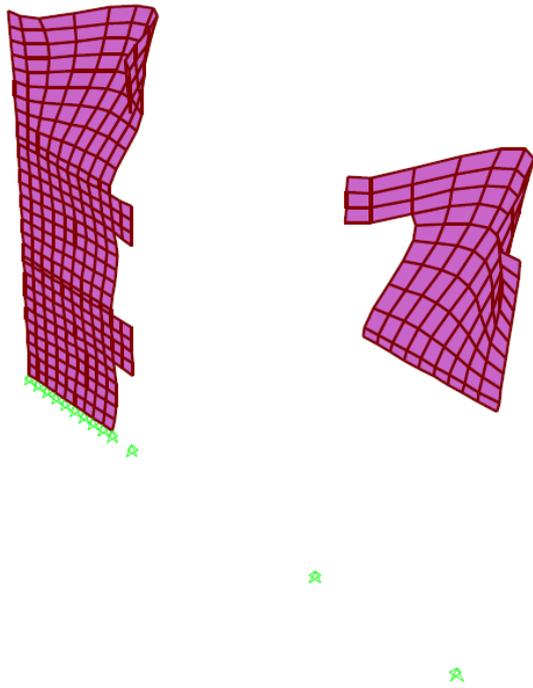


Figura 4.39 Eje O, $N = +7,77$ deriva máxima mayor a la permitida. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

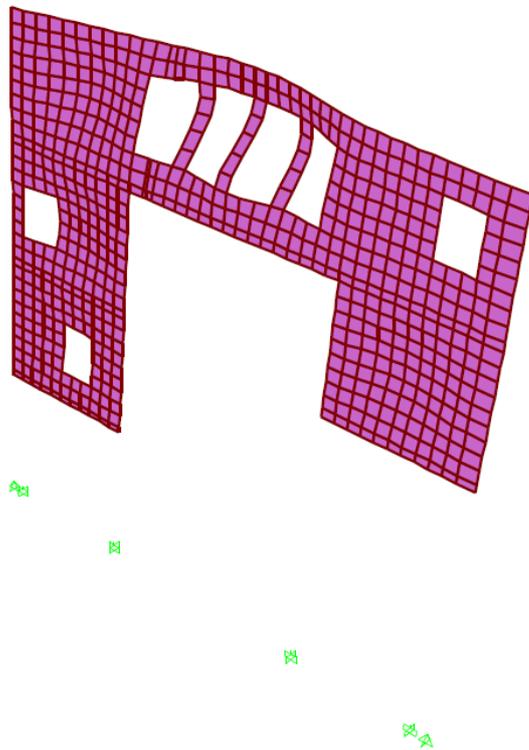


Figura 4.40 Eje R, $N = +7,77$ deriva máxima mayor a la permitida. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

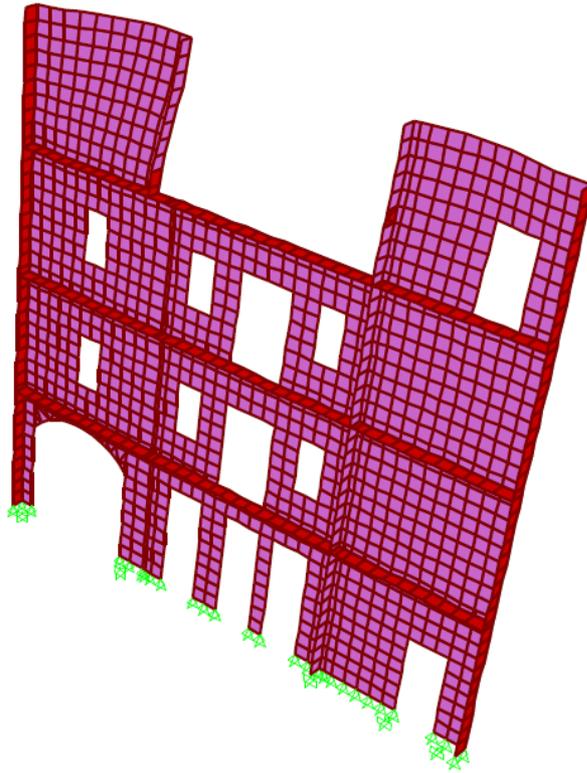


Figura 4.41 Eje U, $N = +11,61$ deriva máxima mayor a la permitida. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

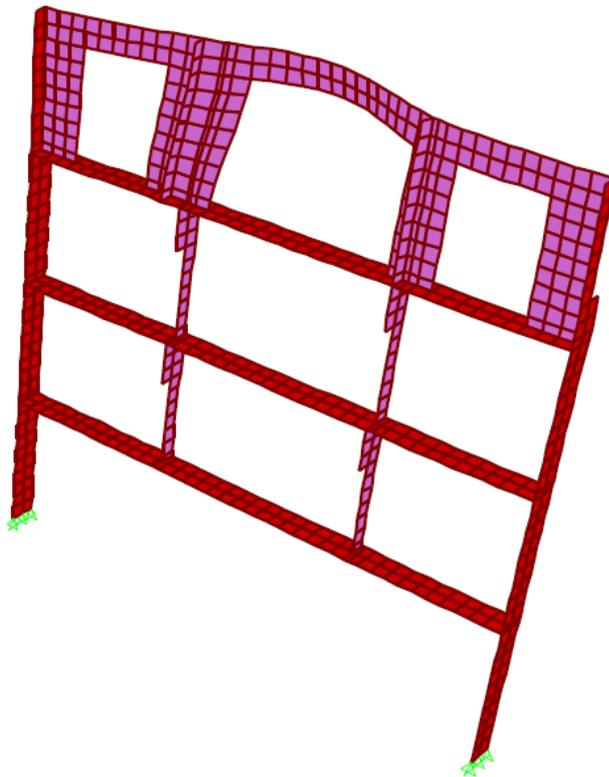


Figura 4.42 Eje W, $N = +11,61$ deriva máxima mayor a la permitida. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Análisis de derivas de paredes en dirección del eje (Y)

Al igual que en lo expuesto anteriormente, la figura 4.43, muestra la acción de la componente $S(y)$ de la fuerza sísmica aplicada y como las paredes de las dos plantas superiores se deforman en conjunto.

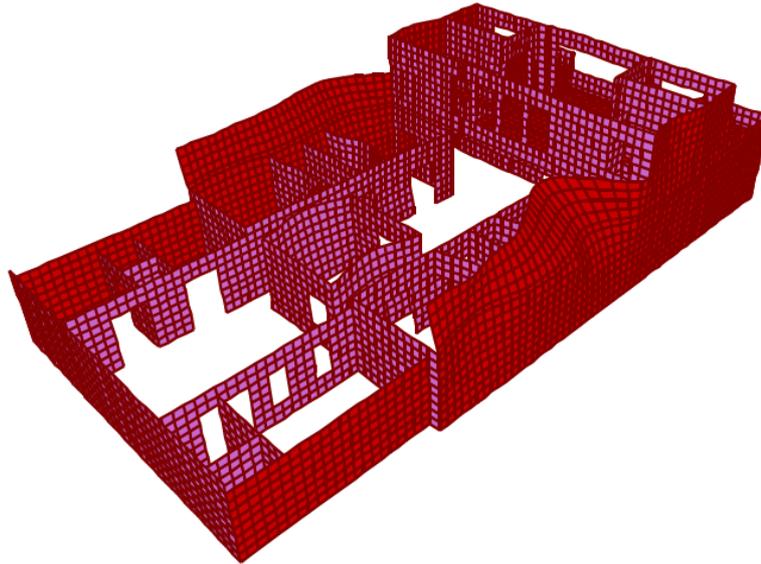


Figura 4.43 Deformación en paredes tercera y cuarta planta alta por la acción de $S(y)$. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

En el caso de las derivas ocasionadas por la componente $S(y)$, las paredes más afectadas son las dos grandes áreas que colindan con las edificaciones vecinas, se observa que la parte superior de estas sufrirán gran daño en caso de sismo, pero al estar confinadas entre la nueva estructura de la edificación y los edificios colindantes no se espera el colapso de estas.

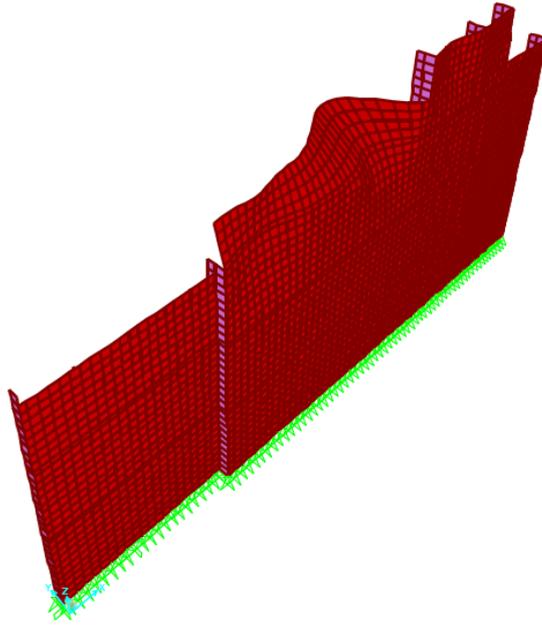


Figura 4.44 Eje 1, $N = +11,61$ deriva máxima mayor a la permitida. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

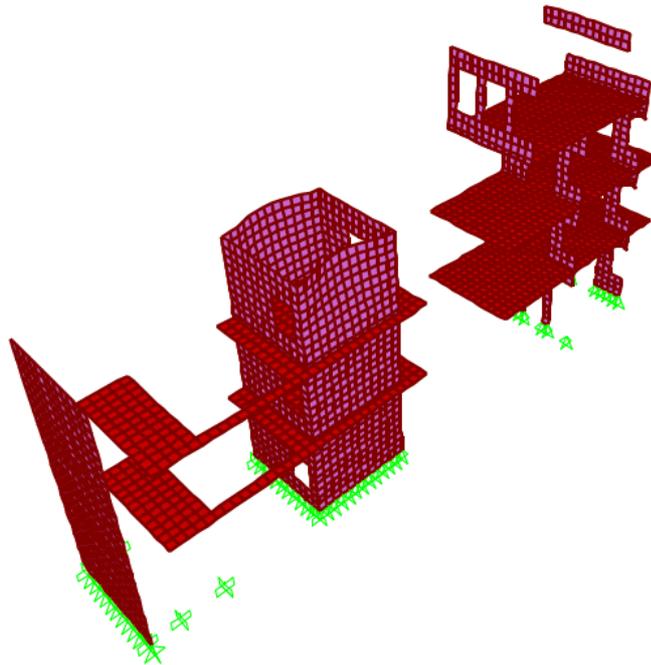


Figura 4.45 Entre eje 5 y 7, $N = + 7,77$ torre central. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

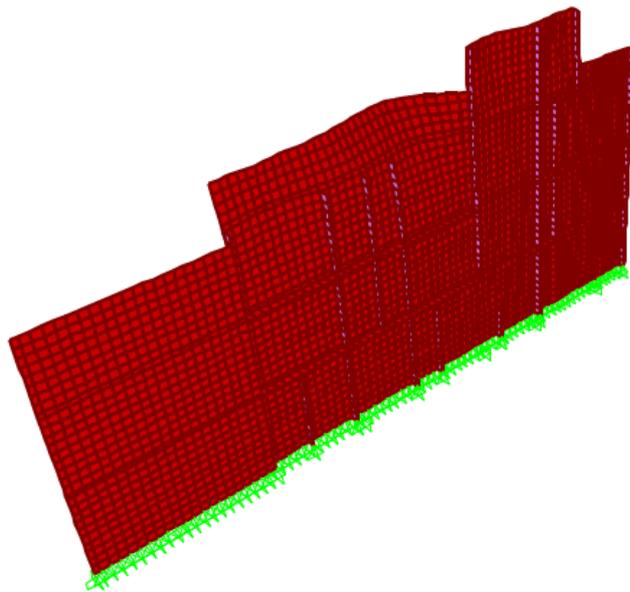


Figura 4.46 Eje 12, $N = +11,61$ deriva máxima mayor a la permitida. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Comprobación de las derivas de piso por niveles

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (2014), define a una derivada de pared como un desplazamiento lateral relativo generado particularmente por la acción de una fuerza horizontal con respecto a la altura del muro. La figura 4.47, extraída de la normativa ecuatoriana presenta valores límites que permiten interpretar las derivas de paredes.

Estructuras de:	Δ_M máxima (sin unidad)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02
De mampostería	0.01

Tabla 7 : Valores de Δ_M máximos, expresados como fracción de la altura de piso

Figura 4.47. Límites de deriva establecidos en la NEC. Fuente: NEC 2015

En el caso de este estudio, se tomó el valor límite descrito en la norma E.30 (RNE Perú, 2014) (Tabla 54), el valor máximo para la distorsión de entrepiso 0.005.

Material Predominante	(Δ_i / h_w)
Concreto Armado	0,007
Acero	0,010
Albañilería	0,005
Madera	0,010
Edificios de concreto armado con muros de ductilidad limitada	0,005

Figura 4.48 Datos de distorsión de entrepiso (deriva). Fuente: Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento (2006). Norma E.0.30. Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú. (Tabla 54).

Tabla 4.12 Comprobación de las derivas de piso por niveles. Fuente: SAP 2000, elaboración propia.

Nivel	$\frac{\Delta}{h}$ dir. (x)	$\frac{\Delta}{h}$ dir. (y)	Limite norma N.30 (Δ/h)
3ª PA	0.0017	0.0023	0.005
2ª PA	0.0017	0.0017	0.005
1ª PA	0.0018	0.0019	0.005

Se observa que las derivas de piso obtenidas en el estudio cumplen con los límites de la norma E30 y también los establecidos en la NEC.

4.4 Resumen de resultados del análisis sísmico

Modelado: El modelo de la “Casa La Condamine” está compuesto por elementos bidimensionales que representa paredes y losas, vigas y columnas representados con elementos lineales y puntos llamados nodos que representan la conexión entre cada elemento, como resultado, el modelo posee 133506 grados de libertad.

Análisis Modal: Se determino los modos de vibrar, de los cuales se analizaron los 10 primeros en la dirección del eje (x) y (y) respectivamente, se comprobó que existe poca participación de masa en cada modo de vibrar debido a la configuración que posee el sistema. El modo 3 predomina en la dirección del eje (x) con un 44.64% de participación de masa, y en la dirección del eje (y) el modo 2 con un 37.30% de participación.

Si bien los modos restantes no presentan gran participación de masa de la edificación, contienen información de la manera en que se mueve la estructura o al menos un elemento dentro de ella.

Análisis Espectral: El espectro de respuesta generado muestra que la mayor aceleración a la que el sistema llega es de 0.868g en un periodo de 0.6s, por lo tanto, el periodo de 0.24s donde se produce la mayor vibración está dentro del rango establecido de (0.1 a 1s) por la norma, esto quiere decir que globalmente la estructura es estable; sin embargo, existirán daños localizados en paredes, pero estos efectos no comprometerán su buen desempeño estructural.

Los desplazamientos máximos para los modos principales tanto para el eje (x) como para el eje (y) son de 0.020969m y 0.023269m respectivamente, estos desplazamientos son causados por las fuerzas que actúan sobre el sistema, siendo estas 1 664 244.13kgf en dirección (x) y 1 663 955.47kgf en dirección (y). Se comprueba que las paredes laterales de adobe y las paredes internas de la tercera planta alta tendrán el mayor desplazamiento, por lo tanto, son susceptibles al volcamiento.

Derivas de piso: La deriva máxima en planta alta tiene una magnitud de 0.00889832 m y en planta baja de 0.00759681 m, estos valores se mantienen por debajo de los valores mandatorios en la normativa.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos, ver tabla 4.13.

Tabla 4.13 Resumen de resultados del análisis sísmico. Fuente: elaboración propia.

RESUMEN DE RESULTADOS				
Análisis modal				
Período				
Máximo [s]	0.275		Mínimo [s]	0.156
Análisis espectral				
Masa total	Participación de masas		Desplazamiento máximo	
[kg]	Sentido X [%]	Sentido Y [%]	Sentido X [m]	Sentido Y [m]
1725383.64	769521.10	643568.10	0.02096936	0.02326912
Derivas				
Planta baja [m]		Planta alta [m]		
0.00759681		0.00889832		

CONCLUSIONES

Los sismos son parte de los fenómenos naturales que pueden ser extremadamente mortales y devastadores, prueba de ello fue el desastre ocurrido en el Ecuador en abril del 2016. Debido a estas razones, numerosos trabajos de investigación referentes a la vulnerabilidad sísmica han sido dedicados a analizar el comportamiento sísmico de diferentes tipos de estructuras donde los principales, son concernientes a edificaciones de hormigón armado o metal y en menor medida a estructuras de madera y tierra cruda.

En el ámbito de la ciudad de Cuenca se puede distinguir dos grandes familias:

- Las estructuras llamadas “modernas” que han sido concebidas con tecnologías muy recientes, respetuosas de los códigos actualizados de la construcción que incluyen criterios de diseño sismorresistente.
- Las estructuras llamadas tradicionales, donde se puede incluir los edificios históricos de la ciudad y demás edificaciones, cuya tecnología constructiva es relativa al contexto local particular (historia, recursos, población, etc.).

De esta última familia, se espera una respuesta pobre frente a un evento sísmico y, por lo tanto, una vulnerabilidad significativamente más elevada. La necesidad de profundizar en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras existentes, tengan o no una importancia estratégica y/o histórica, es el origen de la puesta en marcha del trabajo que se presenta en este manuscrito.

Entonces, el tema de este documento es describir el comportamiento que tendrá una edificación que pertenece al patrimonio arquitectónico de la ciudad como caso de estudio, para someterla a un análisis numérico cuyo objetivo es analizar su respuesta específica bajo sollicitaciones sísmicas y evaluar su vulnerabilidad.

Para hacer esto, dos partes fueron escritas:

La primera parte, respecto a los elementos necesarios para comprender la problemática de la tesis:

- Los conceptos que sirven de base para el desarrollo del estudio y que forman los cimientos de este, toca también lo concerniente al riesgo sísmico presente en el Ecuador y de la ciudad de Cuenca.

- El estado del arte, concerniente a las metodologías que existen para realizar estudios de vulnerabilidad sísmica, algunos principios generales de dinámica de estructuras y herramientas de análisis que permiten comprender la problemática sísmica y los métodos existentes para su estudio.
- La descripción detallada del caso de estudio “Casa La Condamine”, y del método (MEF) utilizado para la concepción del modelo matemático. Este último permite comprender el análisis que se realiza.

La segunda parte, ligada concretamente al desarrollo del análisis sísmico de la “Casa La Condamine” mediante el modelo matemático creado sometido a una carga sísmica, para estudiar su respuesta y determinar su vulnerabilidad.

El capítulo 1 resumió los conceptos base sobre los cuales se apoya el estudio. Se ha podido ver también la realidad del riesgo sísmico existente en el territorio nacional y en la ciudad de Cuenca, por qué y en donde se origina, esto permitió construir una idea de cuan expuestas están las edificaciones frente al embate de un sismo y dio un primer acercamiento a su vulnerabilidad.

El capítulo 2 describe de manera condensada algunas metodologías para analizar la vulnerabilidad sísmica en edificaciones. Permite concluir que dentro de la literatura existente se puede agrupar las metodologías en dos grandes grupos: métodos subjetivos y métodos analíticos, donde la selección de uno u otro, o una combinación de ambos depende de la información disponible, el tiempo de emisión, el detalle requerido, el estado de conservación, el nivel de riesgo que presenta para los usuarios, la relevancia de la edificación y la cantidad de inmuebles considerados para el estudio.

Se pudo ver también lo referente a los métodos de cálculo existentes en dinámica de estructuras, el detalle de los métodos de cálculo muestra que solamente un análisis temporal, basado en un modelo avanzado de cálculo de estructuras, permite estudiar en detalle los efectos globales y locales de la acción sísmica sobre la estructura. La dificultad reside en la necesidad de una modelización extremadamente precisa, con el objetivo de obtener resultados lo más cercanos a la realidad y así predecir correctamente la respuesta dinámica del edificio.

Finalmente, este capítulo hace una revisión condensada de trabajos tipológicos y numéricos relativos al estudio de la vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Cuenca,

esta información permite concluir sobre la importancia de trabajos de investigación ligados a esta temática, a fin de construir la base del conocimiento que permita el desarrollo de estudios más profundos en este campo, y de esta manera, disponer de las herramientas que permitan tomar las acciones necesarias para proteger las infraestructuras y garantizar la seguridad de la población.

El capítulo 3 conduce a la presentación en detalle de la edificación estudiada en esta tesis “Casa La Condamine”, a partir de una descripción minuciosa de aspectos como su localización, valor arquitectónico, características constructivas, geométricas y materiales que la componen. La base de datos que provee este capítulo es clave para la concepción del modelo matemático y posterior análisis descritos en el capítulo 4.

De lo expuesto en esta sección, se concluye que la “Casa La Condamine” posee una mixtura de técnicas constructivas y materialidad que va de lo tradicional a lo moderno, conserva muchas de sus características originales como: grandes paredes de adobe y bahareque, y su distribución arquitectónica original. A estos aspectos se suman adaptaciones modernas como una estructura en acero encargada de absorber las solicitaciones estáticas y dinámicas, lo que libera a sus grandes paredes de adobe de estas solicitaciones.

Lo expuesto en el párrafo anterior se puede observar en gran número de edificaciones antiguas que han sido intervenidas por preservación y nuevo uso, los problemas se dan cuando estas intervenciones se realizan sin ningún control técnico, lo que desemboca en el aumento de la vulnerabilidad de las edificaciones.

Finalmente, el capítulo 4 está dedicado a describir el análisis sísmico y los resultados obtenidos, donde el indicador que permite evaluar la vulnerabilidad sísmica de la edificación es la deriva de piso obtenida. Se presenta los resultados obtenidos por la modelización de elementos finitos. La base del análisis realizado es el modelo matemático, este fue sometido a un análisis modal, análisis espectral y para terminar se calculó los desplazamientos y derivas.

Gracias a la discretización realizada en el modelo, se logró un análisis más preciso y próximo a la realidad. El proceso de modelado será más o menos complejo dependiendo del grado de exactitud requerido, es importante señalar que mientras más nos acerquemos a la realidad mejores serán los resultados, y en consecuencia se tomarán las decisiones adecuadas al momento de diseñar y/o evaluar una estructura.

El software SAP 2000, empleado en este estudio, es una herramienta versátil, propone una interfaz amigable para el usuario que permite trabajar en tres dimensiones y moverse entre diferentes planos sin dificultad, adicionalmente lleva precargada la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Este tipo de edificaciones presenta un grado considerable de complejidad a la hora de concebir el modelo matemático pues presenta una materialidad muy variada, diversas formas de conexiones y sistemas estructurales mixtos, lo que les confiere un comportamiento muy propio de ellas y de cada caso en especial; esto hace difícil que los resultados obtenidos puedan generalizarse en su totalidad.

En comparación con estudios realizados en el mismo ámbito, con edificaciones de características similares, se observa claramente que la respuesta de la estructura frente al sismo de diseño mejora considerablemente gracias al nuevo sistema estructural del cual ha sido dotada, pues esta mejora su capacidad resiliente evitando daños considerables, por el contrario, los inmuebles que han sido intervenidos de una forma poco controlada son susceptibles al fallo total.

Para concluir, al contrastar los resultados de las derivas obtenidas versus los valores reglamentarios, se comprueba que los volares cumplen con el requerimiento. Por lo tanto, se comprueba que la “Casa La Condamine” resistirá los efectos del sismo de diseño.

Por el contrario, el análisis local de derivas realizado sobre las paredes que muestran deformaciones importantes permite deducir que estos elementos son propensos al fallo por volcamiento, al no ser elementos estructurales el daño producido en estos no influye en la estabilidad de la estructura. Sin embargo, se deben considerar para el establecimiento de zonas seguras en caso de presentarse un evento sísmico importante.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez Monroy, J. P., & Morocho Torres, J. (2020). Análisis sísmico de edificaciones aisladas con muros de mampostería en Cuenca. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Arteaga Mora, P. A. (2016). Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y evaluación del índice de daño de una edificación perteneciente al patrimonio central edificado en la ciudad de Cuenca. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Barbat, A., & Pujades, L. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. *SÍSMICA 2004-6to Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Sísmica*.
- Caicedo, C., Barbat, A. H., Canas, J. A., & Aguiar, R. (s.f.). Vulnerabilidad sísmica de edificios. *Monografías de Ingeniería Sísmica. CIME-IS-6*, 106.
- Calvi, G. M., Pinho, R., Mangenes, G., Bommer, J. J., Restrepo Velez, L. F., & Crowley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISSET Journal of Earthquake Technology*.
- Chopra. (2014).
- Chopra, A., & Goel, R. (2004). A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 903-927.
- Cornejo Pintado, E. G., & Zúñiga Saca, J. M. (2020). Caracterización del patrimonio edificado irregular de baja altura del Centro Histórico de Cuenca, orientado a estudios de vulnerabilidad sísmica. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Fernández Echemendía, I., Gómez García, A., Carchipulla Ramón, N., Bonucci Martín, Y., & Pavón Suntaxi, M. (2018). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de 97 edificaciones de la "Comuna Santa Clara de San Millán", Quito. 1-8.
- Flores Salazar, L. G., & Ferreira, T. M. (2019). Vulnerabilidad sísmica para la rehabilitación del patrimonio cultural. Un acercamiento teórico-institucional. *Editorial Restauro Compás y Canto*, 1-26.
- García Ortega, D. K., & Guartazaca Sisalima, W. V. (2019). Capacidad Sísmica de las Estructuras de Mampostería del Centro Histórico de la Ciudad del Cuenca. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay.
- Jiménez Pacheco, J., Cabrera Cajamerca, J., Sánchez Beltrán, J., & Avilés Tenorio, F. (2018). Vulnerabilidad sísmico del patrimonio edificado del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto.
- Lloret Orellana, G. (2016). Estudio Histórico para la Restauración, Rehabilitación y Adecuación a nuevo uso del inmueble de propiedad de S.A. ARTHOTELES "CASA CONDAMINE". Cuenca, Ecuador.
- Maldonado Rondón, E., Chio Cho, G., & Gómez Araujo, I. (2007). Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos. Bogotá, Colombia: Ingeniería y Universidad.
- MIDUVI. (2016). Guía práctica para la evaluación de estructuras de conformidad con la NEC-2015. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Ministerio de Vivienda, C. y. (2018). Norma Técnica E.30 Diseño Sismorresistente. Peru.
- Morocho Arenillas, S. I., & Sarmiento Jaramillo, M. E. (26 de Mayo de 2021). La vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mediana altura y la identificación de zonas seguras mediante análisis modal: Caso Centro de Documentación Juan Bautista. Cuenca, Azuay, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- NEC. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*.
- Ortega Marquéz, A. R. (2020). Vulnerabilidad y Capacidad Sísmica de Edificaciones Tipo Mampostería Confinada de la Ciudad de Cuenca. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay.

- Quezada , R., Aguilar, E., & García , H. (2019). Macro-modeling of Adobe Piers for Seismic Analysis of Adobe Dwellings in Cuenca, Ecuador. Leuven, Bélgica: Department of Civil Engineering, KU Leuven.
- Vieux-Champagne, F. (2013). Analyse de la vulnérabilité sismique des structures à ossature en bois avec remplissage: essais expérimentaux-modélisation numérique - calculs parasismiques. Grenoble, Francia: HAL archives-ouvertes.fr.
- Yamín Lacouture, L., Phillips Bernal, C., Reyes Ortiz, J., & Ruiz Valencia , D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casa en adobe y tapia pisada. *Apuntes: Revista de estudios sobre Patrimonio Cultural*, 286-303.
- Zamora Cedeño, G., & Aguirre Ullauri, M. (2020). Consideraciones sobre la vulnerabilidad del patrimonio arquitectónico. Estudio de caso: la iglesia de El Sagrario, Cuenca. Ecuador. *Intervención*.