

Comparación de diseño estructural entre mampostería integral y concreto reforzado de una vivienda de tres niveles, para la Modalidad de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible.

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Comparación de diseño estructural entre mampostería integral y concreto reforzado, de una vivienda de tres niveles, para la Modalidad de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible


Llevado a cabo por el estudiante:

Monge Prado Johan

Carné: 2016070285

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el lunes 29 de enero de 2024 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

 **Tecnológico de Costa Rica**
Firmado digitalmente por
JOSE ANDRES ARAYA
OBANDO (FIRMA)
Fecha: 2024.01.31
10:59:48 -06'00'

Dr. Ing. Andrés Araya Obando
Director de la Escuela

ANGEL HUBERTO NAVARRO MORA (FIRMA)
Firmado digitalmente por
ANGEL HUBERTO NAVARRO MORA (FIRMA)
Fecha: 2024.01.29
14:54:14 -06'00'

Ing. Ángel Navarro Mora MSc.
Profesor Lector

HUGO EDUARDO NAVARRO SERRANO (FIRMA)
Firmado digitalmente por
HUGO EDUARDO NAVARRO SERRANO (FIRMA)
Fecha: 2024.01.29 10:43:20
-06'00'

Ing. Hugo Navarro Serrano, MSc.
Profesor Guía

GUSTAVO ADOLFO ROJAS MOYA (FIRMA)
Firmado digitalmente por
GUSTAVO ADOLFO ROJAS MOYA (FIRMA)
Fecha: 2024.01.30 09:33:27
-06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya, MSc.
Profesor Observador

Resumen

Este proyecto pretende desarrollar dos diseños estructurales de un edificio de uso habitacional de tres niveles mediante mampostería integral y concreto reforzado.

La estructura por diseñar forma parte de una propuesta arquitectónica que realiza el Ing. Felipe Corrales como su proyecto de graduación a finales del año 2021, en la Universidad de Costa Rica, para la modalidad de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible (VUIS) desarrollada por el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH).

El desarrollo de ambos modelos se ejecutará utilizando como herramienta de modelado el software Etabs, tomando en cuenta las características de los materiales a utilizar para optimizar el modelo, y que este cumpla con los requerimientos del Código Sísmico de Costa Rica 2010 Revisión 2014 (CFIA, 2016). De esta manera se pueden realizar comparaciones entre ambos modelos, y finalmente, sugerir cuál diseño es conveniente efectuar, tomando en consideración aspectos económicos, así como el cumplimiento de la normativa estructural.

Entre los resultados más importantes, destaca que la inversión económica contemplando únicamente los materiales de obra gris, es menor para el caso de la estructura en mampostería integral reforzada, dando como resultado un valor de ₡13,251,753.69, lo que se refleja en un 35% de ahorro comparado con la estructura de concreto reforzado, sin embargo, debe considerarse, que la construcción de la estructura en mampostería integral, se tardaría un 37% más del tiempo en la ejecución de la obra gris, ya que es un sistema constructivo más lento de ejecutar.

Palabras claves: Diseño estructural, Mampostería integral, Concreto reforzado, VUIS, MIVAH, CSCR.

Abstract

This project seeks to develop two structural designs for a three-story residential building using reinforced masonry and reinforced concrete.

The structure to be designed is part of an architectural proposal that Mr. Felipe Corrales is carrying out as his graduation project at the end of the year 2021, at the University of Costa Rica, for the modality of Urban, Inclusive and Sustainable Housing (VUIS) developed by the Ministry of Housing and Human Settlements (MIVAH).

The analysis of both models will be carried out using Etabs software as a modelling tool, taking into account the characteristics of the materials to be used, in order to achieve an optimized design, complying with the requirements indicated by the Costa Rican Seismic Code 2010 Revision 2014 (CFIA, 2016), and thus being able to make comparisons between both models, to finally suggest which design is more convenient to carry out, taking into consideration both economic aspects and compliance with structural regulations.

Among the most important results, it stands out that the economic investment, considering only the grey work materials, is lower for the case of the reinforced integral masonry structure, resulting in a value of ₡13,251,753.69, which is reflected in a 35% saving compared to the reinforced concrete structure, however, it should be considered that the construction of the integral masonry structure would take 37% more time than the execution of the grey work, since it is a slower construction system to execute.

Keywords: Structural design, Integral masonry, Reinforced concrete, VUIS, MIVAH, CSCR

Comparación de diseño estructural entre mampostería integral y concreto reforzado, de una vivienda de tres niveles, para la Modalidad de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible.

JOHAN ANDREY MONGE PRADO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Profesor Guía: Ing. Hugo Navarro Serrano. M.Sc

Noviembre del 2023

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción	4
Marco teórico	6
Metodología	33
Resultados.....	36
Análisis de los resultados	64
Conclusiones	68
Recomendaciones.....	70
Apéndices	71
Anexos.....	75
Referencias.....	78

Prefacio

En todo proyecto constructivo, una de las partes más importantes a considerar, es lograr diseñar, una estructura, que tenga un punto de equilibrio, entre la seguridad que brinda a sus habitantes y a su vez, una optimización de los recursos económicos para que sea accesible a la mayor cantidad de personas, en especial para quienes tienen bajo nivel económico. Lograr este balance, entre seguridad y economía, puede significar el éxito o el fracaso de un proyecto constructivo.

La alta sismicidad en Costa Rica se debe a que el país, se ubica en medio de tres importantes placas tectónicas: las placas del Coco, Caribe, Nazca y Panamá (Linkimer, 2020). Por tal razón el país se encuentra entre las regiones con mayor actividad sísmica del mundo. Para enfrentar esta condición de amenaza en el territorio costarricense, Costa Rica, ha creado de su propio código de diseño, el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR), el cual brinda los requerimientos necesarios para diseñar estructuras sismorresistentes.

La estructura por diseñar en este proyecto de graduación forma parte de una propuesta arquitectónica, la modalidad de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible (VUIS). Esta modalidad, consiste en proyectos de pequeña escala, ubicados en sectores estratégicos, que buscan la densificación de las ciudades, con el fin de brindar servicios básicos y una mejor calidad de vida, por lo que está dirigido, especialmente, a personas de estratos medios y bajos. Por tal razón, es importante obtener una estructura sismorresistente, pero a su vez, sin elementos sobre diseñados, que pongan en riesgo, la viabilidad económica del proyecto.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar una estructura de tres niveles, mediante dos métodos constructivos: mampostería integral reforzada y concreto reforzado, con base en los lineamientos establecidos en el Código Sísmico de Costa Rica 2010 Revisión 2014 (CFIA, 2016) como principal documento de referencia, la norma e informe Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19) y el libro Especificación, diseño y cálculo de mampostería (Klingner, 2012), con la intención de optimizar estructuralmente ambos diseños, lo cual se refleja en el costo final del proyecto.

Quiero agradecer, al profesor Ing. Hugo Navarro, por su interés en mi proyecto, todo su tiempo invertido y por transmitirme su conocimiento. Al Ing. Erick Mata Abdelnour, por brindarme el apoyo inicial para poder desarrollar este tema. Al Ing. Alexander Vega, por el apoyo que me brindó durante el desarrollo de este proyecto. A mis compañeros, Isaac, Maikol y Becerril, siempre serán mis hermanos, gracias por su amistad y lealtad. A Maricruz, la persona que siempre recordaré, gracias por acompañarme y ayudarme desde el primer día, gracias por todo gorda. A mis hermanos y sobrinitos, todo mi esfuerzo fue y será para ustedes. A papi y a mami, gracias por creer en mí, y apoyarme siempre, ustedes son el motor, que me impulsan cada día a salir adelante. Ningún hijo podría estar más orgullo de sus padres de lo que yo estoy de ustedes, los amo mucho.

Pero, sobre todo, le agradezco a Dios, por ayudar a levantarme y enseñarme a no rendirme.

"Los sueños sin metas son solo sueños, y en última instancia, alimentan la decepción, en el camino para lograr tus sueños, debes aplicar disciplina, pero lo más importante, consistencia, porque sin compromiso, nunca comenzarás, pero sin consistencia, nunca terminarás."

Denzel Washington

"Recuerda, solo los disciplinados, son libres en la vida, si eres indisciplinado, eres esclavo de tus estados de ánimo, eres esclavo de tus pasiones."

Eliud Kipchoge

Resumen ejecutivo

Este proyecto se realizó para el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH), el cual está desarrollando el Modelo de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible (VUIS) (MIVAH,2020).

El Modelo VUIS, tiene como finalidad, la ejecución de proyectos de uso habitacional o mixtos, de varios niveles y tiene como principal objetivo la reconfiguración de la ciudades, para promover una densificación de los centros de población, de manera que, al concentrarse todo en un mismo sector, exista mayor facilidad para brindar mejores servicios públicos, y dirigir los recursos económicos hacia una misma región y por ende ofrecer mejor calidad de vida a los ciudadanos, que viven en sectores rurales, lejos de servicios de salud, agua potable, educación de calidad, entre otras (MIVAH,2020).

El ingeniero Felipe Corrales Vargas (Corrales, 2021), para el desarrollo de su proyecto de graduación, realizó un aporte a la modalidad VUIS, y diseñó un modelo BIM, que, a grandes rasgos, consiste en una propuesta arquitectónica, en donde se muestra la distribución arquitectónica, de un edificio de tres niveles.

Este proyecto, tiene como finalidad, desarrollar dos propuestas de diseño estructural, basándose en la distribución arquitectónica del ingeniero Felipe Corrales, mediante dos diferentes materiales constructivos: mampostería integral y concreto reforzado.

Estos diseños, se realizan con el fin de generar más información para la modalidad VUIS, de modo que cuando se ejecute esta modalidad, los desarrolladores tomen esta información, y que puedan tomar las previsiones necesarias, con base en estos diseños realizados.

Este proyecto de graduación se desarrolló de acuerdo con el cumplimiento de los siguientes objetivos:
Objetivo General

- ✓ Desarrollar dos propuestas diseño estructural: Una en mampostería integral y otra en concreto reforzado, para una vivienda de interés social de tres niveles, para la Modalidad de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible para el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos.

Objetivos Específicos

- ✓ Analizar y obtener información del modelo arquitectónico de la vivienda por diseñar y del Modelo de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible.
- ✓ Realizar el análisis estructural en mampostería integral reforzada y concreto reforzado mediante el software Etabs.
- ✓ Realizar el diseño estructural de los elementos, para el modelo en mampostería integral y el modelo en concreto reforzado.
- ✓ Analizar y comparar los resultados generados por el análisis y diseño estructural para ambos materiales constructivos.
- ✓ Realizar comparaciones en términos de costo y tiempo, contemplando únicamente los materiales necesarios para alcanzar la obra gris, entre los dos diseños generados.

Entre las conclusiones más importantes, se obtiene que el proyecto se va a diseñar para una zona sísmica III, con un tipo de suelo S3. Se propone asignar la zona de Pavas como posible ubicación para diseño, debido a que, según los estudios realizados por el MIVAH, es una zona con idoneidad alta para el desarrollo de la Modalidad VUIS. Además, se aplicó una sobre carga muerta de 435 kg/m², contemplando el peso del entrepiso, una carga viva de 200 kg/m² y una carga viva de 40 kg/m² para cubierta de techo, ambas obtenidas del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

Además, ambas estructuras al ser geoméricamente iguales presentan sus desplazamientos máximos en la misma ubicación, sin embargo, en el caso del edificio en concreto reforzado, estos desplazamientos siempre son menores. Con respecto con las derivas, en el caso de la estructura en

mampostería, se obtuvieron datos mayores con comparación a la estructura de concreto reforzado, sin embargo, para ambos casos se mantienen en el rango aceptado según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

De los resultados obtenidos en el diseño estructural, se tiene que para ambas estructuras, las vigas cumplen con la cantidad de acero mínimo establecido por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016). Para la estructura en concreto reforzado, los muros fueron diseñados con un espesor de 10 cm y cumplen con los requerimientos utilizando la cuantía mínima de acero, en este caso se obtuvo el muro MC1 con varilla #3 a cada 28cm en ambos sentidos. Para el caso de la estructura en mampostería integral reforzada, se tiene dos tipos de muros, MM1 y MM2, ambos muros con bloques con espesor de 12 cm, con acero horizontal con varilla #3 a cada 40cm y #3 a cada 60cm, respectivamente y acero vertical con varilla #3 a cada 60cm.

Al comparar los resultados generados por los dos diseños estructurales, se obtiene que es necesario utilizar una mayor cantidad de varilla para el caso de la estructura en concreto reforzado, esto se da, porque la cuantía mínima dada por el Código Sísmico de Costa Rica 2010 Revisión 2014 (CFIA, 2016), es menor para la mampostería reforzada.

Finalmente, se determina, que el sistema de concreto reforzado, al compararlo con la mampostería integral reforzada, tiene la ventaja de que se tarda mucho menos tiempo en construirlo, pero tiene mayores costos de ejecución. Para este proyecto al tratarse de un modelo para vivienda de interés social se recomienda la opción de la mampostería integral, en este caso, tendría un costo por materiales de obra gris de ₡13,251,753.69, por debajo del costo de la estructura en concreto reforzado, el cual tiene un costo de ₡20,694,403.29.

Introducción


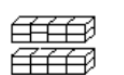
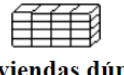
El Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH), surge como respuesta a condiciones de orden externo e interno: Externo, por medio de la Agencia ONU Hábitat de la Organización de las Naciones Unidas, la cual busca colocar la necesidad de vivienda como una prioridad política, y, por otro lado, de orden interno, debido a que la crisis nacional de los años setenta y principios de los ochenta, provoca un intenso movimiento social pro-vivienda. En consecuencia, en 1979, bajo el Decreto Ejecutivo 10458-P-DP, se crea el sector Vivienda y Asentamientos Humanos, quien es el órgano técnico rector del gobierno de la república en materia de ordenamiento territorial y asentamientos humanos (MIVAH,2020).

El Modelo de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible (VUIS), consiste en proyectos de pequeña escala, de uso habitacional y mixto, que sirve a un propósito estratégico de reconfiguración de las ciudades, a través de un modelo que promueve la integración comunitaria, el cual, desde el 2018, ha tenido participación del MIVAH, BANHVI, CFIA, INVU, así como el sector privado. Este modelo se plantea para que pueda ser desarrollado por pequeñas y medianas empresas, así como profesionales independientes, y está dirigido a las personas de estratos medios y bajos, que cuentan con escasos recursos para poder acceder a una vivienda en condiciones adecuadas (MIVAH,2020).

El Modelo VUIS busca una densificación propicia de los centros de población, con acceso a servicios públicos e infraestructura urbana, como acceso a agua potable, servicios de salud, educación, alcantarillado sanitario, entre otros servicios (MIVAH,2020). La necesidad de una ciudad densificada, nace ante la insostenibilidad actual, al encontrarse una dispersión de la población en las zonas urbanas, al invadir suelo rural, lo que trae consigo problemas como aumento del consumo del suelo, aumento en el consumo del combustible al tener que trasladarse mayores distancias a sus actividades cotidianas al sector urbano y degradación ambiental (Vargas, 2014), así como gastos en infraestructura para llevar los servicios públicos hasta zonas alejadas.

Algunos de los principales beneficios ambientales de la densificación, se pueden observar en Molini y Salgado (2011), donde tomando como ejemplo 8 viviendas según su tipo de densificación, se tiene un gran beneficio construyendo edificios multifamiliares. Se puede observar, en la imagen 1, que se puede obtener una disminución del uso del suelo en hasta un 66%, en energía de calefacción hasta un 32% y una disminución en el coste de la obra de hasta un 42%, por lo que, la densificación mediante la construcción de edificios multifamiliares puede traer consigo beneficios económicos importantes.

Figura 1. Comparación del impacto ambiental de 8 unidades de vivienda según su densidad.

	 8 viviendas dúplex en casas aisladas (2 plantas)	 8 viviendas dúplex en 2 bandas de 4 casas adosadas (2 plantas)	 8 viviendas dúplex en edificio plurifamiliar (4 plantas)
Ocupación del suelo	100 por ciento	70 por ciento	34 por ciento
Energía de calefacción	100 por ciento	89 por ciento	68 por ciento
Coste de la obra	100 por ciento	87 por ciento	58 por ciento

Fuente: Molini & Salgado (2011)

La Modalidad VUIS, tiene como finalidad desarrollarse en terrenos en desuso y terrenos con edificaciones existentes que hayan cumplido su vida útil o con bajo aprovechamiento del terreno, para su posterior desarrollo en pequeños condominios verticales, en donde podría habitar mayor cantidad de familias, y con esto, muchas familias podrían conseguir casa propia, sin la necesidad de trasladarse a sitios alejados por los escasos de terrenos para construcción en las áreas urbanas. Estos condominios verticales de pequeña escala están pensados para desarrollarse en varios diseños: Serán de tres, cuatro, cinco o seis unidades habitacionales, en estructuras de tres o cuatro niveles (MIVAH,2020).

En octubre del año 2021, el Ingeniero Felipe Corrales Vargas, desarrolla una propuesta de un modelo BIM como un posible diseño de vivienda para el Modelo VUIS, como su tesis de licenciatura en la Universidad de Costa Rica (Corrales, 2021). Este modelo consiste en una vivienda de tres niveles, con una unidad habitacional por nivel. Dicho proyecto se trata a grandes rasgos de una propuesta arquitectónica, por lo que faltaría el diseño estructural y electromecánico para estar completamente diseñada.

Por lo tanto, este proyecto consiste en un aporte a la propuesta realizada por el Ing. Felipe Corrales. Se va a realizar el análisis y diseño estructural de una vivienda de tres niveles, mediante dos diferentes tipos de materiales constructivos, el primero, en mampostería integral reforzada y el segundo en concreto reforzado. Con base a la información que ha recolectado el MIVAH para la modalidad VUIS, se establece que la estructura se va a ubicar en la localidad de Pavas, San José. Con los diseños estructurales, se pretende crear más información para la modalidad VUIS, a nivel de comportamiento de la estructura, dimensionamiento de elementos y aproximación económica de la inversión requerida para poder ejecutar la obra, tomando en cuenta, únicamente la obra gris.

Para desarrollar este proyecto, se busca el cumplimiento de los siguientes objetivos:

Objetivo General

- ✓ Desarrollar dos propuestas diseño estructural: Una en mampostería integral y otra en concreto reforzado, para una vivienda de interés social de tres niveles, para la Modalidad de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible para el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos.

Objetivos Específicos

- ✓ Analizar y obtener información del modelo arquitectónico de la vivienda por diseñar y del Modelo de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible.
- ✓ Realizar el análisis estructural en mampostería integral reforzada y concreto reforzado mediante el software Etabs.
- ✓ Realizar el diseño estructural de los elementos, para el modelo en mampostería integral y el modelo en concreto reforzado.
- ✓ Analizar y comparar los resultados generados por el análisis y diseño estructural para ambos materiales constructivos.
- ✓ Realizar comparaciones en términos de costo y tiempo, contemplando únicamente los materiales necesarios para alcanzar la obra gris, entre los dos diseños generados.

Si bien, la modalidad de Vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible, engloba temas tanto de accesibilidad económica de las personas de bajos y escasos recursos; posibilidad de acceso al uso de las instalaciones a toda persona que decida habitar una de estas viviendas; ahorro energético, entre otros temas, solo se enfocará en el diseño estructural de la edificación. No se harán modificaciones en la distribución arquitectónica, ni se harán aportes fuera del tema estructural.

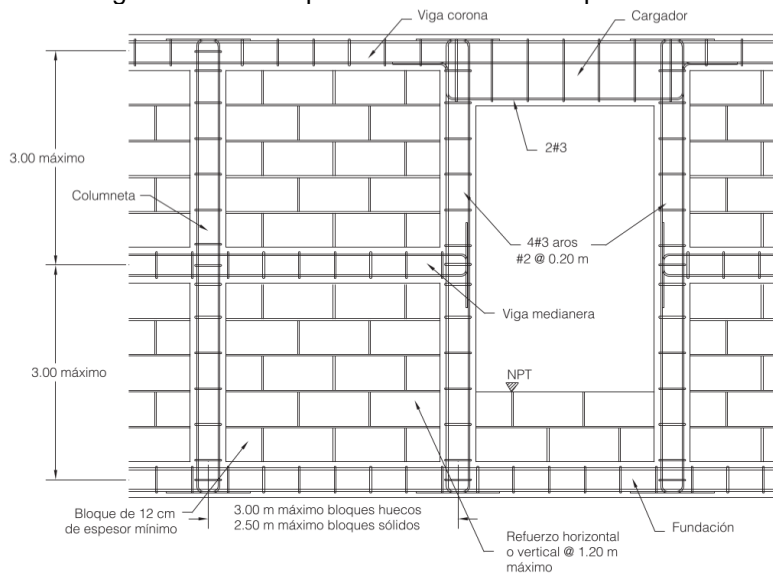
Marco teórico

Generalidades de la mampostería con refuerzo integral

Según Hidalgo (2020), cuando se quiere realizar construcción en mampostería, El CSCR reconoce dos principales sistemas constructivos.

La primera corresponde a la mampostería confinada. Este sistema de construcción, como se muestra en la figura 2, consiste en marcos de concreto reforzado para confiar la mampostería, como lo son columnas y vigas. La función de estos elementos, no aporta resistencia al muro en cortante, sino, que su función principal, es evitar fallas frágiles, luego de que se produce el agrietamiento del elemento muro. Además, este elemento muro no posee refuerzo de acero.

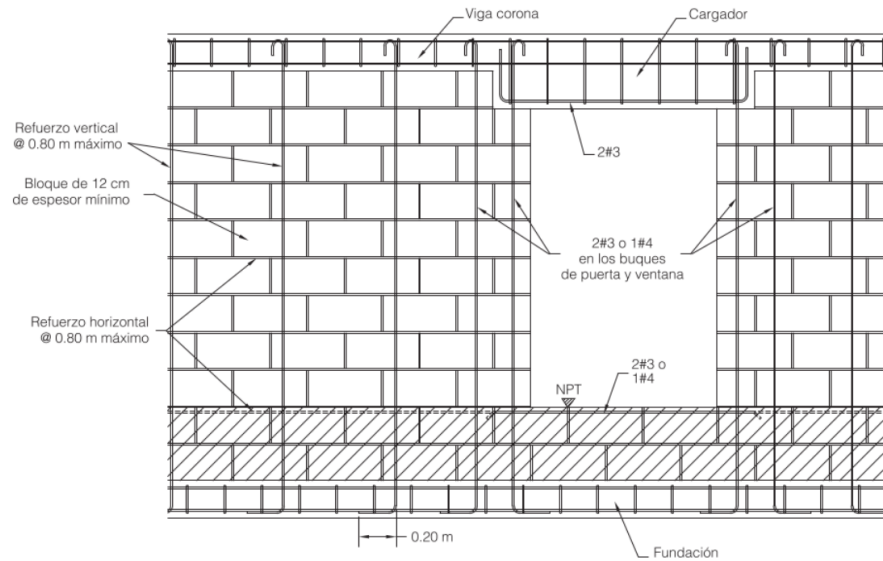
Figura 2. Vista en planta de la edificación por diseñar



Fuente: CFIA (2010)

La segunda manera corresponde a la mampostería integral (figura 3), la cual consiste en que el muro de mampostería no se encuentra con elementos estructurales en sus extremos, será únicamente la construcción de paños de muro de mampostería. La mampostería integral, será diseñada con refuerzo de acero vertical y horizontal, con varillas corrugadas de acero.

Figura 3. Vista en planta de la edificación por diseñar



Fuente: CFIA (2010).

Según menciona el CSCR, para paredes que soportan entresijos, el espesor mínimo deberá ser de 15 cm, además, se menciona, que la mampostería integral, también puede incluir columnetas, para soportar las cargas verticales.

Para el interés de este proyecto, se desarrollará el sistema de mampostería integral.

Resistencias de diseño f'_m

Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en el anexo A.1.1, existen tres tipos de mampostería según su resistencia a la compresión, a los 28 días de edad, los cuales se muestran en el cuadro 1.

El CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), menciona que para edificios de tres niveles y con área mayor a 1000 m², es obligatorio el uso de mampostería clase A. Por lo tanto, para lo que corresponde al predimensionamiento de los elementos, se iniciará la revisión con bloques de mampostería con dimensiones de 15 x 20 x 45 cm para el primer y segundo nivel y bloques de 12 x 20 x 45 cm para el tercer nivel, esto en mampostería de clase A.

Cuadro 1. Resistencia a la compresión f'_m según la clase de mampostería

Mampostería Clase	Fm sobre el área neta kg/cm ²
A	100
B	70
C	60

Fuente: CFIA (2010)

Con respecto a módulo de elasticidad de la mampostería, según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), el módulo de elasticidad para la mampostería se obtiene de la siguiente ecuación:

$$E_m = 750f'_m$$

Donde:

f'_m : Resistencia a la compresión de la mampostería a los 28 días de edad.

Densidad de la mampostería

La densidad de los elementos de mampostería es utilizada en el diseño para obtener pesos de elementos, y con ellos tener conocimiento de cuánto peso propio tiene que soportar la estructura, la cual, además, debe contemplar, además, el peso del acero y el espaciamiento que tiene este en la estructura, así como el tipo de concreto de relleno de las celdas de los bloques que se está utilizando.

En el 2016, el Ing. Alejandro Navas y Carolina Fonseca (Navas & Fonseca, 2017), desarrolló el documento: Densidad de la mampostería de concreto en Costa Rica, el cual tiene como objetivo obtener las densidades promedio de la mampostería en Costa Rica. Se encontró, que los bloques de concreto tienen una densidad que oscila entre 2067 kg/m³ y 2243 kg/m³, en función de su condición de humedad. También, que la densidad de la mampostería se encuentra distribuida en:

- ✓ 90% por el concreto de relleno y los bloques de mampostería.
- ✓ 10% por el acero de refuerzo y mortero de pega
- ✓ El uso de viga bloque genera aumentos de entre 6% y 51% en la densidad de la mampostería.

A continuación, en la figura 4, se muestra un resumen de las densidades, en función del espaciamiento del acero vertical y horizontal, para un sistema con viga bloque.

Figura 4. Densidades según espaciamiento de acero vertical y horizontal en Costa Rica.

Bloque 12 cm (Densidad en kg/m ³)				
Horizontal \ Vertical	@20 cm	@40 cm	@60 cm	@80 cm
@20 cm	2264	2243	2237	2233
@40 cm	2208	1966	1886	1845
@60 cm	2190	1874	1769	1716
@80 cm	2181	1828	1710	1652

Bloque 15 cm (Densidad en kg/m ³)				
Horizontal \ Vertical	@20 cm	@40 cm	@60 cm	@80 cm
@20 cm	2267	2251	2245	2242
@40 cm	2205	1951	1866	1824
@60 cm	2184	1851	1740	1684
@80 cm	2174	1801	1676	1614

Bloque 20 cm (Densidad en kg/m ³)				
Horizontal \ Vertical	@20 cm	@40 cm	@60 cm	@80 cm
@20 cm	2285	2272	2268	2266
@40 cm	2209	1951	1865	1822
@60 cm	2184	1844	1730	1674
@80 cm	2171	1790	1663	1599

Fuente: Navas & Fonseca (2017)

En relación con lo mencionado, para el caso propio del diseño de este proyecto, se utilizarán varios espesores de block, según el diseño estructural lo vaya requiriendo, es por ello, que se procede a escoger una densidad envolvente, para todos los elementos de block, la cual será de 2251 kg/m³.

Generalidades del concreto reforzado

Según las especificaciones del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en la sección 8.1.2, la resistencia mínima para el concreto en compresión debe ser f'_c 210 kg/cm². La edificación construirá mediante vigas, muros. Además, se recalca que la densidad del concreto reforzado a utilizar, será de 2400 kg/m³.

En el cuadro 2, se muestran los tipos de resistencia a la compresión del concreto propuestos para los elementos estructurales:

Cuadro 2. Escogencia de la resistencia a la compresión del concreto para los elementos estructurales

Elemento estructural	Referencia de diseño (kg/cm ²)
Losa de 5cm colada en sitio	210
Vigas	210
Muros	210

Fuente: Elaboración propia.

Entre las propiedades necesarias para el modelado de la estructura de concreto reforzado, se encuentra el módulo de elasticidad. Se muestra a continuación, la fórmula para su cálculo.

$$E_c = 15100 \sqrt{f'_c}$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad

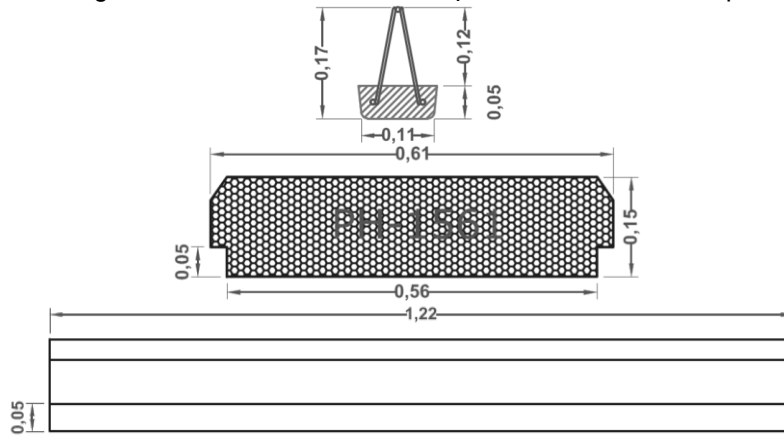
f'_c : Resistencia del compresión

Losa propuesta para el diseño de ambos modelos

Se propone utilizar una losa aligerada prefabricada con un espesor de 20cm, de la empresa PH Prefabricados (s. f.), la cual se utilizará para ambos modelos.

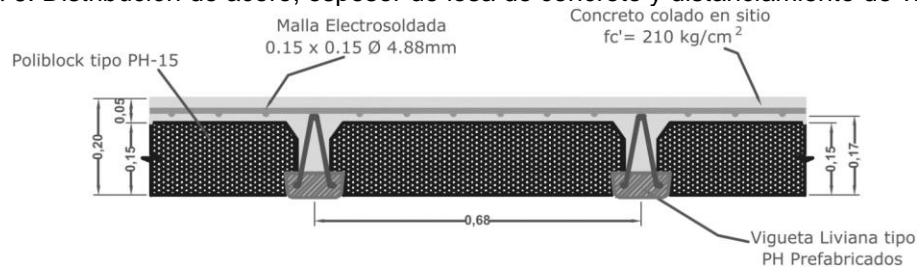
Este sistema utiliza bloques de poliuretano, en la figura 5 y 6, se muestran las dimensiones de los elementos que se utilizarán para este sistema de entrepiso, el cual requiere una losa de 5cm colada en sitio, un concreto con un f'_c de 210kg/cm², con malla electrosoldada de 15cmx15cm con espesor de 4.88mm.

Figura 5. Características geométricas de los elementos prefabricados de la empresa PH Prefabricados.



Fuente: Entrepisos para casas prefabricadas (s. f.)

Figura 6. Distribución de acero, espesor de losa de concreto y distanciamiento de viguetas



Fuente: Entrepisos para casas prefabricadas (s. f.)

Sistemas estructurales

Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), los sistemas estructurales se clasifican según sus propiedades geométricas, física y estructurales, y se encuentra dividido en cinco principales grupos, que se especifican a continuación:

- ✓ Tipo marco: Este sistema sismorresistente, está constituido vigas y columnas de concreto, acero o madera.
- ✓ Tipo muro: Para el caso de la estructura tipo muro, se define por estar constituido por marcos arriostrados, muros de concreto, mampostería o acero.
- ✓ Tipo dual: El sistema estructural tipo dual, está constituido por la combinación por la estructura tipo marco (de concreto, acero o madera) y muros (de concreto, mampostería, marco arriostrado). Para este sistema, es importante recalcar que se debe calcular la sumatoria de las fuerzas cortantes en las columnas, y esta debe ser mayor o igual al 25% de la fuerza cortante total, obtenida para ese nivel. De no cumplirse esta condición, se clasifica la estructura como tipo muro y los marcos no se deben de tomar en consideración como parte del sistema sismorresistente de la edificación.
- ✓ Tipo voladizo: Esta categoría de sistema estructural, se confirma por muros o columnas que actúan como voladizos aislados.
- ✓ Tipo otros: Dentro de esta categoría, se debe de iniciar cualquier estructura que no se clasifique como tipo marco, dual, muro o voladizo.

Para el desarrollo de este proyecto, el sistema estructural empleado se clasifica como tipo muro, proponiendo para el primer diseño muros de concreto reforzado y para el otro diseño muros de mampostería integral reforzada.

Modelado de la estructura en el Software Etabs

Para el modelado de la estructura, se va a utilizar el software Etabs, el cual es un programa computacional que se utiliza entre otras cosas, para el análisis estructural de los edificios.

Este programa, permite analizar los efectos de las cargas verticales y laterales a las cuales está sometida la estructura, que para el caso de este proyecto, solo se analizará las cargas laterales producidas por la carga sísmica. El Software Etabs, permite realizar el diseño por el método estático o dinámico, según los requerimientos del diseñador, siendo el método dinámico, el cual se empleará para este proyecto

De manera general, luego de ingresar al programa las propiedades de los materiales, dimensiones de los elementos estructurales, modelado de la estructura según las características arquitectónicas y la colocación de las cargas a las cuales está sometida la edificación, se procede a extraer del software las solicitudes internas, con las cuales van a ser utilizadas para el diseño de los elementos sismorresistentes.

El software Etabs utiliza el método de elementos finitos (MEF), el cual consiste en discretizar la estructura, es decir dividirla en elementos no diferenciales. Estas secciones pequeñas, van a estar unidas entre si por medio de puntos llamados nodos. (Vázquez & López, 2001).

Para efectuar el método de elementos finitos en Etabs, es fundamental poder asignar que tan densa se quiere realizar la discretización de la estructura. Se debe encontrar un balance entre que tan denso se quiere realizar el seccionamiento de los elementos de manera que se pueda obtener resultados cada vez más exactos versus los recursos computacionales consumido. Entre mayor seccionamiento de la estructura, más exactos van a ser los resultados del análisis, pero se consumirá mayor cantidad de recurso computacional. La discretización de los elementos tipo muro, serán elementos cuadrados, cuyo lado L se asignará mediante la fórmula $L \leq 2t$, siendo t el espesor muro, de este modo, se obtendrán resultados confiables con un consumo computacional no excesivo (Peralta, 2018).

Análisis Estructural

El análisis estructural permite definir el comportamiento de los elementos estructurales, como muros, columnas y vigas, ante las solicitudes, las cuales son cargas a las que se someten las estructuras según los requerimientos del diseñador, como es el caso de la carga de viento y cargas sísmicas, así como las cargas específicamente de las estructuras como el peso propio y las cargas dependientes del uso que se le asignará a la estructura. Además, este análisis determina las dimensiones de los elementos que son necesarias, según el material que sea escogido.

Mediante el análisis estructural, se logra obtener los esfuerzos, desplazamientos y las reacciones en los apoyos. Los cuales son necesarios para iniciar el diseño estructural de los elementos.

Método estático

Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), este método de análisis consiste, en tomar las fuerzas horizontales, generadas por el efecto del sismo, en ambas direcciones ortogonales. Supone que toda la masa participativa de la estructura se encuentra en el primer modo de vibración. El valor de estas fuerzas horizontales, son aplicadas en cada nivel de entrepiso, y son proporcionales a su altura, además, se obtiene un cortante basal, mediante el producto del coeficiente sísmico en cada dirección ortogonal, por el peso total de la estructura.

El análisis estático, se puede aplicar, cuando se cumpla con las siguientes condiciones:

- ✓ Edificaciones regulares en planta
- ✓ Edificaciones regulares en altura
- ✓ Edificaciones no mayores a 5 niveles ni altura total superior a 20 metros

Método dinámico

El método dinámico, también conocido como, análisis modal espectral, consiste en el cálculo de los modos de vibración de la estructura, cada modo con su respectivo periodo de oscilación. Para poder realizar un análisis modal, se deben de tomar las siguientes consideraciones dadas por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016):

- ✓ El número mínimo de modos de vibración de la estructura debe ser tal, que la suma de la masa participativa de la edificación sea por lo menos de 90%, para todas las cargas en cada dirección ortogonal.
- ✓ La manera de unir todos los modos de oscilación con periodos de vibración muy similares entre sí, para estructuras irregulares en planta, es mediante el método de la Combinación Cuadrática Completa (CQC)
- ✓ Para el caso de estructuras regulares, con periodos con baja proximidad entre sí, se debe utilizar el método de la Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS)

Métodos de Análisis: Elástico e inelástico

Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), existen dos métodos de análisis, el método estático y el dinámico, ambos métodos permiten trabajar en el rango elástico de la estructura, y con ello obtener desplazamientos fuerzas internas en el rango elástico, sin embargo, dichos resultados se deben transformar para trabajar en el rango inelástico de la estructura.

Si se desea, con el fin de diseñar o verificar resultados, es posible utilizar métodos alternos de análisis inelásticos, como es el caso del método de capacidad espectral o el método no lineal dinámico de respuesta en el tiempo.

Revisión de Derivas con el CSCR

Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), cuando se realice un análisis estático o dinámico, para obtener los desplazamientos horizontales en cada nivel de la estructura, se deben efectuar mediante las siguientes formulas, las cuales consideran las deformaciones, en el rango inelástico, necesarias para absorber y disipar energía.

$$\begin{aligned}\delta_i &= \alpha \cdot \mu \cdot SR \cdot \delta_i^e \\ \Delta_i &= \mu \cdot SR \cdot \Delta_i^e\end{aligned}$$

Donde:

δ_i : Desplazamiento inelástico

Δ_i : Deriva inelástica o desplazamiento inelástico relativo horizontal entre el nivel i y el nivel adyacente inferior.

α : Factor de desplazamiento inelástico

μ : Ductilidad global asignada utilizada

SR: Factor de sobrerresistencia

Δ_i^e, δ_i^e : Desplazamiento elástico absoluto del nivel i y derivaelástica entre el nivel i y el nivel adyacente inferior respectivamente inferior

Con los desplazamientos inelásticos, se procede a obtener las derivas inelásticas. Dicho resultado, debe compararse con los datos presentados en la tabla 7.2 del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en donde se muestra los límites establecidos, dicha tabla se presenta a continuación.

Figura 7. Derivas inelásticas, permisibles en Costa Rica.

Sistema estructural (según artículo 4.2)	Edificaciones A y C (Limitación especial según artículo 4.1)	Edificaciones B, D y E (Limitación normal según artículo 4.1)
tipo marco	0.0125	0.020
tipo dual	0.0125	0.018
tipo muro	0.0100	0.010
tipo voladizo	0.0125	0.020
tipo otros	0.0065	0.010

Fuente: CSCR 2010/14 (CFIA, 2016)

Diafragma rígido y flexible

Según el ACI 318-19 (2022), los diafragmas son elementos estructurales (como el caso de pisos y cubiertas), y es el encargado de recibir las fuerzas laterales y distribuirlas desde el punto de aplicación a los demás elementos sismorresistentes verticales.

El sistema de entrepiso suele clasificarse como diafragma rígido o flexible. Comúnmente, las losas de concreto reforzado, se clasifican como diafragmas rígidos. Se encuentra que, al utilizar diafragma rígido, se tendrán periodos de vibración menores, en comparación al diafragma flexible. Por otro lado, al utilizar sistemas de diafragma flexible, se tienen aspectos beneficiosos, tal como, si existe asimetrías importantes en rigideces o masas, la estructura con diafragma rígido experimentará un acoplamiento modal importante, lo que produce movimientos torsionales considerables y utilizando diafragma flexible, se dará una reducción de este acoplamiento por torsión (Tena et al., 2013).

Teoría de rotura: Esfuerzo-deformación

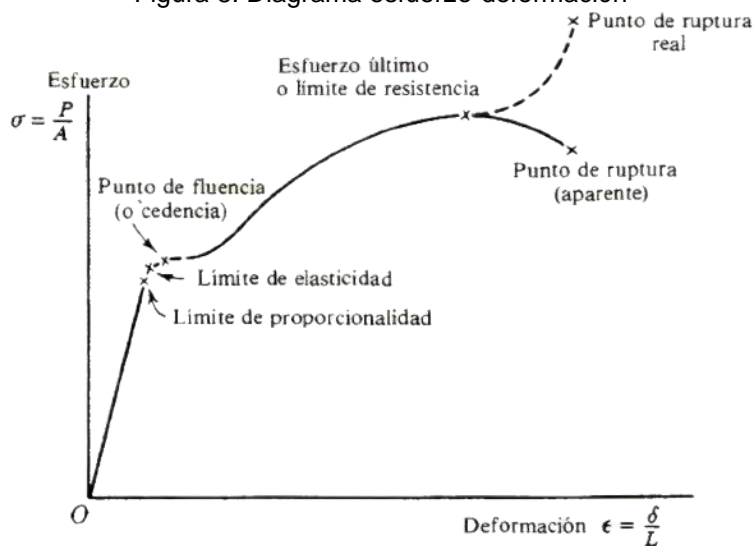
Al realizar un diseño estructural, es indispensable poder comprender los conceptos de ductilidad y fragilidad, y cómo son las fallas de los elementos bajo ambos tipos de rotura.

La ductilidad en los materiales consiste, en la capacidad de un material de absorber energía por medio de deformaciones plásticas, y su falla se da de manera controlada, por otro lado, en el caso de la fragilidad, la falla se da de manera repentina, no se observa un proceso de falla progresivo, falla sin previo aviso (García, M., & Monasterio, N, 2018).

La teoría de rotura se representa mediante la gráfica de esfuerzo-deformación (figura 8). Dicha gráfica, describe el comportamiento de un material ante las deformaciones generadas debido a los esfuerzos aplicados.

Al ir aumentando el valor del esfuerzo, se encuentra el primer punto de la curva, llamado límite de proporcionalidad, en donde el material, puede recuperar su estado inicial, sin sufrir deformaciones permanentes, al sobre pasar este valor hasta llegar al límite de elasticidad, se entra la zona de elasticidad no proporcional, siendo nulas las deformaciones permanentes, a partir de este punto, el material no podrá recuperar su estado inicial. Posteriormente, se encuentra el punto de fluencia, en donde las deformaciones aumentan considerablemente sin necesidad de aumentar los esfuerzos. Luego, se llega hasta el esfuerzo último, que será la capacidad máxima del material a resistir esfuerzos. Finalmente, las deformaciones aumentan hasta llegar al punto de ruptura (Ortiz, 2007).

Figura 8. Diagrama esfuerzo-deformación



Fuente: Pytel y Singer (2008)

Regularidad en altura y en planta

Para poder establecer la regularidad en altura de una estructura, según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), es necesario que se cumplan 3 condiciones:

- ✓ Todos los elementos verticales sismorresistentes son continuos desde la cimentación hasta el último nivel, sin discontinuidades ni desfases.
- ✓ Todos los diagramas, deben ser rígidos, excepto el del techo que podría ser flexible
- ✓ La capacidad en cortante de cada piso en ambas direcciones horizontales es mayor que la capacidad del piso superior inmediato.

Para el cálculo de la regularidad en planta, según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), es necesario poder obtener las excentricidades de la estructura, y esto se obtiene mediante el centro de masa y el centro de rigidez.

Primeramente, se calcula el centro de masa, el cual se define, como el punto geométrico en planta, donde será aplicada, la fuerza sísmica en cada nivel. El cálculo del centro de masa se efectúa mediante la siguiente formula.

$$CM_x = \frac{\sum w_i \cdot Dist_{xi}}{\sum w_i}$$

$$CM_y = \frac{\sum w_i \cdot Dist_{yi}}{\sum w_i}$$

Donde:

w_i : Masa del elemento

$Dist_{xi}$: Distancia desde el centroide del elemento al eje de referencia en X

$Dist_{yi}$: Distancia desde el centroide del elemento al eje de referencia en Y

Posteriormente, se calcula el centro de rigidez, el cual se define como el inverso de la deflexión total de la estructura, la cual, a su vez, está en función del momento y el cortante al cual está siendo sometida la estructura. En el centro de masa, se aplica la fuerza sísmica, pero en el centro de rigidez, la estructura percibe la carga.

Según indica Navarro (2016), dependiendo de las condiciones de apoyo, la estructura puede considerarse en voladizo o fijas en ambos extremos. Al considerarse la estructura en voladizo, la rigidez se

puede obtener de dos maneras. La primera manera en obtener la rigidez de un elemento de pared o columneta, con apoyo fijo en la base y libre en el nivel superior, es por medio del valor inverso del desplazamiento horizontal del elemento.

$$\Delta_c = 0.4\left(\frac{h}{d}\right)^3 + 0.3\left(\frac{h}{d}\right)$$

$$R_c = 1/\Delta_c$$

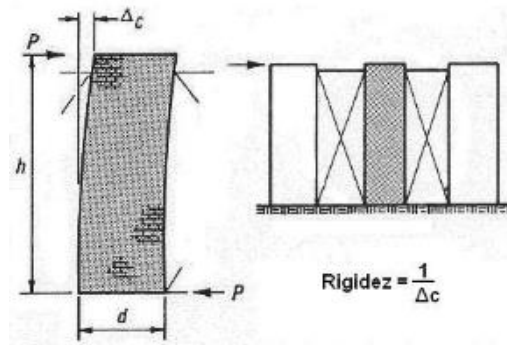
Donde:

h: Altura del muro

d: Ancho del muro

Δ_c : Desplazamiento del muro

Figura 9. Rigidez de un elemento de pared o columneta, con apoyo fijo en la base y libre en el nivel superior



Fuente: Navarro (2016)

La segunda manera, que serían columnetas o paredes con apoyos fijo en la base y en el nivel superior, la rigidez se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta_f = 0.1\left(\frac{h}{d}\right)^3 + 0.3\left(\frac{h}{d}\right)$$

$$R_c = 1/\Delta_c$$

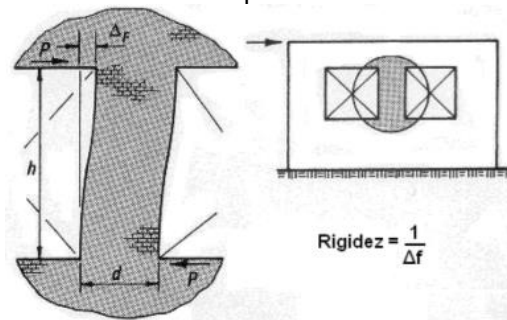
Donde:

h: Altura del muro

d: Ancho del muro

Δ_c : Desplazamiento del muro

Figura 10. Rigidez de un elemento tipo columnetas o paredes con apoyos fijo en la base y en el nivel superior

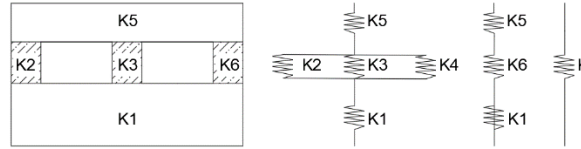


Fuente: Navarro (2016)

En la figura 11, se muestra un ejemplo, de las paredes de las estructuras que cuentan con buques de ventanas y de puertas. Para estas paredes, la rigidez total se calcula de la siguiente manera:

- ✓ Se suman las rigideces para los elementos que se encuentran en paralelo
- ✓ Se suman las deflexiones para los elementos que se encuentran en paralelo

Figura 11. Rigidez global de un elemento pared con buques.



Fuente: Elaboración propia

Para obtener el centro de rigidez, de cada nivel, se realiza la siguiente formula (CFIA, 2010):

$$CR_y = \frac{\sum x_i \cdot R_{xi}}{\sum R_{xi}}$$

$$CR_x = \frac{\sum y_i \cdot R_{yi}}{\sum R_{yi}}$$

Donde:

R_{xi} : Rigidez de cada elemento en la dirección x

R_{yi} : Rigidez de cada elemento en la dirección y

x_i : Distancia desde el centroide del elemento al eje de referencia en X

y_i : Distancia desde el centroide del elemento al eje de referencia en Y

A partir de obtener los centros de masa y de rigidez de la estructura, es posible obtener las excentricidades, y con esto, clasificar la estructura según el cuadro 3.

Según la sección 4.3.2 del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), es necesario determinar la excentricidad de la estructura para asignar una ductilidad global de la estructura. Esto se realiza mediante la resta en valor absoluto, del centro de masa y el centro de rigidez, como se muestra a continuación.

$$e_x = |CM_x - CR_x|$$

$$e_y = |CM_y - CR_y|$$

Donde:

e_x : componente de la excentricidad en la dirección x

e_y : componente de la excentricidad en la dirección y

Con el resultado de la excentricidad, se puede clasificar la regularidad en planta de la estructura, según la sección 4.3.2 del CSCR

Cuadro 3. Criterios para la clasificación de la regularidad en planta de la estructura.

Regular en planta	Irregular moderada	Irregular grave
$e_x \leq 0.05 \cdot D_x$ $e_y \leq 0.05 \cdot D_y$	$0.05 \cdot D_x \leq e_x < 0.25 \cdot D_x$ $0.05 \cdot D_y \leq e_y < 0.25 \cdot D_y$	$e_x > 0.25 \cdot D_x$ $e_y > 0.25 \cdot D_y$
Donde:		
D_x : Dimensión en planta de la dirección en x de la estructura		
D_y : Dimensión en planta de la dirección en y de la estructura		

Fuente. Elaboración propia.

Es fundamental para este proyecto, tomar en consideración, la sección 4.4.3 para la asignación de la ductilidad global asignada, en la nota b, del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en donde se señala lo siguiente:

“Los edificios con irregularidades graves, según el inciso 4.3.4, tienen una ductilidad global asignada de 1.0, salvo que el profesional responsable del diseño justifique un valor mayor. En ningún caso la ductilidad global asignada puede ser mayor que la correspondiente a estructuras de irregularidad moderada. (CSCR, 2010).”

En este caso, el edificio que se diseñará se clasifica como irregular grave, es por ello, que se selecciona, una ductilidad global asignada de 1.

Combinaciones de carga última de diseño dadas por el CSCR

Según lo menciona el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), cada elemento de la estructura debe tener la capacidad de soportar las siguientes combinaciones de carga:

$$\begin{aligned} CU: 1.4CP \\ CU: 1.2CP + 1.6f_R CT + 1.6CE \\ CU: 0.5CP + f_1 f_R CT \pm CS + CE \\ CU: 0.95CP \pm CS + CE \end{aligned}$$

En donde:

CU: Carga última de diseño.

CP: Carga permanente

CT: carga temporal, sin la reducción indicada en el artículo 6.3

CS: carga sísmica

CE: carga por empuje

El análisis que se ejecutará en este proyecto será un análisis modal espectral. Según el ASCI (2017), al utilizar este análisis para determinar los desplazamientos de la estructura, estos se efectuarán de manera tal que, habrá una excitación simultánea del modelo al 100% en la dirección de análisis y 30% en la dirección perpendicular.

Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD)

La metodología por resistencia: Load and Resistance Factor Design (LRDF), según Uribe (2022), parte de la premisa, de que, existe un margen entre la resistencia de los elementos estructurales y los esfuerzos causado por la carga de trabajo, para esto, no hay un valor sobre el margen de seguridad disponible, por lo que, esta adopta como referencia, el estado límite de falla, y fija la relación que debe existir entre la carga última y la de trabajo.

La metodología LRFD, aplica un factor de seguridad a las cargas, mayoradas con Coeficientes de carga. Algunas ventajas de esta metodología son:

- ✓ La metodología LRDF, considera el miembro completo, y no simplemente el esfuerzo local, lo cual hace que sea un método más realista.
- ✓ Este método, obliga a tener en cuenta el intervalo entre la carga de servicio y la falla. Como hay efectos que se agravan conforme aumenta la carga, existen otros que pierden importancia, por lo tanto, al utilizar coeficientes de carga, es posible tener dimensionamientos más razonables.

La ecuación base, para la metodología LRFD, establece que, la resistencia de diseño será obtenida mediante la resistencia nominal, multiplicada por el factor de reducción, con el fin de prever posibles inexactitudes con respecto a medidas, resistencia del concreto inadecuada, entre otras consideraciones que pueden ocasionar variaciones en los resultados, La metodología LRDF, se rige por la fórmula siguiente:

$$\phi R_n \geq R_u$$

Donde:

ϕ : Factor de reducción de resistencia o factor de resistencia

R_n : Resistencia nominal de los materiales

R_u : Resistencia última requerida

Los factores de reducción de carga se encuentran ya establecidos, los cuales se muestran a continuación:

Figura 12. Factores de reducción de resistencia nominal para mampostería.

Elemento mecánico	Mampostería clase A	Mampostería clase B
Flexión y carga axial	$\phi = 0.80 - \frac{1.5P_u}{A_g f'_m}$ $0.60 \leq \phi \leq 0.80$	$\phi = 0.75 - \frac{1.5P_u}{A_g f'_m}$ $0.55 \leq \phi \leq 0.75$
Cortante y torsión	$\phi = 0.60$	$\phi = 0.55$
Longitud de desarrollo y traslapes	$\phi = 0.80$	$\phi = 0.75$
Aplastamiento	$\phi = 0.60$	$\phi = 0.50$

Fuente: CFIA (2010)

Cuadro 4. Factores de reducción de resistencia nominal para concreto estructural.

Secciones controladas por tracción	0.90
Tracción axial	0.90
Secciones controladas por compresión:	
• Elementos con refuerzo transversal de espiral	0.75
• Otros elementos	0.65
Cortante y torsión	0.75
Aplastamiento	0.65

Fuente: CFIA (2010)

Diagrama de interacción

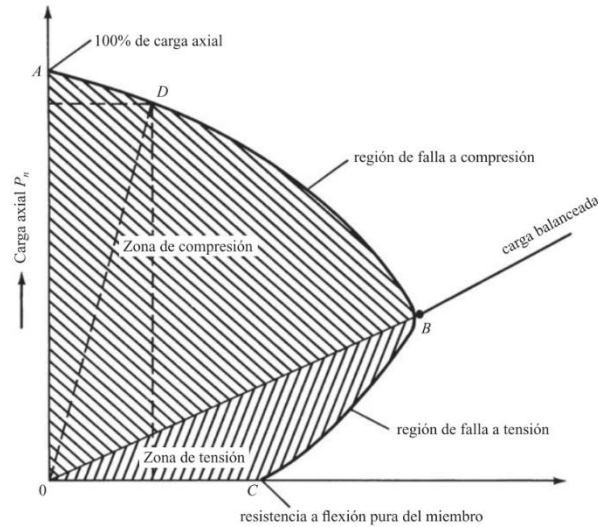
Este diagrama de interacción es útil para elementos con cargas axiales y de momento variables, en donde, cualquier carga cualquier combinación de carga que se encuentre en la parte interna de la curva, cumple satisfactoriamente, mientras que si una combinación de carga está fuera de la curva, representa una falla.

Según McCormac y Brown (2017) en la figura 16, se muestra el diagrama de interacción. Si un elemento se carga únicamente con carga axial hasta llegar a la falla, llegaría al punto A, mientras que, si el miembro se somete solo a momento flexionante hasta la falla, llegaría al punto C. Al desplazarse por la curva, se puede observar que la capacidad por carga axial disminuye conforme aumenta el momento.

El punto B, representa la carga balanceada, en donde ocurre la falla por compresión y la fluencia del acero en tensión. Al desplazarse por la curva, en el intervalo de A-B, representa la zona donde predomina la falla a tensión, mientras que el desplazamiento en el intervalo B-C, representa la zona donde el elemento falla por tensión, lo cual es lo que se busca normalmente en los diseños, que los elementos estructurales, se encuentren en la parte baja, así se obtienen secciones controladas por tracción, para que se dé una falla dúctil,

Al definir las dimensiones en planta de un muro y las cuantías de acero de diseño, se puede generar un diagrama de interacción, y todas las cargas que actúan en el plano y en el muro, tienen que estar dentro del diagrama de interacción.

Figura 13. Diagrama de interacción



Fuente: McCormac y Brown (2017)

Muros portantes y no portantes

Según McCormac y Brown (2017), los muros no portantes, son aquellos que únicamente deben de soportar las cargas producidas por su propio peso, más una posible solicitación fuera del plano, por otro lado, los muros portantes, no solo deben de soportar su propio peso, sino que, gracias a su considerable rigidez en su plano, dan un gran aporte para resistir las fuerzas dadas por el sismo.

Según Harmsen (2002), los muros portantes no cuentan con restricciones en dimensiones de espesores mínimos, pero los muros no portantes, sí cuentan con restricción respecto a su espesor mínimo. Este espesor mínimo deberá estar entre 10 cm o 1/30 de la menor distancia entre apoyos laterales.

Por lo tanto, para consideraciones de este trabajo, se tomará este mínimo espesor de 10 cm, también, para los muros portantes, para el primer dimensionamiento de la estructura en concreto reforzado, para el caso de la mampostería integral, deberá ser el espesor propio de la mampostería escogida.

Muros según su esbeltez

La clasificación por esbeltez es de las más importantes, debido a que es la esbeltez, un componente fundamental en que se refiere a la resistencia del muro.

Según Bondarenko y García (2012), se dividen en muros estructurales alto y bajos.

Para los muros estructurales bajos, se dice que debe cumplirse que la altura del muro h_w entre la longitud mayor L_w de la sección transversal, sea mayor a 2, como se muestra en la formula #. Generalmente, los muros bajos, solo transmiten cargas de gravedad, es por ello, que su aporte para la resistencia al cortante es relativamente poca. También, que su brazo de palanca es bastante considerable, por lo que estos elementos se ven poco afectados por la flexión ejercida por cargas laterales. Se considera, que este tipo de muro, normalmente están regidos por la carga al cortante.

$$h_w/L_w \leq 2$$

Caso contrario, cuando los elementos de muros tienen una relación de h_w entre L_w mayor a 2, se clasifica como muro alto. Estos elementos transmiten grandes cantidades de cargas gravitacionales, lo que otorga, una mayor resistencia al corte. Por el contrario, a los muros bajos, estos muros se ven muy afectados

por las cargas a flexión debido a que su brazo de palanca interno es muy pequeño, Por lo tanto, se señala, que los muros estructurales altos, son controlados por el esfuerzo a flexión.

$$h_w/L_w > 2$$

Diseño por flexión en vigas de mampostería

Para iniciar con el diseño de vigas, se debe calcular el momento de agrietamiento M_{cr} , esto para determinar si rige el momento último de diseño M_u o el momento de agrietamiento M_{cr} , mediante las siguientes fórmulas.

$$S_e = \frac{bh^2}{6}$$

$$f_r = 1.06\sqrt{f'_m}$$

$$1.3M_r = 1.3 S_e f_r$$

Donde:

S_e : Módulo de sección

h : Altura de viga

f_r : Módulo de ruptura

f'_m : Resistencia de la mampostería a la compresión

Posteriormente, se deben tener en cuenta los valores de cuantía de acero, para asegurar que cumpla con los requerimientos mínimos y máximos.

$$A_{s \min} < A_{s \text{ req}} < A_{s \max}$$

Se tiene que, para el diseño por flexión, se debe calcular primero el acero requerido para soportar las cargas, mediante las siguientes fórmulas:

$$\alpha = \frac{M_u}{bd^2 f'_m \phi}$$

$$\omega = \frac{1.695 - \sqrt{1.695^2 - 4(\alpha/0.59)}}{2}$$

$$\rho = \omega \frac{f'_m}{f_y}$$

$$A_{s \text{ req}} = bd\rho$$

Donde:

ρ : Cuantía de acero

M_u : Momento último de diseño

b : Base de la viga

d : Profundidad efectiva

f'_m : Resistencia de la mampostería a la compresión

ϕ : Reducción de capacidad a flexión

f_y : Fluencia del acero

Para el acero mínimo $A_{s \text{ min}}$ se utiliza la menor de las siguientes ecuaciones:

$$A_{s \text{ min}} = \frac{14bd}{f_y}$$
$$A_{s \text{ min}} = 1.33A_{s \text{ REQ}}$$

Donde:

f_y : Fluencia del acero
 b : Base de la viga
 d : Profundidad efectiva
 $A_{s \text{ REQ}}$: Acero requerido

Para el cálculo del acero máximo $A_{s \text{ MAX}}$, se debe calcular la cuantía de acero balanceada ρ_b . Se debe tomar la mitad de la cuantía balanceada, esto como un factor de seguridad, de manera que el acero finalmente propuesto, sea menor a la cantidad de acero que produciría una falla sobre reforzada.

$$\rho_b = \frac{\beta_1 f'_m}{f_y} \left(\frac{5100}{6000 + f_y} \right)$$
$$A_{s \text{ MAX}} = 0.5\rho_b bd$$

Donde:

β_1 : Coeficiente de reducción de profundidad
 f'_m : Resistencia de la mampostería a la compresión
 f_y : Fluencia del acero
 b : Base de la viga
 d : Profundidad efectiva

Posterior a la escogencia del acero, se calcula el momento nominal final, de modo que se pueda comparar que se cumpla $M_u < \phi M_n$:

$$a = \frac{A_{st} f_y}{0.85 f'_m b}$$
$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Donde:

a : Profundidad del bloque de compresión
 ϕ : Reducción de capacidad a flexión
 A_{st} : Acero en tensión
 f_y : Fluencia del acero
 d : Profundidad efectiva

Diseño por cortante en vigas de mampostería

Se debe calcular la contribución de la resistencia a cortante de la mampostería, para esto se utiliza la fórmula:

$$V_m = C_d A_e \sqrt{f'_m}$$

donde $V_{m \text{ MAX}} = 14.5 C_d A_e$

Donde:

V_m : Resistencia al cortante aportado por la mampostería
 $V_{m \text{ máx}}$: Cortante aportado por la mampostería
 A_e : Área efectiva
 f'_m : Resistencia de la mampostería a la compresión

Se debe tener en cuenta los siguientes valores para el cortante nominal máximo:

Cuadro 5. Valores de C_d y máximos de V_n máx

Valores de C_d y V_n máximos		
M/Vd	C_d	V_n máx
≤ 0.25	0.64	$1.6A_e\sqrt{f'_m}$
≥ 1	0.32	$1.07A_e\sqrt{f'_m}$

Fuente: CSCR 2010/14 (CFIA, 2016)

Cuando el valor de $V_m > V_u$, significa que no es necesario colocar acero transversal, y por lo tanto, se debe colocar el acero mínimo, en caso contrario, el refuerzo transversal V_s se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_m$$

Donde:

V_s : Resistencia al cortante aportado por el acero

V_u : Cortante último de diseño

V_m : Resistencia al cortante aportado por la Mampostería

ϕ : Reducción de capacidad a cortante

Luego se calcula el acero transversal A_{vh} requerido, mediante:

$$A_{vh} = \frac{V_s s}{f_y d}$$

Donde:

A_{vh} : Acero horizontal

s: Separación del acero horizontal

f_y : Fluencia del acero

d: Profundidad efectiva

El valor del cortante nominal V_n final será la suma de $V_s + V_m$, donde este cortante nominal no deberá exceder el valor indicado en el cuadro 5.

Diseño por flexocompresión en muros de mampostería

La cuantía mínima de acero en mampostería, para acero longitudinal y transversal, se calcula según:

$$A_{s \text{ MIN}} \text{ en cada dirección} = 0.0007 \cdot b \cdot t$$

$$A_{s \text{ MIN}} \text{ total} = 0.002 \cdot b \cdot t$$

Donde:

b: 100 cm (diseño por metro)

t: Espesor de muro

Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), la separación máxima del acero longitudinal es de 80cm y la separación máxima transversal es de 60cm.

El diseño a flexocompresión, se debe a que algunos elementos estructurales, son sometidos a fuerzas de flexión y compresión de manera simultánea. En el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en la sección 9.7.6, se muestra una manera alternativa para el diseño a flexocompresión de muros

Se calcula el momento de agrietamiento M_{cr} , suponiendo el bloque totalmente relleno, esto para poder corroborar si el momento de agrietamiento o el momento último de diseño, es el que rige. Además, para muros cuyo tipo de comportamiento es a flexión, se debe diseñar para un momento de agrietamiento de $1.8M_{cr}$.

Con:

$$M_{cr} = S_e f_r$$

$$S_e = \frac{bh^2}{6}$$

$$f_r = 1.06\sqrt{f'_m}$$

Donde:
 S_e : Módulo de sección
 h : Altura de viga
 f_r : Módulo de ruptura
 f'_m : Resistencia de la mampotería a la compresión

Posteriormente, se propone una cantidad de acero, y con esto, se procede a calcular, la profundidad del bloque de compresión:

$$a = \frac{A_s f_y}{t L_w f'_m}$$

Donde:
 A_s : Acero propuesto
 f_y : Fluencia del acero
 t : Espesor del muro
 L_w : Longitud del muro
 f'_m : Resistencia de la mampotería a la compresión

Luego se calcula el valor del Coeficiente de reducción de profundidad β :

$$\beta = \frac{P_u}{t L_w f'_m}$$

Donde:
 P_u : Carga axial de diseño
 t : Espesor del muro
 L_w : Longitud del muro
 f'_m : Resistencia de la mampotería a la compresión

Luego, se procede a calcular donde se ubica el eje neutro "c" a partir de la fibra extrema en compresión, despejando el valor de c de la siguiente ecuación:

$$\frac{c}{L_w} = \frac{a + \beta}{2\alpha + 0.72}$$

Donde:
 a : Profundidad del bloque de compresión
 β : Coeficiente de reducción de profundidad
 L_w : Longitud del muro

Posteriormente, se calcula el momento nominal M_n , de modo que se cumpla con $\phi M_n \leq M_u$:

$$M_n = \frac{A_s f_y l_w}{2} \left(1 + \frac{P_n}{A_s f_y}\right) \left(1 - \frac{c}{l_w}\right)$$

Donde:

A_s : Acero propuesto

f_y : Fluencia del acero

L_w : Longitud del muro

P_u : Carga axial de diseño

c : Eje neutro

ϕ : Factor de reducción de resistencia a cortante

Diseño por cortante en muros de mampostería

Para el cálculo por cortante en muros, se debe verificar el cortante máximo por servicio V_{ser} , de la siguiente manera:

$$V_u \text{ diseño} = SR V_u$$

Donde:

SR: Factor de sobre resistencia

V_u : Cortante de diseño

El cálculo del factor de sobre resistencia, según la sección 9.7.5 del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), se obtiene del resultado del valor del FED correspondiente al valor de ductilidad global igual a 1 y el valor del FED de la ductilidad global utilizada en el diseño. Debido a que, en este caso, la ductilidad global asignada, es de 1, se asigna un factor de sobre resistencia de 1.

Se debe realizar la verificación por cortante, en donde se asegure el cumplimiento de:

$$\phi V_n \geq V_u \text{ DISEÑO}$$

Donde:

ϕ : Factor de reducción de resistencia a cortante

V_n : Cortante nominal calculado

$V_u \text{ DISEÑO}$: Cortante de

La resistencia al cortante nominal, se calcula mediante:

$$\phi V_n = \phi (V_m + V_s)$$

Donde:

V_m : Resistencia al cortante aportado por la mampostería

V_s : Resistencia al cortante aportado por el acero

ϕ : Factor de reducción de resistencia a cortante

Esta resistencia se compone por el cortante V_m que se refiere a la resistencia de la mampostería y la contribución del acero a la resistencia al cortante V_s ,

$$V_m = \left(1 - 0.44 \left(\frac{M_u}{V_u d} \right) \sqrt{f'_m} + 0.25 \left(\frac{P_u}{A_g} \right) \right) db_w$$

Donde:

M_u : Momento último de diseño

V_u : Cortante último de diseño

d : Profundidad efectiva

f'_m : Resistencia de la mampostería a la compresión

P_u : Carga axial última de diseño

A_g : Área bruta

b_w : Espesor del muro

Posterior a esto, se calcula la capacidad al cortante resistida por el acero.

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_m$$

Donde:

V_s : Resistencia al cortante aportado por el acero

V_u : Cortante último de diseño

V_m : Resistencia al cortante aportado por la Mampostería

ϕ : Reducción de capacidad a cortante

Cuando el valor de V_m sobrepasa al valor de V_u diseño, es debido a que la capacidad de la mampostería es la suficiente para resistir las cargas de diseño, por lo que se procede a calcular el acero transversal mínimo.

De esta manera, es posible, asignar la cantidad de acero requerida, mediante la siguiente formula:

$$A_{sh \text{ REQUERIDO}} = \frac{V_s s}{0.5 f_y d}$$

Donde:

A_{vh} : Acero horizontal

s : Separación del acero horizontal

f_y : Fluencia del acero

d : Profundidad efectiva

Diseño a flexión de vigas de concreto reforzado

Para el diseño de flexión en vigas de concreto reforzado, el primer punto es verificar el cumplimiento de la cantidad de acero de refuerzo que se requiere, de la siguiente manera:

$$A_{s \text{ min}} < A_{s \text{ req}} < A_{s \text{ max}}$$

✓ Área de acero mínima ($A_{s \text{ min}}$)

Se debe escoger el máximo valor entre las dos siguientes ecuaciones según ACI 318-19 sección 9.6.1.2.

$$A_{s \text{ min}} = \max \left(\frac{0.8 \sqrt{f'_c} b d}{f_y}, \frac{1.4 b d}{f_y} \right)$$

Donde:

f'_c : Resistencia del compresión

b : Ancho de viga

d : Profundidad efectiva

f_y : Fluencia del acero

✓ Área de acero requerida ($A_{s \text{ req}}$)

Se debe comenzar calculando la cuantía de acero requerido, tomando en consideración, el momento M_u de diseño.

$$A_{s \text{ req}} = \frac{M_u}{\phi f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)}$$

Donde:

f_y : Fluencia del acero

M_u : Momento último de diseño

a : Profundidad del bloque de compresión

d : Profundidad efectiva

✓ Área de acero máximo ($A_{s \text{ max}}$)

Por último, con respecto a la cuantía de acero máxima, se calcula la cantidad de acero límite, para que el acero fluya y se dé una falla dúctil del elemento estructural.

$$A_{s \text{ max}} = \rho_{\text{bal}} b d$$

$$\rho_{\text{bal}} = 0.85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_t} \right), \text{ donde este valor no debe excede a } 0.025.$$

$$\text{con } \beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{f'_c - 280}{70},$$

se debe cumplir que: $0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85$

Donde:

β_1 : Coeficiente de reducción de profundidad

f'_c : Resistencia del compresión

f_y : Fluencia del acero

ϵ_{cu} : Deformación unitaria del concreto

ϵ_t : Deformación unitaria del concreto

Como último paso, se procede a realizar el cálculo del momento nominal M_n , donde el valor de a corresponde a la altura del bloque de compresión.

$$a = \frac{A_{st} f_y}{0.85 f'_m b}$$

$$M_n = A_{st} f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Donde:

A_{st} : Área de acero total

f_y : Fluencia del acero

a : Profundidad del bloque de compresión

f'_m : Resistencia de la mampostería a la compresión

b : Ancho de la columna

d : Profundidad efectiva

Finalmente, se debe verificar el cumplimiento de:

$$\phi M_n \geq M_u$$

Donde:

ϕ : Reducción de capacidad a flexión

M_n : Momento nominal calculado

M_u : Momento último requerido

Diseño a cortante de vigas de concreto reforzado

Para el cálculo del cortante en vigas de concreto reforzado, se debe cumplir con la siguiente ecuación:

$$\phi V_n \geq V_u$$
$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s)$$

Donde:

ϕ : Factor de reducción de resistencia a cortante

V_n : Cortante nominal calculado

V_u : Cortante último requerido

V_c : Resistencia al cortante del concreto

V_s : Resistencia al cortante del refuerzo transversal

Para el cálculo de la resistencia al cortante del concreto V_c , se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}bd,$$

$$\text{con } V_{c \text{ máx}} \leq 1.33\sqrt{f'_c}bd$$

Donde:

f'_c : Resistencia del compresión

b: Ancho de la columna

d: Profundidad efectiva

Luego de obtener el resultado de V_c , se debe verificar si este valor es menor o mayor a V_u , esto para analizar si se necesita la cantidad mínima de acero o se debe desarrollar el diseño por cortante. Posterior a verificar la necesidad de acero por cortante, se calcula V_s de la siguiente forma:

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s},$$
$$\text{con } V_s \leq 2.2\sqrt{f'_c}bd$$

Donde:

A_v : Área de acero total a cortante

f_y : Fluencia del acero

d: Profundidad efectiva

s: Separación del acero horizontal

Diseño por flexocompresión de muros de concreto reforzado

Para iniciar con el diseño de elementos tipo muro en sistemas de concreto reforzado, es importante iniciar, verificando, si el elemento se rige por diseño en cortante o por flexión. Para esto, se debe hacer mención del

CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en la sección 8.6.2 y 8.2.3, en donde se establecen los lineamientos para determinar de qué manera se debe considerar el muro. Esto se muestra a continuación:

$$\frac{M_u}{V_u \cdot l_w} < 2, \text{ Rigue diseño por cortante}$$

$$\frac{M_u}{V_u \cdot l_w} \geq 2, \text{ Rigue diseño por flexión}$$

Donde:

M_u : Momento último de diseño

V_u : Cortante último de diseño

l_w : Largo del muro

Con respecto al refuerzo vertical y horizontal, ya sea para flexocompresión o cortante, se tiene las siguientes cuantías mínimas de acero, según el CSCR en la sección 8.6.4.

$$\rho_v = 0.0025$$

$$\rho_h = 0.0025$$

$$S_{max} = 45\text{cm}$$

Donde:

ρ_v : Cuantía de acero vertical

ρ_h : Cuantía de acero horizontal

S_{max} : Separación máxima en ambos sentidos

Además, se menciona en el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), sección 8.6.4.b, que es necesario colocar doble malla en los muros de concreto, cuando al menos, se cumpla una de las dos siguientes condiciones:

- ✓ $V_{lim} < V_u$, con $V_{lim} = 0,5A_{cv}\sqrt{f'_c}$
- ✓ El espesor de los muros es mayor a 20 cm

Donde:

V_u : Cortante de diseño

A_{cv} : $L_w(\text{largo}) \cdot b_w(\text{ancho})$

f'_c : Resistencia del compresión

Con respecto a los elementos de borde, se menciona en la sección 8.6.5 del CSCR (CFIA,2010), dos métodos para verificar la necesidad de elementos de borde:

El primer método, se basa en el desplazamiento relativo del muro en el piso, y se aplica normalmente, en muros con $\frac{h_w}{L_w} < 2$, y se debe cumplir que:

$$C < C_{lim}$$

Con:

$$C_{lim} = \frac{l_w}{600 \left(\frac{\delta_u}{h_w} \right)}$$

Donde:

C: distancia de la fibra extrema en compresión al eje neutro

l_w : Largo del muro

$\left(\frac{\delta_u}{h_w}\right)$: Este valor de compone por el valor del desplazamiento lateral de diseño del muro δ_u y la altura del muro h_w , en la sección CSCR 8.6.5. b se menciona que se puede tomar como 0.007 como mínimo.

El otro método se aplica, cuando el esfuerzo a compresión máximo en la fibra extrema, sumando el efecto del sismo, excede a $0,20 f'_c$.

$$\sigma_{\text{Comp máx}} = \frac{P_u}{A} + \frac{Mc}{I}$$

Donde:

P_u : Carga axial última

A : $L_w(\text{largo}) \cdot b_w(\text{ancho})$

M : Momento último de diseño

c : Eje neutro

I : Momento de inercia

La flexocompresión, es una de las tantas sollicitaciones que hay para el diseño en concreto reforzado, y está compuesto por la resistencia del del concreto en compresión en una de las esquinas y la resistencia del refuerzo de acero a la flexión en la otra esquina, por lo tanto, es un trabajo constante de ambos materiales para mantener estable el muro estructural. Dicho comportamiento, se debe verificar si cumple o no, mediante el diagrama de interacción.

Para generar el diagrama de interacción, es necesario tres puntos.

- ✓ Falla por compresión pura ($0, P_0$)

Para iniciar, se debe calcular el centroide plástico, el cual representa, la posición de la fuerza resultante producida por el acero y el concreto, y se calcula de la siguiente manera:

$$\gamma_0 = \frac{(0.85f'_c A_g)(h_w/2) + f_y \sum_{i=1}^n A_{si} d_i}{0.85f'_c A_g + f_y \sum_{i=1}^n A_{si}}$$

Donde:

f'_c : Resistencia del compresión

A_g : $h_w(\text{altura}) \cdot b_w(\text{ancho})$

f_y : Fluencia del acero

A_{si} : Área de acero de capa capa

d_i : Posición de cada capa de acero

Es necesario encontrar el valor por compresión pura P_0 , donde solo hay carga axial y no hay momento.

$$P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y$$

Donde:

f'_c : Resistencia del compresión

A_g : Área neta del muro

A_{st} : Área neta de acero de refuerzo

f_y : Fluencia del acero

- ✓ Falla balanceada (M_0, P_0)

En la falla balanceada, se tendrá la deformación unitaria última en la parte de compresión del concreto, que sería $\epsilon_y = 0.003$ y la deformación unitaria por fluencia del acero que sería el esfuerzo de fluencia del acero sobre el módulo de elasticidad, $\epsilon_y = \frac{f_y}{E}$.

Luego, se procede a calcular el valor de C_b que será la ubicación del eje neutro, en donde "d" será la distancia de la fibra más comprimida del concreto, a la fibra más tensionada del acero y posterior, el valor de "a" que será la profundidad del bloque de compresión.

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{C_b} = \frac{\varepsilon_y}{d - C_b} \text{ y } a_b = \beta_1 C_b$$

Donde:

ε_{cu} : Deformación unitaria del concreto

C_b : Ubicación del eje neutro

ε_y : Deformación unitaria de fluencia

d : Profundidad efectiva

β = Coeficiente de reducción de profundidad

Con esto, se procede a calcular las deformaciones unitarias en cada una de las líneas de acero donde está ubicado el refuerzo,

$$\varepsilon_{si} = (C_b - d_i) \frac{\varepsilon_{cu}}{C_b}$$

Donde:

C_b : Ubicación del eje neutro

d_i : Ubicación de cada capa de acero

ε_{cu} : Deformación unitaria del concreto

Luego se debe calcular el esfuerzo de fluencia del acero, para cada una de las líneas del acero, en donde, dicho esfuerzo, no podrá ser mayor al esfuerzo de fluencia f_y . Y se calcula de la siguiente manera:

$$f_{si} = E_{si} \varepsilon_{si}$$

Donde:

E_{si} : Módulo de elasticidad

ε_{si} : Deformación unitaria del acero

Se obtiene la fuerza de cada línea de refuerzo. Las líneas de refuerzo que se encuentran por encima del eje neutro se encuentran en compresión, y por debajo estarían en tensión. Además, se debe tomar en consideración, la fuerza del bloque de compresión.

$$F_s = A_s f_s$$

Donde:

A_s : Área de acero en cada capa

f_s : Esfuerzo del acero en cada capa

Para encontrar la carga axial nominal balanceada en compresión P_{nc} , se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{nc} = C_c + \sum_{i=1}^n F_{si}$$

Donde

C_c : Capacidad aportada por el concreto

F_{si} : Capacidad aportada por el acero

Para el momento nominal M_{nt} , se procede a calcular, el momento que genera el bloque de compresión del concreto, y además, todas las fuerzas de todas las capas de refuerzo del acero, esto con respecto a la ubicación de centroide plástico, conservando el signo de dichas fuerzas.

$$M_n = C_c \left(\frac{h_w}{2} - \frac{a}{2} \right) + \sum_{i=1}^n F_{si} \left(\frac{h_w}{2} - d_i \right)$$

Donde:

C_c : Capacidad aportada por el concreto

h_w : Altura de la columna

a : Profundidad del bloque de compresión

F_{si} : Capacidad aportada por el acero

d_i : Posición de cada capa de acero

✓ Falla por flexión pura ($0, P_{nt}$)

En este caso, se considera que el concreto en teoría no trabaja bajo fuerzas de tensión, en este caso, sería el acero, el cual estaría tomando todas las cargas. Todas estas fuerzas llevan al acero al punto del esfuerzo de fluencia, por lo tanto, además, en este punto, se considera que no existe momento. Se calcula como:

$$P_{nt} = \sum_{i=1}^n f_y A_{st} \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

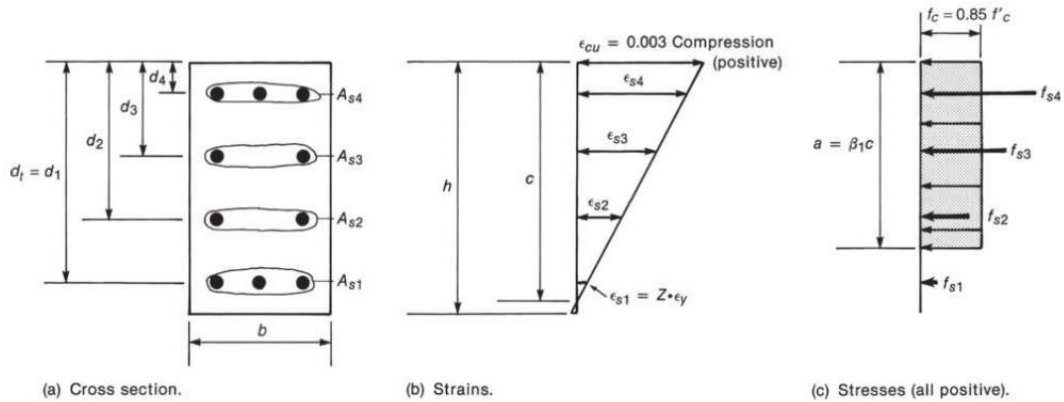
Donde:

f_y : Fluencia del acero

A_{st} : Área de acero total

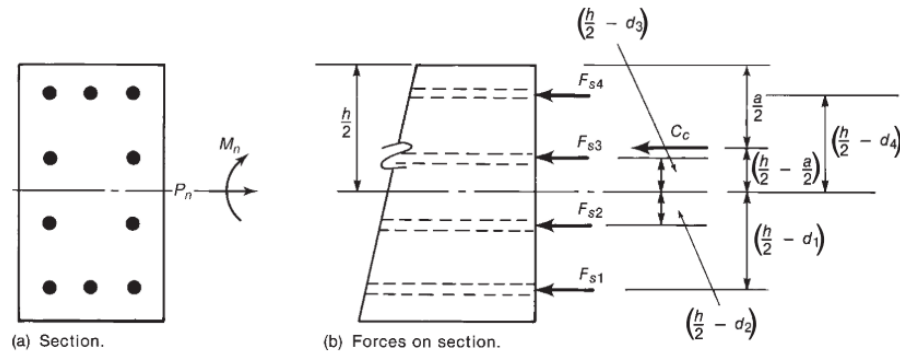
A continuación, se presenta la figura 17 y 18, donde se muestra las variables mencionadas para el cálculo del diagrama de interacción:

Figura 14. Notación y convención de signos para el diagrama de interacción.



Fuente: Wight (2015)

Figura 15. Fuerzas internas y brazos de momento.



Fuente: Wight (2015)

Diseño a cortante de muros de concreto reforzado

Para el diseño a cortante, se debe cumplir con la validación de que, el cortante nominal calculado, es mayor al cortante último de diseño.

$$\phi V_n \geq V_u$$

Donde:

ϕ : Reducción de capacidad a cortante

V_n : Cortante nominal calculado

V_u : Cortante último requerido

El valor del cortante último, es el que se obtiene de las solicitaciones internas, mientras que el valor del cortante nominal V_n para muros de concreto reforzado se debe calcular, y este no puede exceder el valor de $V_{n\max} = 2.5A_{cv}\sqrt{f'_c}$, y se obtiene de la siguiente fórmula:

$$V_n = (\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_t f_y) A_{cv}$$

Donde:

$$\alpha_c: 0.25 \text{ para } \frac{h_w}{l_w} \leq 1.5$$

$$\alpha_c: 0.17 \text{ para } \frac{h_w}{l_w} \geq 2$$

$$\alpha_c: \text{varía linealmente entre } 0.25 \text{ y } 0.17 \text{ para } 1.5 < \frac{h_w}{l_w} < 2$$

f'_c : Resistencia del compresión

ρ_t : Cuantía de acero a tensión

f_y : Fluencia del acero

$A_{cv} = L_w(\text{largo}) \cdot b_w(\text{ancho})$

Metodología

En la siguiente sección, se muestra, el proceso llevado a cabo para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto de graduación, el cual se desarrolla en el Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH) y que tiene como objetivo realizar dos diseños estructurales para un edificio de tres niveles, en mampostería integral y en concreto reforzado, y con ello evaluar, cuál de las dos opciones tiene mayores beneficios en relación con aspectos de solicitaciones internas de los elementos estructurales, así como aspectos económicos. Es por ello que el enfoque de este proyecto de graduación tiene consigo un enfoque cuantitativo, porque se basa en los resultados numéricos que se van obteniendo para, poder tomar decisiones.

Modalidad de vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible (VUIS)

Para llevar a cabo el presente trabajo, se procede a buscar información acerca de la Modalidad de vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible (VUIS), desarrollada por parte del Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH).

Se pretende extraer información primordial para el análisis estructural, como la ubicación geográfica en la cual se establecerá teóricamente la edificación, tomando en cuenta aspectos importantes como la disponibilidad de espacio a nivel de terrenos para desarrollar este proyecto, así como la existencia de servicios públicos de fácil acceso y de buena calidad.

Documentación de Referencia para el Diseño estructural

Se procede a recolectar todo tipo de información que sea útil para realizar este proyecto, como, tesis donde se desarrollen temas estructurales, códigos de diseño en los cuales apoyarse para obtener ecuaciones y todo tipo de teoría de análisis y diseño estructural, gráficas, esquemas y demás información, que sirva de apoyo para realizar los cálculos necesarios, recolección de información generada a lo largo de la carrera de Ingeniería en Construcción en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).

Los diseños a realizar estarán fundamentados, en el cumplimiento del Código Sísmico de Costa Rica (2010) para asegurar que los diseños cumplan con la normativa nacional vigente.

Descripción de la edificación a diseñar

El Ingeniero Felipe Corrales Vargas, desarrolla una propuesta de un modelo tridimensional, como un posible diseño de vivienda para la modalidad VUIS, como su tesis de licenciatura en la Universidad de Costa Rica. Este modelo consiste en un edificio de tres niveles, con una unidad habitacional por nivel, todos los niveles tienen continuidad de los elementos estructurales en elevación. Dicho proyecto se trata a grandes rasgos de una propuesta arquitectónica.

La propuesta arquitectónica está dada por un largo de 14.2650 m y un ancho de 5.85 m, con una altura de 2.9 m para los dos primeros niveles y 2.7 para el tercer nivel, además, internamente, sus espacios están compuestos de:

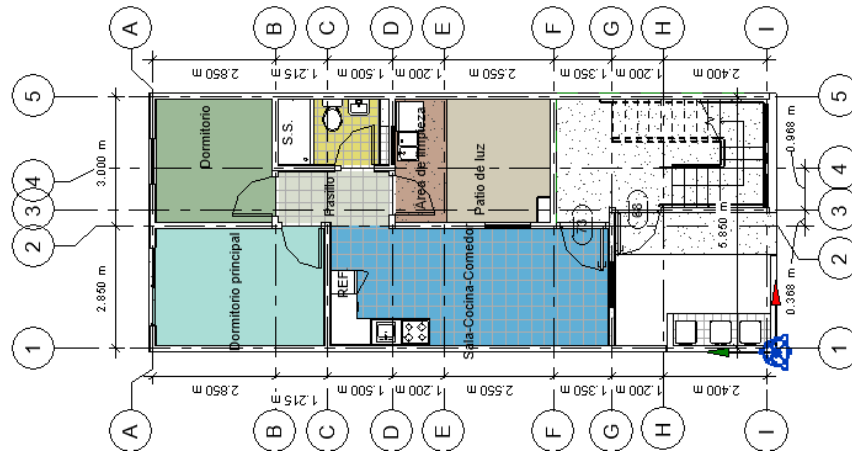
Figura 16. Distribución de los espacios por nivel de la estructura por diseñar.

Espacio	Dimensión (m ²)
Un dormitorio principal	11.58
Un dormitorio secundario	8.55
Un baño completo	4.52
Patio de luz	11.25
Sala, cocina y comedor en un mismo espacio	18.81
Un cuarto de pilas	4.05
Balcón	3.86

Fuente: Elaboración propia.

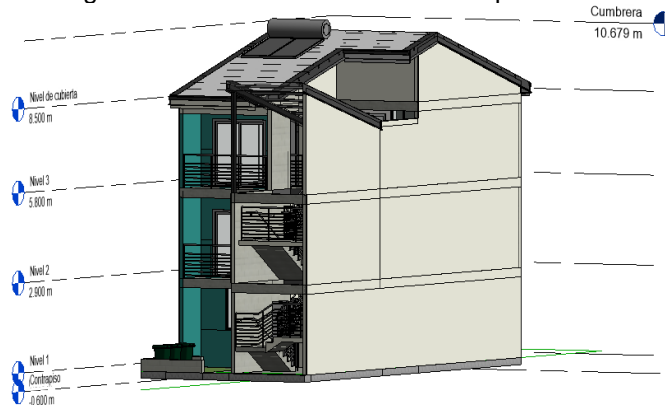
De este modelo tridimensional, se procede a obtener todos los datos que son necesarios para desarrollar el análisis estructural del edificio, como lo son, dimensiones en planta, distribución arquitectónica y demás aspectos que se consideren necesarios.

Figura 17. Vista en planta de la edificación por diseñar



Fuente: Corrales (2021)

Figura 18. Vista 3D de la edificación por diseñar



Fuente: Corrales (2021)

Análisis estructural y modelado en Etabs

El objetivo principal de este proyecto es realizar un diseño estructural en mampostería integral y en concreto reforzado, y analizar los resultados entre sí, y valorar el costo económico que conlleva ejecutar ambas propuestas.

Con el anteproyecto arquitectónico, se procede a realizar una propuesta para el predimensionamiento de los elementos estructural con base en especificaciones técnicas y diseños estructurales encontrados que sirvan de referencia.

Posteriormente, se lleva a cabo un modelado con las cargas gravitacionales y sísmico de ambas estructuras, mediante el software de análisis estructural Etabs, en donde se deberán realizar dos modelos por separado (mampostería integral y el otro en muros de concreto reforzado).

De este modelo en Etabs, se deberá obtener las deformadas elásticas, posteriormente, transformarlas derivadas inelásticas, y revisar que estos valores sean menores a los valores dados en tabla 7.3 del CSCR, de modo que sean estructuras sismorresistentes.

Diseño estructural de los elementos de mampostería y concreto reforzado

Una vez obtenidas las solicitaciones internas de los elementos del modelo en Etabs, se procede a realizar el diseño de los elementos estructurales, todo esto de acuerdo con la metodología de diseño "Load and Resistance Factor Design (LRFD)", tomando en cuenta los lineamientos del Código Sísmico de Costa Rica, en cuanto a diseño de los elementos estructurales.

Es importante mencionar, que se procura por obtener un diseño optimizado, de modo que se obtenga un diseño sismo resistente, pero a su vez, que se pueda obtener las menores dimensiones posibles, esto con el fin de reducir costos.

Una vez culminada la fase de diseño, se procede a realizar el detallado de estos elementos finalmente diseñados, de manera que se pueda apreciar el debido dimensionamiento, espesores, y demás aspectos que sea necesarios detallar.

Comparación de ambos diseños estructurales

Se procede a realizar un análisis comparativo entre ambos diseños, tanto a nivel de análisis estructural como a nivel de diseño estructural, para finalmente, realizar una estimación del costo con base en los elementos estructurales diseñados, para determinar, cuál de los modelos es más factible ejecutar, desde el punto de vista económico; y decidir cuál de los dos es la mejor opción a nivel general, y cuál se recomienda construir.

Resultados

Selección de la ubicación geográfica teórica de la estructura

Para realizar el análisis estructural de la vivienda, es necesario establecer una ubicación geográfica en donde teóricamente se desarrollará el proyecto. La importancia de la ubicación es que, este dato se utiliza para obtener el coeficiente sísmico, el cual depende de las características típicas del suelo en donde se ubicará la estructura. Para ello, se incluirán algunas investigaciones que ha realizado el MIVAH, en donde se muestran las zonas prioritarias y potenciales para el desarrollo de la modalidad VUIS dentro y fuera de la GAM.

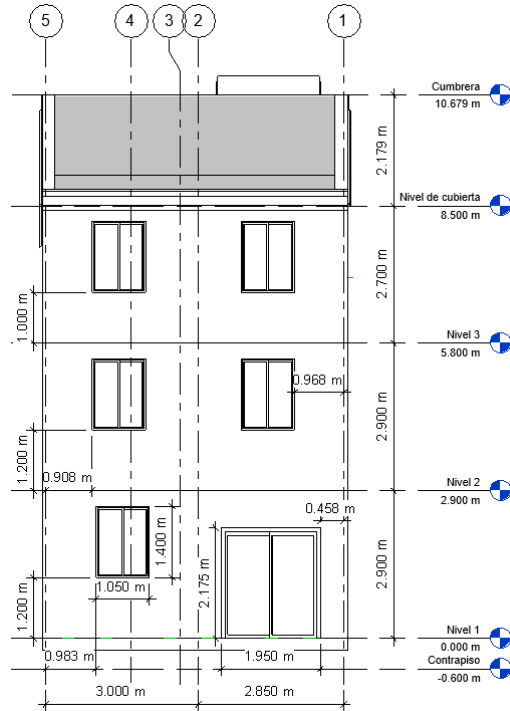
En la sección de anexos, la figura 79 y 80, brinda información sobre algunos distritos dentro y fuera de la GAM, que, según criterios como tenencia de red sanitaria del AyA, línea de buses, entre otros, cuentan con una idoneidad alta o baja.

Analizando los datos mostrados en dichas figuras, existen 3 zonas con una puntuación de idoneidad de 6, los tres pertenecientes a la provincia de San José. Estas zonas son los distritos de Pavas y la Uruca y León XIII. Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), estas zonas cuentan con una zona sísmica de S III, por lo que se puede escoger cualquiera de las tres zonas, sin embargo, para brindar una localización específica, se escoge la zona de Pavas, ya que tiene una mayor extensión territorial de 9,39 km².

Características geométricas de la vivienda a diseñar

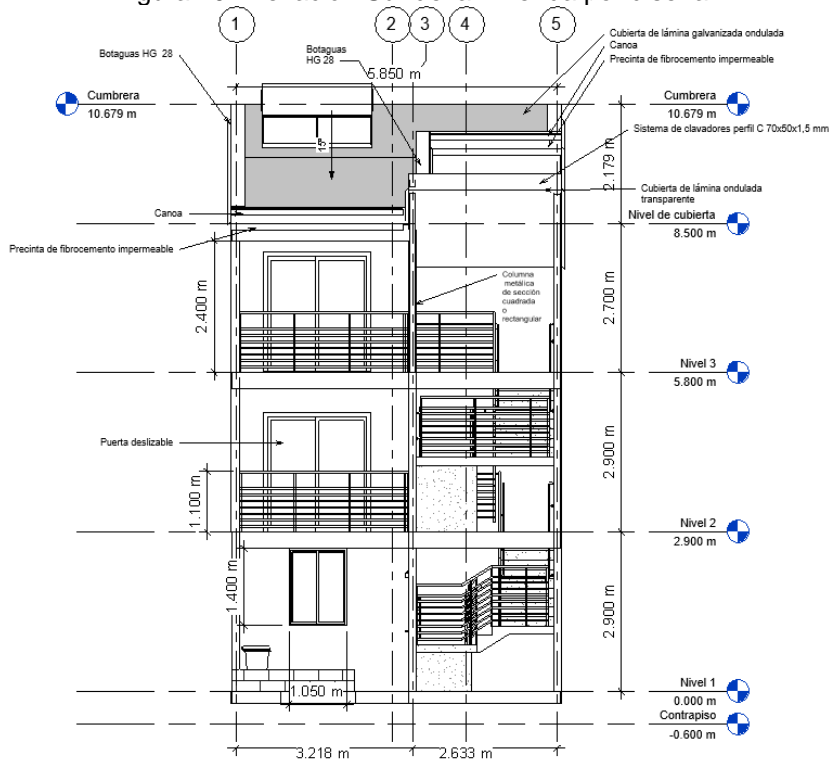
Este modelo consiste en un edificio de tres niveles, con una unidad habitacional por nivel. Para realizar el análisis y diseño estructural, es necesario conocer las características geométricas de la vivienda, las cuales serán obtenidas del modelo tridimensional realizado por el Ing. Felipe Corrales con el uso del software de Autodesk Revit. De acá se puede tener acceso a todo el dimensionamiento de la vivienda, la cual se muestra a continuación:

Figura 19. Elevación Norte de la vivienda por diseñar



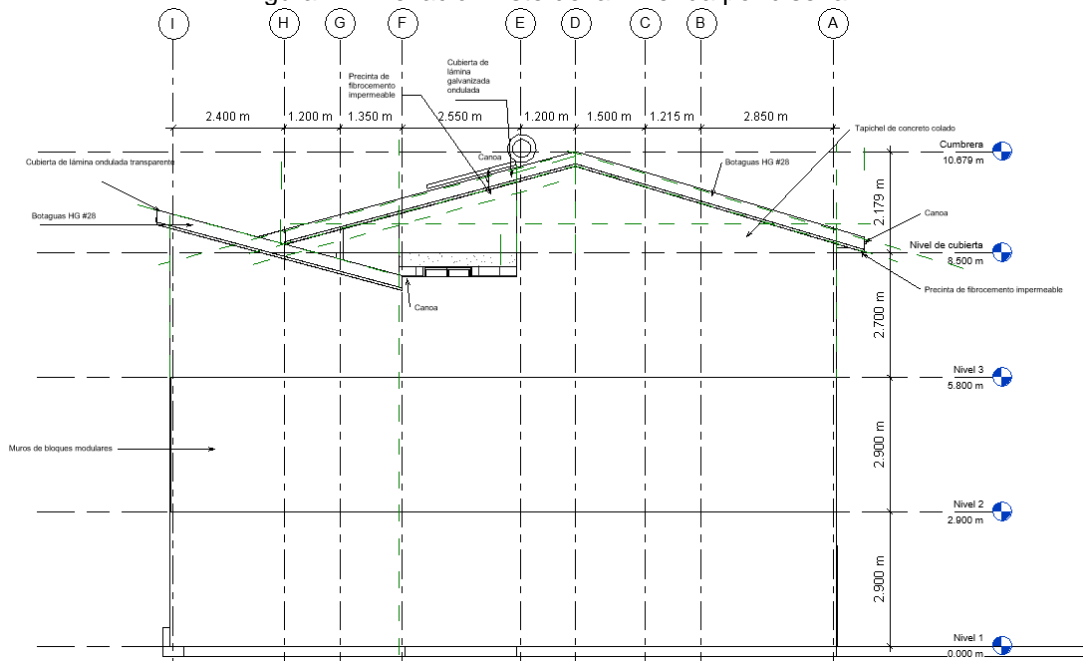
Fuente: Corrales (2021)

Figura 20. Elevación Sur de la vivienda por diseñar.



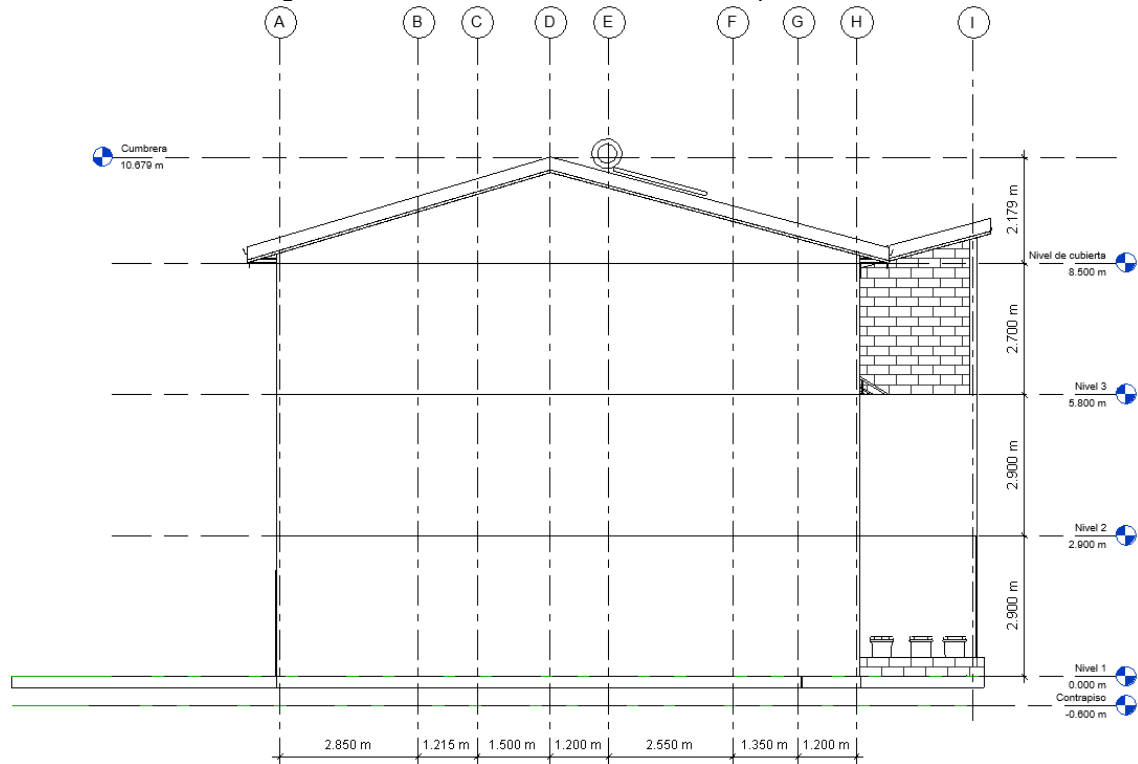
Fuente: Fuente: Corrales (2021)

Figura 21. Elevación Este de la vivienda por diseñar



Fuente: Corrales (2021)

Figura 22. Elevación Oeste de la vivienda por diseñar



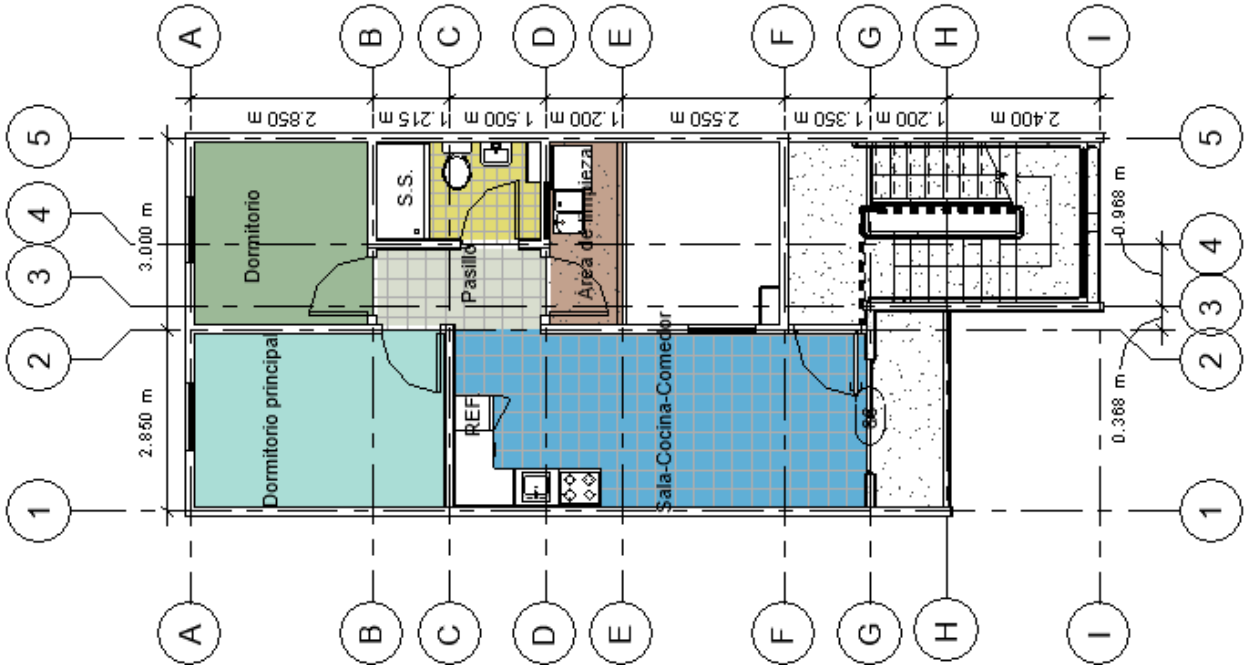
Fuente: Corrales (2021)

Figura 23. Planta arquitectónica del primer de la vivienda por diseñar



Fuente: Corrales (2021)

Figura 24. Planta arquitectónica del segundo y tercer nivel de la vivienda por diseñar



Fuente: Corrales (2021)

Planteamiento inicial del modelo estructural

Cargas aplicadas a la estructura

- ✓ **Sobre carga muerta:** Para carga muerta de diseño, se contemplan las cargas mostradas en la figura 26, en donde se tiene que la carga muerta de diseño a utilizar será de 435 kg/m², estas cargas fueron propuestas según criterio profesional y con base, además, en la tesis realizada por Guasch (2017). Para el caso del peso del entrepiso, debido a que no es un entrepiso colado en sitio, se debe sumar su peso para ingresarlo en el programa Etabs, es por eso, que se suma al peso total de la SCM (este peso se toma, con base la ficha técnica de PH Prefabricados).

Figura 25. SCM adicional contempladas para la escogencia del tipo de vigueta

Sobre Carga Muerta (SCM) utilizada para diseño y la selección de la vigueta de PH Prefabricados a utilizar	
	SCM (kgf/m ²)
Estructura de entrepiso	350
Acabado de pisos	50
Acabado de cielos	15
Sistema electromecánico	15
Otros posibles detalles constructivos (niveles, desplomes, etc.)	5
Total	435

Fuente: Elaboración propia.

Aparte de esto, se deben considerar las cargas de tapichel en el techo. Para este caso, será aplicado en dos ejes. Lo cual se muestra a continuación:

Figura 26. SCM Tapichel en concreto reforzado

SCM Tapichel en Concreto Reforzado							
Eje	Área de tapichel (m ²)	Espesor de tapichel (m)	Volumen de pichel (m ³)	Densidad del concreto (kg/m ³)	Peso (kg)	Longitud de tapichel (m)	SCM tapichel según su posición (kgf/m)
Tapichel eje 1 A-D	4.65	0.10	0.46	2400.00	557.64	5.57	200.41
Tapichel eje 1 D-F1	8.28	0.10	0.83	2400.00	993.96	6.30	315.54
Tapichel eje 5 A-D	4.65	0.10	0.46	2400.00	557.64	5.57	200.41
Tapichel eje 5 D-D.1	2.13	0.10	0.21	2400.00	255.60	1.20	A los 0m es de 316.00 kg/m y a los 1.20 m es de 61.00 kg/m
Tapichel eje 5 E-H	2.19	0.10	0.22	2400.00	262.80	4.95	106.18

Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. SCM Tapichel en mampostería

SCM Tapichel en Mampostería							
Eje	Área de tapichel (m ²)	Espesor de tapichel (m)	Volumen de pichel (m ³)	Densidad de la mampostería (kg/m ³)	Peso (kg)	Longitud de tapichel (m)	SCM tapichel según su posición (kgf/m)
Tapichel eje 1 A-D	4.65	0.15	0.70	2251.00	784.53	5.57	281.95
Tapichel eje 1 D-F	8.28	0.15	1.24	2251.00	1398.38	6.30	443.93
Tapichel eje 5 A-D	4.65	0.15	0.70	2251.00	784.53	5.57	281.95
Tapichel eje 5 D-D.1	2.13	0.15	0.32	2251.00	359.60	1.20	A los 0m es de 444.00 kg y a los 1.20 m es de 85.00 kg
Tapichel eje 5 E-H	2.19	0.15	0.33	2251.00	369.73	4.95	149.38

Fuente: Elaboración propia.

Se debe de calcular el peso de la estructura de techo cubierta. Para la estructura de techo, se utilizará un peso de 40 kg/m² de los elementos metálicos y 5 kg/m² por la cubierta, que en este caso será láminas de zinc. Además, el peso de un calentador de agua solar ubicado en la estructura de techo. Se investigó para poder dar un peso de este elemento, y se aplicará un peso de 209 kg, el cual se repartirá entre toda el área de la estructura de techo, que en este caso es de aproximadamente de 51m². Se aplicará un peso extra por este calentador de manera distribuida en toda la estructura de techo de 4.10 kg/m². La SCM aportada por la cubierta se muestra a continuación:

Figura 28. SCM del calentador solar, distribuido de manera uniforme en el techo de la estructura

SCM del Calentador Solar		
Peso lleno de agua (kg)	Área de techo (m ²)	SCM del calentador (kgf/m ²)
209.00	51.00	4.10

Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. SCM total de la estructura de cubierta

SCM Estructura techo					
Eje	SCM de estructura de techo (kgf/m ²)	Área tributaria en planta para cada eje donde se apoya la estructura de cubierta (m ²)	Peso (kg)	Longitud de apoyo (m)	SCM cubierta de techo (kgf/m)
Estruc. Techo eje 1	49.10	16.91	830.13	11.87	69.96
Estruc. Techo eje 2 A-D.1	49.10	19.79	971.53	6.68	145.55
Estruc. Techo eje 2 D.1-F	49.10	4.57	224.42	3.90	57.54
Estruc. Techo eje 5	49.10	7.27	356.82	6.68	53.46
Estruc. Techo en escalera eje 5 E-H	49.10	6.52	319.89	4.95	64.62
Estruc. Techo en escalera eje 3 E-H	49.10	6.52	319.89	4.95	64.62

Fuente: Elaboración propia.

En esta estructura, se colocará, un tanque de almacenamiento de agua de 1100 litros, en una losa ubicada en el último nivel, es por ello, que se debe aplicar también esta carga muerta. Se muestra a continuación el resultado:

Figura 30. SCM del tanque de agua

SCM Tanque de agua de 1100ml				
Área de losa (m ²)	Volumen de Tanque (m ³)	Densidad del agua (kg/m ³)	Peso propio del tanque (kg)	Carga (kgf/m ²)
3.60	1.10	1000.00	1121.00	311.39

Fuente: Elaboración propia.

También, se tomará en cuenta el peso de las escaleras, no se irán a modelar en el programa Etabs, pero si se tomará en cuenta el peso de estas en la estructura. Para ello, se modelará una losa en donde estarán apoyadas las escaleras y se distribuirá en estas.

Figura 31. SCM de la estructura de escalera

SCM Estructura de escalera						
Área en planta de losa (m ²)	Espesor (m)	Volumen (m ³)	Densidad del concreto (kg/m ³)	Peso(kg)	Longitud (m)	Distribuid a (kgf/m)
2.86	0.30	0.86	2400.00	2059.20	2.63	782.22

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ **Carga Temporal:** La carga temporal, también llamada carga viva (CV), se puede asignar con la ayuda de la tabla 6.1 del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016). En este caso, el edificio será destinado para uso habitacional, por lo que se asignará una carga de 200 kg/m². Además, para el nivel de techo, se debe aplicar una carga temporal para techo diferente a la del edificio en general. En esta misma tabla, indica que, para el techo, se debe asignar 40 kg/m².

Figura 32. Cargas temporales, según el uso que se le dará a la estructura.

Destino del piso	Carga temporal (kg/m ²)
Habitación (casas de habitación, apartamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, edificios para internados en escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares).	200
Oficinas, despachos, laboratorios, salones de lectura, aulas, salas de juego y similares.	250
Escaleras, rampas, vestíbulos y pasajes de libre acceso al público.	400
Lugares de reunión desprovistos de asientos fijos, estadios, salones de baile, etc.	500
Bibliotecas y salones de archivo.	500
Lugares de reunión con asientos fijos, templos, cines, teatros, gimnasios, etc.	400
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía ligera.	500
Comercios, bodegas y fábricas de mercancías con <i>peso</i> intermedio.	650
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía pesada.	800
Techos de fibrocemento, láminas de acero galvanizado y otros.	40
Azoteas con pendiente superior al 5 por ciento.	100
Azoteas con pendiente inferior o igual al 5 por ciento.	200
Voladizos en vía pública (marquesinas, balcones y similares).	300
Garajes y aparcamientos (para automóviles exclusivamente).	300

Fuente: Obtenido de CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

- ✓ **Carga Sísmica (CS):** La carga sísmica, se refiere a la carga que se encontrará en la estructura en el momento que ocurra el sismo, por lo que estará compuesta por la carga permanente (CP) y una fracción de la carga viva (CV). Esta fracción que se aplica a la CV se obtiene de la sección 6.1.3 del CSCR. En este caso, al ser cargas para edificio, indica que se tiene que aplicar un porcentaje del 15% de la CV.

Cuadro 6. Porcentajes por aplicar para la obtención de la carga sísmica.

Tipo de carga sistema a considerar.	Porcentaje de la carga temporal a utilizar
Equipo o instalaciones fijas a la estructura	1
Carga en bodegas	0.25
Cargas en edificios	0.15
Cargas en azoteas, marquesinas y techos	0

Fuente: Obtenido del CSCR.

- ✓ **Coefficiente Sísmico:** El coeficiente sísmico, se aplica a ambos componentes ortogonales de la sollicitación horizontal producidas por sismo. Este se obtiene de la siguiente formula:

$$C = \frac{a_{ef} \cdot I \cdot FED}{SR}$$

En donde:

C: Coeficiente sísmico
 a_{ef} : Aceleración pico efectiva
 I: Factor de importancia
 FED: Factor espectral dinámico
 SR = Factor de sobrerresistencia

A continuación, se muestra un resumen de los datos necesarios para efectuar el modelo, según los requerimientos del CSCR (CFIA, 2010).

Figura 33. Datos iniciales, utilizados para el modelo de la estructura, basado en el CSCR (CFIA, 2010)

Datos Generales de diseño	
Sitio de cimentación	Tipo S3
Zona Sísmica	SIII
Factor de Importancia	Grupo D = 1
Sistema Estructural	Tipo Muro
Regularidad en Altura	Irregular en planta
Regularidad en Planta	Irregular grave
Ductibilidad Local	Óptima
Ductibilidad Global	1

Fuente: Elaboración propia.

Propiedad de los materiales

- ✓ **Concreto:** Según las especificaciones del CSCR en la sección 8.1.2, la resistencia mínima para el concreto en compresión debe ser $f'c$ 210 kg/cm². La edificación en concreto reforzado se construirá mediante vigas y muros con concreto de 210 kg/cm², con una densidad de 2400 kg/m³.
- ✓ **Acero:** Según el CSCR en la sección 8.1.2, se permite utilizar acero ASTM A-615 de grado 40 y grado 60. Se propone utilizar para el diseño, ASTM A-706 grado 60, con $f_y = 4200$ kg/cm².
- ✓ **Mampostería:** Se escoge mampostería clase A, lo que corresponde a una resistencia de $f'm$ 100 kg/cm². Con respecto a la densidad de la mampostería, se seleccionará una densidad de 2251 kg/m³.

Selección de los elementos estructurales

- ✓ **Losa:** Se utiliza el sistema de losa aligerada diseñada por la empresa PH Prefabricados, la cual, para este diseño, se necesita un sistema de losa que deberá de soportar 85 kg/m² de sobre carga muerta y 200 kg/m² de carga viva, para un total de 285 kg/m².

Según el diseño arquitectónico, la mayor luz existente, es de 3 metros en el sentido "y". Por medio de las especificaciones de la ficha técnica de la losa, se escogerá una vigueta con la simbología de Vigueta VA8-2, la cual está diseñada para soportar las cargas requeridas. Dicha vigueta, tiene una longitud de 3.52 metros. Y satisface también la mayor longitud en el sentido "y".

Figura 34. Escogencia de viguetas a utilizar según el uso y la sobrecarga muerta de diseño
Entrepisos Tipo PH PREFABRICADOS



Diseño Viguetas de 15 con block de estereofon de 15

Uso para Cargas temporales unitarias mínimas de acuerdo al CSCR2010	CARGA TEMPORAL kg/m ²	SOBRECARGA ADICIONAL kg/m ²	CARGA SUPERIMPUESTA kg/m ²	ENTREPISO 20CM				
				PESO 185,9 kg/m ²				
				CONCRETO DE SITIO 0,068 m ³ /m ²				
				VIGUETA VAB-2	VIGUETA VBB-2	VIGUETA VCB-2	VIGUETA VDB-2	VIGUETA VEB-2
L _{max} m	L _{max} m	L _{max} m	L _{max} m	L _{max} m				
Habitación (casas de habitación, apartamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, edificios para internados en escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares). Azoteas con pendiente inferior a 5 por ciento.	0	50	250	3,69	4,23	4,70	5,28	5,78
	0	75	275	3,60	4,12	4,59	5,15	5,64
	200	100	300	3,52	4,03	4,48	5,04	5,52
	0	125	325	3,44	3,94	4,38	4,93	5,40
	0	150	350	3,37	3,86	4,29	4,84	5,30

Fuente: Entrepisos para casas prefabricadas (s. f.)

✓ **Predimensionamiento de elementos estructurales en concreto reforzado:**

Muros: Para el predimensionamiento del espesor de los muros, se consultó la norma ACI 318-19, en la tabla 11.3.1.1 y se menciona que para muros de carga, se debe escoger el mayor espesor entre 10cm y 1/25 de la longitud menor del muro (alto y largo), sin embargo, al utilizar la razón de 1/25, algunos de los muros empiezan a tener un espesor bastante considerable y mayor a 10cm, es por ello, que iniciará con el predimensionamiento de los muros estructurales, con un espesor mínimo de 10 cm, para todo los niveles de la edificación.

Figura 35. Espesores mínimos para muros estructurales de concreto reforzado.

Tipo de muro	Espesor mínimo del muro, <i>h</i>		
De carga ^[1]	El mayor de:	100 mm	(a)
		1/25 de la menor entre la longitud y la altura no soportadas	(b)
No portante	El mayor de:	100 mm	(c)
		1/30 de la menor entre la longitud y la altura no soportadas	(d)
Exteriores de sótanos y cimentaciones ^[1]	190 mm		(e)

Fuente: ACI 318-19

Vigas: Para las dimensiones de estos elementos a flexión, es importante tomar en consideración las indicaciones dadas por la empresa PH Prefabricados, con respecto al anclaje de las viguetas dentro de la viga de entepiso. En su ficha técnica, se menciona que, deben de empotrarse las viguetas un mínimo de 7.5 cm dentro de la viga de entepiso. Se toma como base lo mencionado en el CSCR (CFIA, 2010), en la sección 8.2.1, específicamente en el punto "e", donde se aclara que, para elementos a flexión, se debe cumplir con la razón de $b/h \geq 2$. Además, se tomará en cuenta, un recubrimiento de todas las varillas de un mínimo de 2.5 cm. Es por esto, que, se establece para el predimensionamiento de las vigas, unas dimensiones de 12cm de ancho, por 40cm de alto, lo cual cumple con los requerimientos dados.

Cuadro 7. Resumen de predimensionamiento de los elementos estructurales en concreto reforzado

Elemento	Referencia de diseño	Dimensionamiento preliminar
Vigas	CSCR 8.2.1	12cm de ancho por 40cm de alto
Muros	ACI 318-19 tabla 11.3.1.1	10cm de espesor

Fuente: Elaboración propia.

✓ **Predimensionamiento de elementos estructurales en mampostería integral**

Muros: En la sección 9.7.10 del CSCR, indica que, para edificios de 3 niveles, no puede existir una relación entre la altura libre y el espesor, mayor a 25. En este caso al tener una altura de entrepiso de 290 cm y proponiendo un espesor de 12cm, dicha relación es de 24.17, por lo que no se sobrepasa. Por lo que se propone utilizar bloques de 12cm para todos los niveles como una primera propuesta.

Vigas: Para las vigas, se especifica en el CSCR (CFIA, 2010) en la sección 9.6.1.b.i y 9.6.1.b.iii, que las dimensiones mínimas de las vigas de mampostería son de 12cm de ancho y 20 cm de altura. Tomando en cuenta que las viguetas utilizadas en el entrepiso deben ir empotradas y por facilidad constructiva, se propone utilizar vigas de 12x40 para todos los niveles

Regularidad en altura

Según lo indicado en el CSCR, una estructura puede ser clasificada como regular en planta, cuando todos los elementos verticales sismorresistentes son continuos y sin desfases, desde la cimentación hasta el último nivel. En este caso, en el eje A y F (ver en la sección de anexos), tienen discontinuidades en los elementos estructurales, que son los muros, por lo tanto, se clasifica como irregular en altura.

Regularidad en planta

Se muestra a continuación los resultados de la regularidad en planta, extraídos de Etabs, para ambos modelos por diseñar

Figura 36. Clasificación de la regularidad en planta en la edificación de concreto reforzado, según límites establecidos por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

Clasificación de regularidad en planta del edificio en Concreto Reforzado										
	Centro de rigidez en "x" (m)	Centro de rigidez en "y" (m)	Centro de masa "x" (m)	Centro de masa "y" (m)	Excentricidad en "x"	Excentricidad en "y"	Dimensión en "x" de la estructura (m)	Dimensión en "y" de la estructura (m)	Condición en eje "x"	Condición en eje "y"
Diafragma nivel 1	5.28	3.09	5.51	2.78	0.23	0.30	14.27	5.85	Regular	Irregular Grave
Diafragma nivel 2	4.38	3.09	5.51	2.79	1.13	0.30			Irregular Grave	Irregular Grave

Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Clasificación de la regularidad en planta en la edificación de mampostería integral, según límites establecidos por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

Clasificación de regularidad en planta del edificio en Mampostería Integral										
	Centro de rigidez en "x" (m)	Centro de rigidez en "y" (m)	Centro de masa "x" (m)	Centro de masa "y" (m)	Excentricidad en "x"	Excentricidad en "y"	Dimensión en "x" de la estructura (m)	Dimensión en "y" de la estructura (m)	Condición en eje "x"	Condición en eje "y"
Diafragma nivel 1	5.29	3.09	5.53	2.80	0.24	0.29	14.27	5.85	Regular	Regular
Diafragma nivel 2	4.40	3.09	5.53	2.81	1.13	0.28			Irregular Grave	Regular

Fuente: Elaboración propia

Fuerzas sísmicas obtenidas

Se muestra a continuación, una comparación de las fuerzas de sismo versus las fuerzas ocasionadas por viento.

Figura 38. Comparación de cortante basal de ambos modelos vs fuerza de viento.

Fuerza Sísmica Mampostería integral		Fuerza Sísmica Concreto Reforzado	
Fuerza Sísmica en eje ortogonal "x" (Kgf)	Fuerza Sísmica en eje ortogonal "y" (Kgf)	Fuerza Sísmica en eje ortogonal "x" (Kgf)	Fuerza Sísmica en eje ortogonal "y" (Kgf)
44978	55977	29038	42357

Fuente: Elaboración propia

Modos de vibración

Se muestran los modos de vibración necesarios para lograr una masa participativa en cada eje ortogonal de por lo menos el 90%, así como los periodos correspondientes.

Figura 39. Modos de vibración para ambos modelos, para alcanzar el 90% en cada eje ortogonal

Concreto Reforzado				Mampostería Integral			
Modos	Periodos	% masas en "x"	% masas en "y"	Modos	Periodos	% masas en "x"	% masas en "y"
1	0.183	5.28E-07	0.0679	1	0.255	7.99E-07	0.0802
2	0.167	3.43E-05	0.0009	2	0.229	4.62E-05	0.0025
3	0.135	0	0.0088	3	0.185	0	0.0104
4	0.124	2.97E-06	0.0433	4	0.166	1.69E-05	0.1094
5	0.098	2.83E-06	0.0223	5	0.129	0.0001	0.293
6	0.078	0.0001	0.5927	6	0.122	0.0001	0.2878
7	0.076	1.18E-05	0.0303	7	0.105	2.67E-06	0.0009
8	0.071	9.01E-07	0.0016	8	0.099	8.36E-07	0.0001
9	0.065	0.0003	0.0005	9	0.083	0.0001	0.0016
10	0.058	0.001	2.25E-05	10	0.082	0.0008	2.96E-05
11	0.057	0.0001	0.0007	11	0.079	0.0114	0.0312
12	0.054	0.0152	0.0039	12	0.076	0.0006	2.00E-04
13	0.054	0.0021	0.0008	13	0.075	0.0041	0.0028
14	0.053	0.0134	0.0015	14	0.072	0.2855	0.0041
15	0.052	0.0111	0.0108	15	0.07	0.1123	1.40E-03
16	0.046	0.0006	4.98E-05	16	0.067	0.1076	0.0538
17	0.045	0.0984	0.0552	17	0.065	0.1623	0.0166
18	0.044	0.0006	0.0187	18	0.063	0.1108	0.0154
19	0.043	0.0109	0.0287	19	0.058	0.0128	0.0084
20	0.042	0.2921	0.014	20	0.057	0.0089	0.0007
21	0.04	0.2587	0.0037	21	0.056	0.0092	0.0001
22	0.038	4.33E-02	1.59E-05	22	0.052	0.0165	0.0008
23	0.037	0.0133	0.0057	23	0.05	1.25E-05	0.0011
24	0.036	0.0286	0.0011	24	0.049	0.0009	0.0005
25	0.035	0.0068	0.0002	25	0.048	0.0001	0.0045
26	0.034	5.82E-02	0.0002	26	0.046	0.0107	0.0001
27	0.034	0.0043	0.0072	27	0.044	0.0105	0.0004
28	0.031	0.0008	0.0003	28	0.044	2.00E-04	0.0004
29	0.031	2.00E-04	0.0001	29	0.042	2.77E-06	0.001
30	0.029	0.0002	0.0003	30	0.041	0.0016	0.001
31	0.029	0.0006	0.0016	31	0.038	0.0047	0.0001
32	0.026	0.0047	0.0031	32	0.037	0.0216	0.0035
33	0.025	0.0002	0.0003	33	0.036	0.0104	0.0371
34	0.023	0.0263	0.0002				
35	0.023	0.0095	0.0257				
36	0.022	0.0012	0.0309				
Total		0.9029	0.9833	Total		0.9039	0.9711

Fuente: Elaboración propia

Coeficiente Sísmico

Se muestran los datos utilizados, para la obtención del coeficiente sísmico para ambos modelos

Figura 40. Coeficiente Sísmico calculado para ambos modelos

Concreto Reforzado				Mampostería Integral			
$C_{sis\ x} =$ Coeficiente Sísmico en x		$C_{sis\ y} =$ Coeficiente Sísmico en y		$C_{sis\ x} =$ Coeficiente Sísmico en x		$C_{sis\ y} =$ Coeficiente Sísmico en y	
Modo de vibración	20	Modo de vibración	6	Modo de vibración	14	Modo de vibración	5
Periodo	0.04	Periodo	0.08	Periodo	0.07	Periodo	0.13
a_{ef}	0.36	a_{ef}	0.36	a_{ef}	0.36	a_{ef}	0.36
I	1.00	I	1.00	I	1.00	I	1.00
FED	1.23	FED	1.84	FED	1.75	FED	2.50
SR	2.00	SR	2.00	SR	2.00	SR	2.00
$C_{sis\ x}$	0.22	$C_{sis\ y}$	0.33	$C_{sis\ x}$	0.31	$C_{sis\ y}$	0.45

Fuente: Elaboración propia

Comprobación de Derivas

Se muestra a continuación, la condición de cumplimiento de las derivas con respecto a lo indicado en el CSCR 2010.

Figura 41. Comprobación de las derivas obtenidas en concreto reforzado, con respecto a las derivas máximas dadas por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

Derivas de la estructura en Concreto Reforzado - Espesor 10 cm						
Derivas en eje ortogonal en X						
	Hi relativa (m)	Desplazamiento elástico (m)	Desplazamiento inelástico (m)	Deriva inelastica (m)	Deriva inelastica máxima dada por el CSCR (2010)	Condición
Nivel 1	2.9	0.000043	0.000060	0.000021	0.01	Cumple
Nivel 2	2.9	0.000082	0.000115	0.000040	0.01	Cumple
Nivel 3	2.7	0.000545	0.000763	0.000283	0.01	Cumple
Derivas en eje ortogonal en Y						
	Hi relativa (m)	Desplazamiento elástico (m)	Desplazamiento inelástico (m)	Deriva inelastica (m)	Deriva inelastica máxima dada por el CSCR (2010)	Condición
Nivel 1	2.9	0.003638	0.005093	0.001756	0.01	Cumple
Nivel 2	2.9	0.007330	0.010262	0.003539	0.01	Cumple
Nivel 3	2.7	0.007471	0.010459	0.003874	0.01	Cumple

Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Comprobación de las derivas obtenidas en mampostería integral, con respecto a las derivas máximas dadas por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

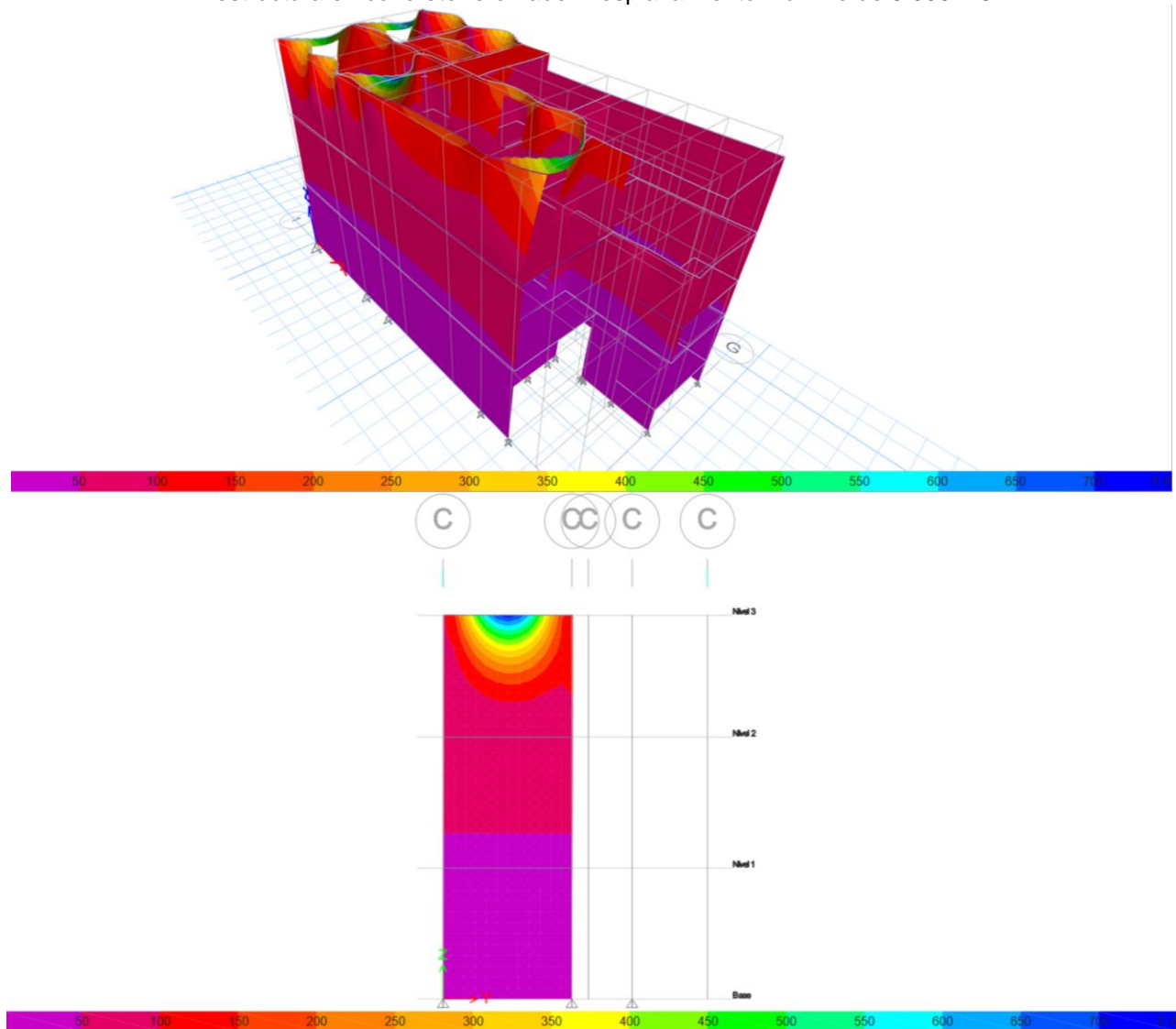
Derivas de la estructura en Mampostería Integral - Espesor 12 cm						
Derivas en eje ortogonal en X						
	Hi relativa (m)	Desplazamiento elástico (m)	Desplazamiento inelástico (m)	Deriva inelastica (m)	Deriva inelastica máxima dada por el CSCR (2010)	Condición
Nivel 1	2.9	0.000161	0.000225	0.000078	0.01	Cumple
Nivel 2	2.9	0.000312	0.000437	0.000151	0.01	Cumple
Nivel 3	2.7	0.001269	0.001777	0.000658	0.01	Cumple
Derivas en eje ortogonal en Y						
	Hi relativa (m)	Desplazamiento elástico (m)	Desplazamiento inelástico (m)	Deriva inelastica (m)	Deriva inelastica máxima dada por el CSCR (2010)	Condición
Nivel 1	2.9	0.007540	0.010556	0.003640	0.01	Cumple
Nivel 2	2.9	0.015196	0.021274	0.007336	0.01	Cumple
Nivel 3	2.7	0.014678	0.020549	0.007611	0.01	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Zonas de máximo desplazamiento, para estructuras en concreto reforzado

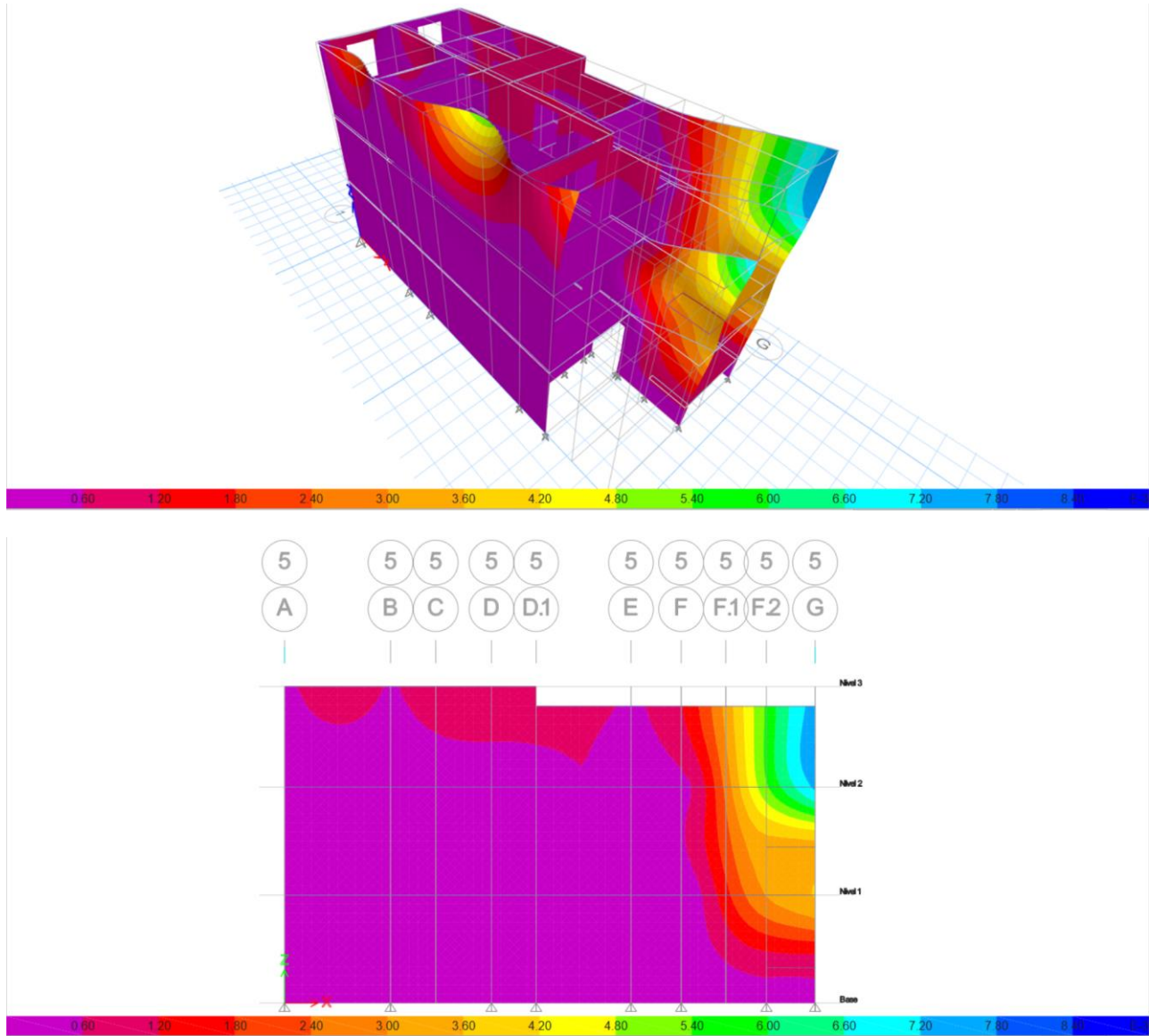
A continuación, se muestran los resultados obtenidos, de los sectores de la estructura que cuentan con mayor desplazamiento, en ambos ejes ortogonales, para la estructura en concreto reforzado, de modo que se pueda analizar de manera visual, con ayuda del mapa de calor, cuales muros sufren mayor desplazamiento.

Figura 43. Mapa de calor, de los sectores con mayor desplazamiento, para fuerza sísmica en "x" para la estructura en concreto reforzado: Desplazamiento máximo de 0.000726m



Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Mapa de calor, de los sectores con mayor desplazamiento, para fuerza sísmica en “y” para la estructura en concreto reforzado: Desplazamiento máximo de 0.007838

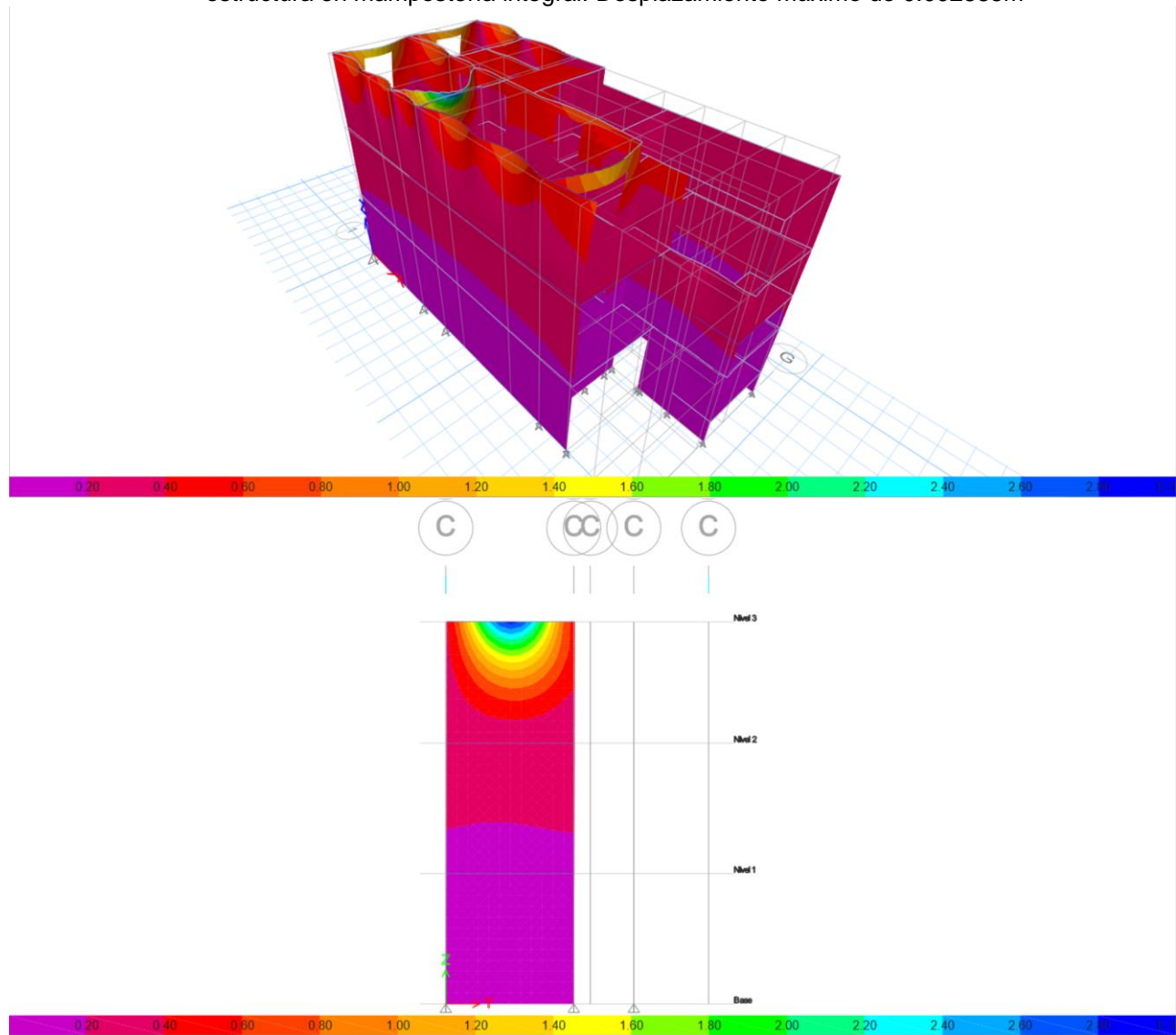


Fuente: Elaboración propia

Zonas de deformación máxima, para la estructura en mampostería integral reforzada

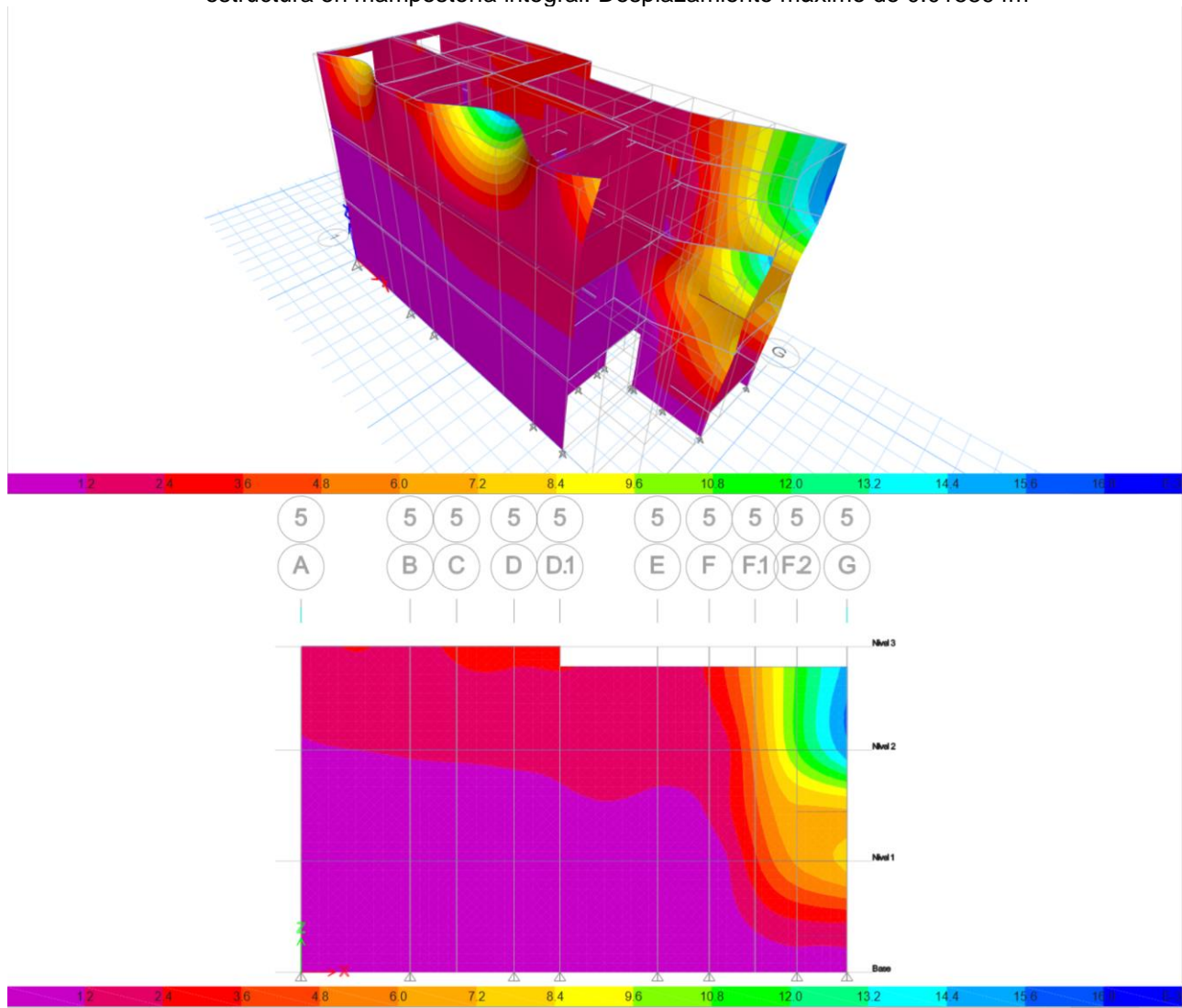
A continuación, se muestran los resultados obtenidos, de los sectores de la estructura que cuentan con mayor desplazamiento, en ambos ejes ortogonales, para la estructura en mampostería integral reforzada, de modo que se pueda analizar de manera visual, con ayuda del mapa de calor, cuales muros sufren mayor desplazamiento.

Figura 45. Mapa de calor, de los sectores con mayor desplazamiento, para fuerza sísmica en "x" para la estructura en mampostería integral: Desplazamiento máximo de 0.002885m



Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Mapa de calor, de los sectores con mayor desplazamiento, para fuerza sísmica en "y" para la estructura en mampostería integral: Desplazamiento máximo de 0.015894m

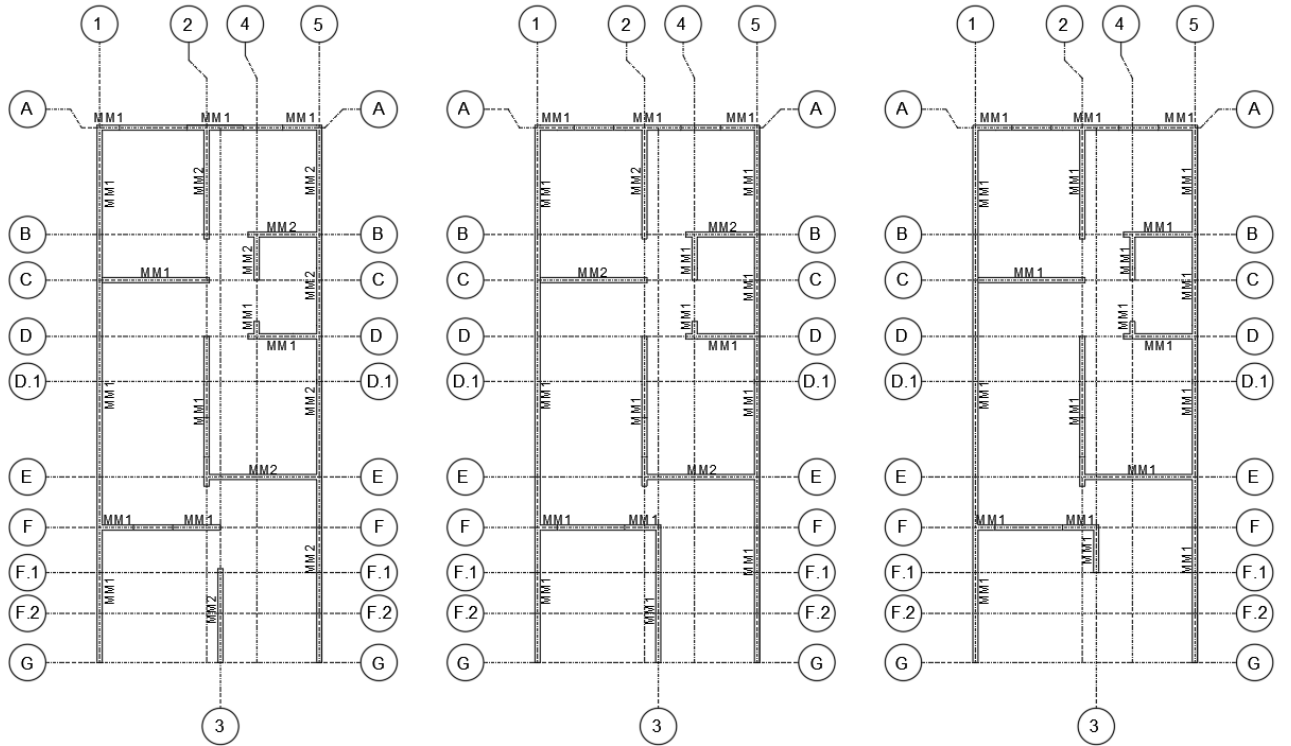


Fuente: Elaboración propia

Detallado de elementos estructurales en concreto reforzado

Se muestran los tres niveles en planta, donde se indica, los tipos de muro y columna, que se obtuvieron en el diseño estructural.

Figura 47. Planos en planta de los tipos de muro que se obtuvieron en el diseño estructural.



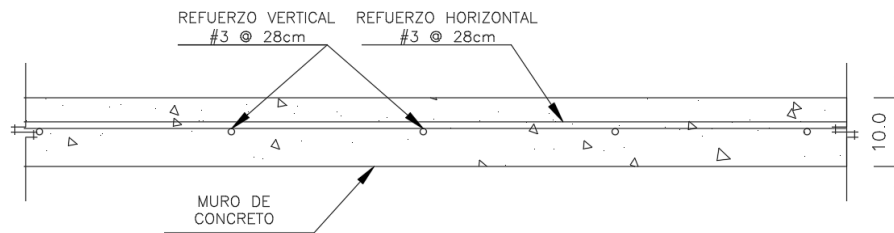
Planta Estructural Nivel 1

Planta Estructural Nivel 2

Planta Estructural Nivel 3

Fuente: Elaboración propia

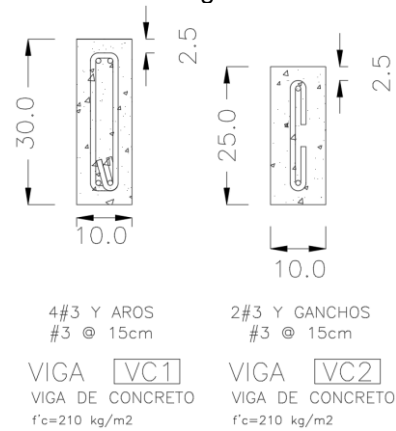
Figura 48. Detallado estructural del muro en concreto reforzado MC1.



MURO **MC1**
 MURO DE CONCRETO
 $f'c=210 \text{ kg/m}^2$

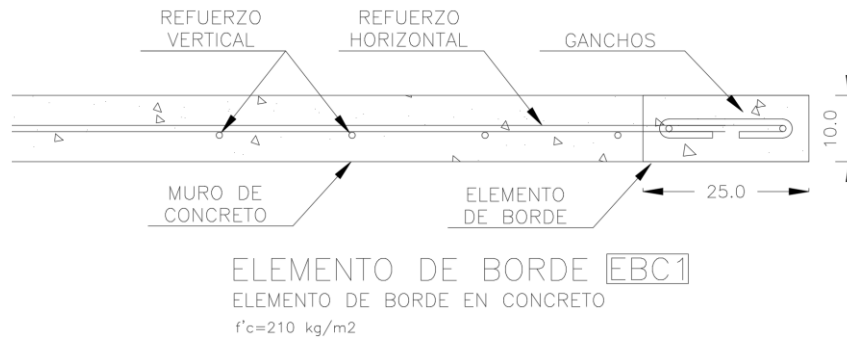
Fuente: Elaboración propia

Figura 49. Detallado estructural de viga en concreto reforzado VC1 y VC2.



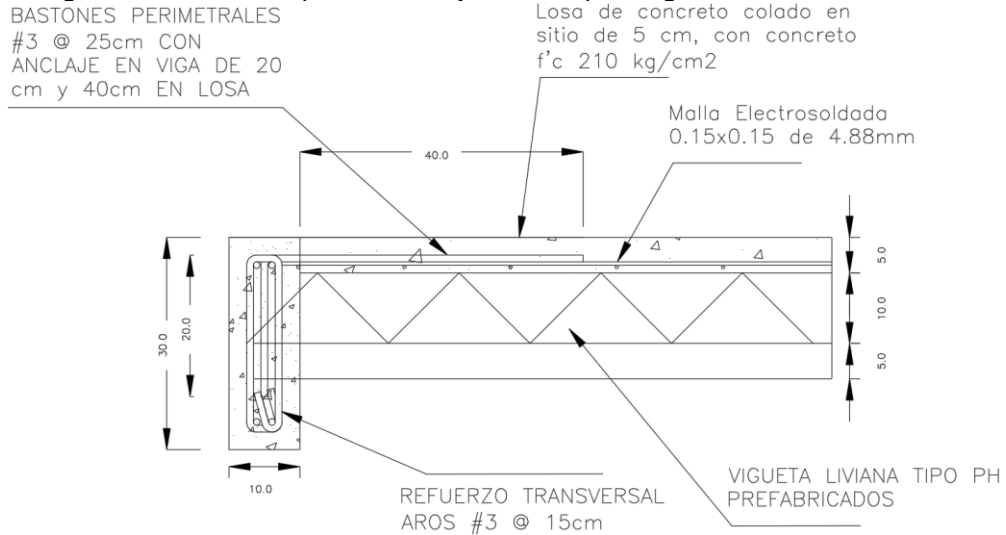
Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Detallado típico de elemento de borde para muros en concreto reforzado EBC1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Detallado típico de anclaje de entepiso-viga en concreto reforzado.



Fuente: Elaboración propia

Detallado de elementos estructurales en mampostería integral

Se muestran los tres niveles en planta, donde se indica, los tipos de muro y columna, que se obtuvieron en el diseño estructural.

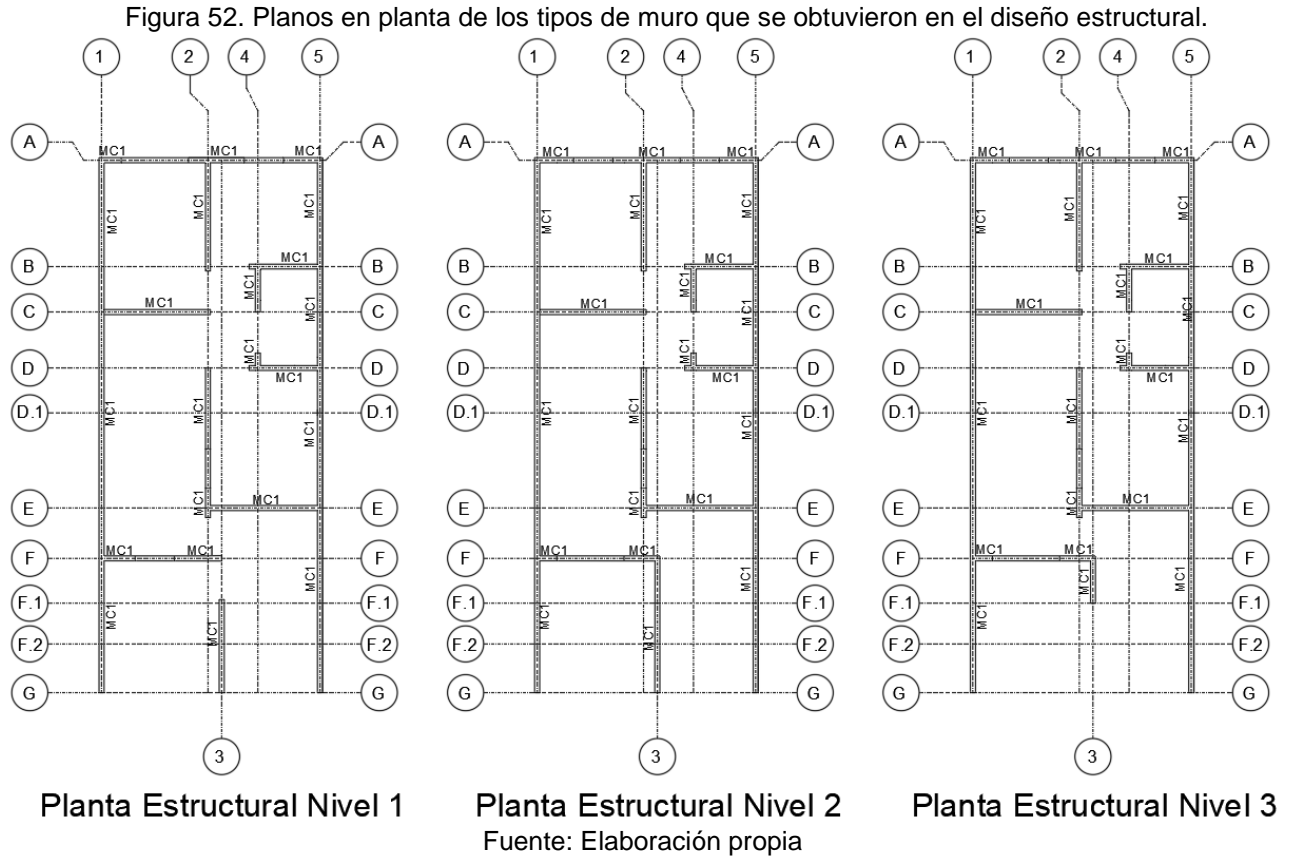
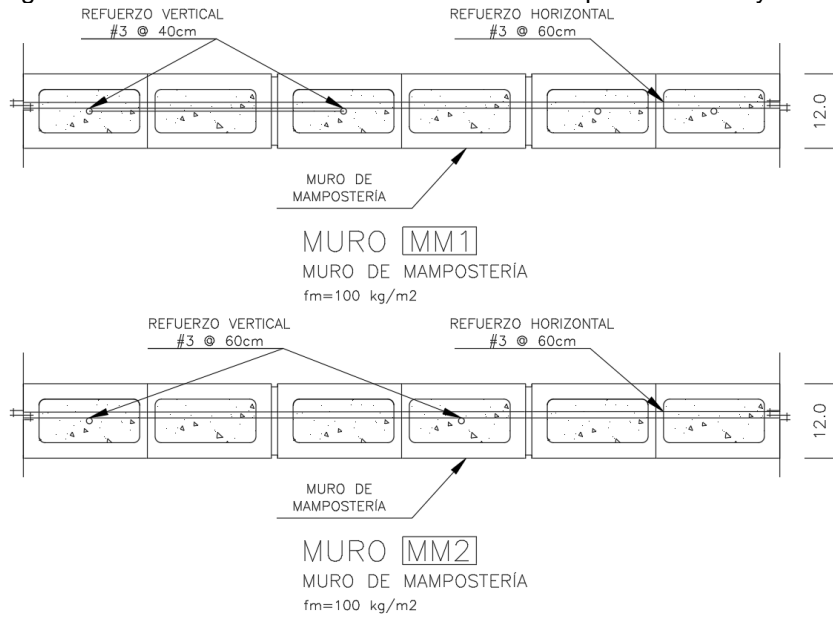
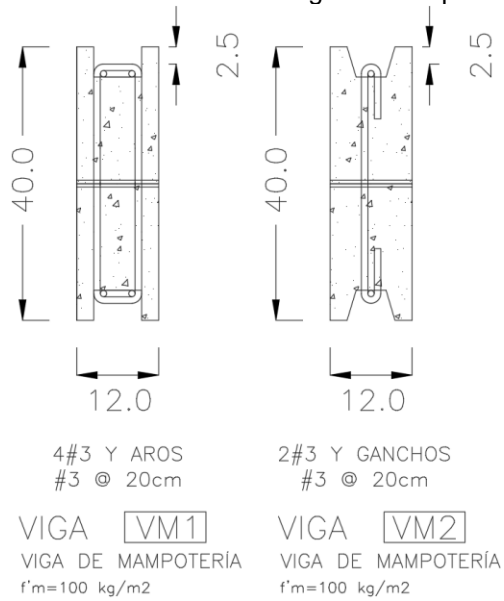


Figura 53. Detallado estructural del muro en mampostería MM1 y MM2.



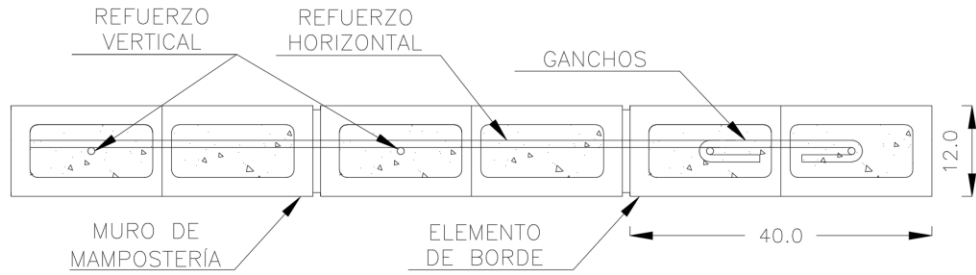
Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Detallado estructural de viga en mampostería VM1 y VM2



Fuente: Elaboración propia

Figura 55. Detallado típico de elemento de borde para muros en mampostería EBM1.



ELEMENTO DE BORDE EBM1

ELEMENTO DE BORDE EN MAMPOSTERÍA

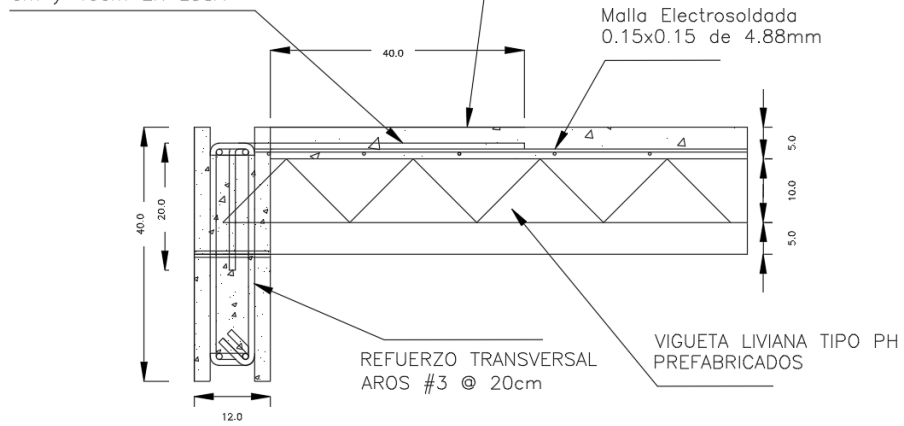
$f'c=210 \text{ kg/m}^2$

Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Detallado típico de anclaje de entrepiso-viga en mampostería.

BASTONES PERIMETRALES
#3 @ 25cm CON
ANCLAJE EN VIGA DE 20
cm y 40cm EN LOSA

Losa de concreto colado en
sitio de 5 cm, con concreto
 $f'c \text{ 210 kg/cm}^2$



Fuente: Elaboración propia

Cantidad de acero utilizado en el sistema de concreto reforzado

Se muestran los resultados obtenidos de la cantidad de acero necesaria, para los elementos estructurales, en concreto reforzado

Figura 57. Cantidad de acero para muros en concreto reforzado.

CANTIDAD DE ACERO EN MUROS PARA EL EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO										
Eje	Longitud de viga			Consideración de traslape % de traslape	Acero transversal				Acero longitudinal Cantidad Varilla #3 (m)	Cantidad de Varilla (unidades) Varilla #3
	I Nivel (m)	II Nivel (m)	III Nivel (m)		Separación acero longitudinal Nivel 1 (m)	Separación acero longitudinal Nivel 1 (m)	Separación acero longitudinal Nivel 1 (m)	Separación acero transversal (m)		
1	11.87	11.87	11.87	5	0.28	0.28	0.28	0.28	802.69	133.78
2.1	6.97	6.97	6.97	5	0.28	0.28	0.28	0.28	474.88	79.15
2.1	4.00	4.00	4.00	5	0.28	0.28	0.28	0.60	208.53	34.75
3	2.50	3.60	1.30	5	0.28	0.28	0.28	0.28	175.70	29.28
4	1.22	1.22	1.22	5	0.28	0.28	0.28	0.28	90.21	15.03
5	14.27	14.27	14.27	5	0.28	0.28	0.28	0.28	963.25	160.54
A	3.25	5.85	5.85	5	0.28	0.28	0.28	0.28	341.06	56.84
B	1.90	1.90	1.90	5	0.28	0.28	0.28	0.28	136.04	22.67
C	2.85	2.85	2.85	5	0.28	0.28	0.28	0.28	199.59	33.27
D	1.90	1.90	1.90	5	0.28	0.28	0.28	0.28	136.04	22.67
E	3.00	3.00	3.00	5	0.28	0.28	0.28	0.28	209.63	34.94
F	3.22	0.89	0.89	5	0.28	0.28	0.28	0.28	121.64	20.27
									Total	643

Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Cantidad de acero para vigas en concreto reforzado.

CANTIDAD DE ACERO EN VIGAS PARA EL EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO									
Eje	Longitud de viga			Consideración de traslape % de traslape	Acero transversal (aros y ganchos #3)			Acero longitudinal Cantidad Varilla #3 (m)	Cantidad de Varilla (unidades) Varilla #3
	I Nivel (m)	II Nivel (m)	III Nivel (m)		Separación de aros Nivel I y II (m)	Separación de ganchos Nivel III	Cantidad Varilla #3 en aros y ganchos (unidades)		
1	11.87	11.87	11.87	5	0.15	0.15	130.74	24.92	25.94
2	10.67	10.67	10.67	5	0.15	0.15	215.30	22.40	39.62
3	3.60	3.60	0.00	5	0.15	0.15	50.00	5.04	9.17
4	2.72	2.72	2.72	5	0.15	0.15	56.30	5.70	10.33
5	14.27	14.27	14.27	5	0.15	0.15	287.30	29.96	52.88
A	5.85	5.85	5.85	5	0.15	0.15	119.00	12.29	21.88
B	3.00	3.00	3.00	5	0.15	0.15	62.00	6.30	11.38
C	2.85	2.85	2.85	5	0.15	0.15	59.00	5.99	10.83
D	3.00	3.00	3.00	5	0.15	0.15	62.00	6.30	11.38
D.1	3.00	3.00	3.00	5	0.15	0.15	62.00	6.30	11.38
E	3.00	3.00	3.00	5	0.15	0.15	62.00	6.30	11.38
F	5.85	5.85	3.22	5	0.15	0.15	101.45	10.44	18.65
F.1	3.22	3.22	0.00	5	0.15	0.15	44.91	4.51	8.24
F.2	0.00	0.00	0.00	5	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00
G	2.63	2.63	2.63	5	0.15	0.15	54.64	5.53	10.03
								Total	253

Fuente: Elaboración propia

Cantidad de acero utilizado en el sistema de mampostería integral

Se muestran los resultados obtenidos de la cantidad de acero necesario, para los elementos estructurales, en concreto reforzado.

Figura 59. Cantidad de acero para muros en mampostería.

CANTIDAD DE ACERO EN MUROS PARA EL EDIFICIO DE MAMPOSTERÍA INTEGRAL										
Eje	Longitud de viga			Consideración de traslape	Acero transversal				Acero longitudinal Cantidad Varilla #3 (m)	Cantidad de Varilla (unidades) Varilla #3
	I Nivel (m)	II Nivel (m)	III Nivel (m)		% de traslape	Separación acero longitudinal Nivel 1 (m)	Separación acero longitudinal Nivel 1 (m)	Separación acero longitudinal Nivel 1 (m)		
1	11.87	11.87	11.87	5	0.4	0.4	0.4	0.60	487.53	81.25
2.1	2.97	2.97	2.97	5	0.6	0.6	0.4	0.60	113.48	18.91
2.2	4.00	4.00	4.00	5	0.4	0.4	0.4	0.60	170.28	28.38
3	2.50	3.60	1.30	5	0.6	0.4	0.4	0.60	103.10	17.18
4	1.22	1.22	1.22	5	0.6	0.4	0.4	0.60	54.85	9.14
5	14.27	14.27	14.27	5	0.6	0.4	0.4	0.60	548.14	91.36
A	3.25	5.85	5.85	5	0.4	0.4	0.4	0.60	209.21	34.87
B	1.90	1.90	1.90	5	0.6	0.6	0.4	0.60	75.92	12.65
C	2.85	2.85	2.85	5	0.4	0.6	0.4	0.60	116.66	19.44
D	1.90	1.90	1.90	5	0.4	0.4	0.4	0.60	85.57	14.26
E	3.00	3.00	3.00	5	0.6	0.6	0.4	0.60	114.71	19.12
F	3.22	0.89	0.89	5	0.4	0.4	0.4	0.60	76.87	12.81
									Total	359

Fuente: Elaboración propia

Figura 60 Cantidad de acero para vigas en mampostería.

CANTIDAD DE ACERO EN VIGAS PARA EL EDIFICIO DE MAMPOSTERÍA INTEGRAL									
Eje	Longitud de viga			Consideración de traslape	Acero transversal (aros y ganchos #3)			Acero longitudinal Cantidad Varilla #3 (m)	Cantidad de Varilla (unidades) Varilla #3
	I Nivel (m)	II Nivel (m)	III Nivel (m)		% de traslape	Separación de aros Nivel I y II (m)	Separación de ganchos Nivel III		
1	11.87	11.87	11.87	5	0.2	0.2	158.44	24.92	30.56
2	10.67	10.67	10.67	5	0.2	0.2	161.98	22.40	30.73
3	3.60	3.60	0.00	5	0.2	0.2	38.00	5.04	7.17
4	2.72	2.72	2.72	5	0.2	0.2	42.73	5.70	8.07
5	14.27	14.27	14.27	5	0.2	0.2	215.98	29.96	40.99
A	5.85	5.85	5.85	5	0.2	0.2	89.75	12.29	17.01
B	3.00	3.00	3.00	5	0.2	0.2	47.00	6.30	8.88
C	2.85	2.85	2.85	5	0.2	0.2	44.75	5.99	8.46
D	3.00	3.00	3.00	5	0.2	0.2	47.00	6.30	8.88
D.1	3.00	3.00	3.00	5	0.2	0.2	47.00	6.30	8.88
E	3.00	3.00	3.00	5	0.2	0.2	47.00	6.30	8.88
F	5.85	5.85	3.22	5	0.2	0.2	76.59	10.44	14.51
F.1	3.22	3.22	0.00	5	0.2	0.2	34.18	4.51	6.45
F.2	0.00	0.00	0.00	5	0.2	0.2	0.00	0.00	0.00
G	2.63	2.63	2.63	5	0.2	0.2	41.48	5.53	7.83
								Total	207

Fuente: Elaboración propia

Diferencias de cantidad de acero, entre ambos sistemas constructivos

Se muestran la cantidad de acero necesario, para los elementos estructurales tipo columna, en concreto reforzado.

Figura 61. Comparativa de acero necesario para los elementos estructurales

Comparativa de acero total entre elementos estructurales				
Elemento	Sistema Constructivo	Cantidad de varilla	Diferencia en el total de varillas	% de diferencia
Muros	Muro de 10 cm en concreto reforzado	658	286	43
	Muro de 12 cm en mampostería	372		
Vigas	Vigas de VC1y VC2	253	46	18
	Viga de VM1 y VM2	207		

Fuente: Elaboración propia

Áreas totales de pared según cada eje

Se muestran las áreas en m2 de pared, correspondiente a cada eje de la estructura

Figura 62. Metros cuadrados de pared en la estructura

	Área de pared (m2)			
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Área total
A	11.59	14.09	12.89	38.56
B	6.27	6.27	5.66	18.19
C	8.23	8.23	7.70	24.15
D	5.90	5.90	5.29	17.09
E	8.57	8.57	6.52	23.65
F	7.80	5.41	4.57	17.78
1	34.29	34.29	32.17	100.76
2	18.18	18.18	16.18	52.53
3	8.04	10.51	2.62	21.16
4	5.42	5.42	4.96	15.81
5	41.44	41.44	34.73	117.61
				447

Fuente: Elaboración propia

Cantidad de concreto en entrepiso

Se muestra a continuación cantidad en metros cúbicos, de concreto necesario para el colado de los elementos de concreto reforzado y el concreto de relleno de las celdas de los bloques de mampostería.

Figura 63. Metros cúbicos de concreto para la estructura en concreto reforzado

	Área en planta de entrepiso (m ²)	Concreto de losa de 5cm (m ³)	Concreto para relleno de viguetas (m ³)	Concreto total (m ³)
Nivel 1	65.39	3.27	0.14	3.41
Nivel 2	65.39	3.27	0.14	3.41
Nivel 3	3.60	0.18	0.01	0.19
			Total	7

Fuente: Elaboración propia

Figura 64. Metros cúbicos de concreto para la estructura en mampostería

	Área en planta de entrepiso (m ²)	Área de malla electrosoldada 15x15x4.88	Cantidad de unidades de malla
Nivel 1	65.39	13.20	5.45
Nivel 2	65.39	13.20	5.45
Nivel 3	3.60	13.20	0.30
		Total	11

Fuente: Elaboración propia

Cantidad de puntales necesarios

Se presenta a continuación la cantidad de puntales necesarios para lograr apuntalar de manera temporal el entrepiso.

Figura 65. Cantidad de puntales necesarios

Cantidad de puntales telescópicos	Puntales a cada 1.22 m
124	Unidades

Fuente: Elaboración propia

Cantidad de concreto utilizado en los elementos estructurales para el caso de concreto reforzado

Se muestran los metros cúbicos de concreto necesarios para los muros de concreto reforzado.

Figura 66. Metros cúbicos de concreto para estructura en concreto reforzado

CANTIDAD DE CONCRETO PARA EL ESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO					
	Área de pared (m ²)			Espesor (m)	Concreto (m ³)
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		
A	11.59	14.09	12.89	0.10	3.86
B	6.27	6.27	5.66	0.10	1.82
C	8.23	8.23	7.70	0.10	2.42
D	5.90	5.90	5.29	0.10	1.71
E	8.57	8.57	6.52	0.10	2.37
F	7.80	5.41	4.57	0.10	1.78
1	34.29	34.29	32.17	0.10	10.08
2	18.18	18.18	16.18	0.10	5.25
3	8.04	10.51	2.62	0.10	2.12
4	5.42	5.42	4.96	0.10	1.58
5	41.44	41.44	34.73	0.10	11.76
					45

Fuente: Elaboración propia

Cantidad de concreto utilizado en los elementos estructurales para el caso de concreto reforzado

Se muestran los metros cúbicos de concreto necesarios para los muros de concreto reforzado.

Figura 67. Metros cúbicos de concreto para estructura en concreto reforzado

CANTIDAD DE CONCRETO PARA EL ESTRUCTURA DE MAMPOSTERÍA INTEGRAL					
	Área de pared (m ²)			Cantidad de bloques (und)	Concreto de relleno de bloques (m ³)
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		
A	11.59	14.09	12.89	482	1.10
B	6.27	6.27	5.66	227	0.52
C	8.23	8.23	7.70	302	0.69
D	5.90	5.90	5.29	214	0.49
E	8.57	8.57	6.52	296	0.67
F	7.80	5.41	4.57	222	0.51
1	34.29	34.29	32.17	1259	2.87
2	18.18	18.18	16.18	657	1.49
3	8.04	10.51	2.62	265	0.60
4	5.42	5.42	4.96	198	0.45
5	41.44	41.44	34.73	1470	3.34
					13

Fuente: Elaboración propia

Resumen de costos para ambos sistemas estructurales

Se presenta un resumen general de los costos, únicamente de la parte obra gris, que es donde se centra este proyecto de graduación.

Figura 68. Resumen de costos para sistema de concreto estructural

Resumen de costos en materiales para el edificio en Concreto Reforzado			
	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Concreto f'c 210 (m3)	52	₺ 71,000.00	₺ 3,673,838.20
Bombeo (m3)	52	₺ 8,500.00	₺ 439,825.70
Apuntalamiento (unidad)	124	₺ 1,178.24	₺ 146,101.76
Sistema de entrepiso PH Prefabricado	131	₺ 14,500.00	₺ 1,896,165.00
Mano de obra por m3 de concreto colado	52	₺ 95,000.00	₺ 4,915,699.00
Varilla #3 grado 60 (unidad)	911	₺ 2,525.00	₺ 2,299,457.38
Alambre negro de amarre (kg)	92	₺ 820.00	₺ 75,272.85
Separadores de plástico para losa (kg)	269	₺ 114.00	₺ 30,635.90
Separadores de plástico para muro (kg)	1789	₺ 66.00	₺ 118,086.67
Desmoldante (gal)	14	₺ 40,000.00	₺ 559,122.50
Malla electrosoldada 15x15x4.88mm (unidad)	12	₺ 22,500.00	₺ 274,440.00
Formaleta metálica (m2)	447	₺ 9,802.08	₺ 4,384,448.94
Consumibles(Clavos, madera, etc)	10%		₺ 1,881,309.39
			₺ 20,694,403.29

Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Resumen de costos para sistema de mampostería integral

Resumen de costos en materiales para el edificio en Mampostería Integral			
	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Concreto f'c 175 (m3)	13	₺ 68,000.00	₺ 864,962.51
Bombeo concreto de entrepiso (m3)	7	₺ 8,500.00	₺ 59,622.40
Apuntalamiento (unidad)	124	₺ 1,178.24	₺ 146,101.76
Sistema de entrepiso PH Prefabricado	131	₺ 14,500.00	₺ 1,896,165.00
Bloques de Mampostería Clase A (unidad)	5591	₺ 460.00	₺ 2,571,963.50
Mano de obra por block colocado	5591	₺ 600.00	₺ 3,354,735.00
Malla electrosoldada 15x15x4.88mm (unidad)	12	₺ 22,500.00	₺ 274,440.00
Varilla #3 grado 60 (unidad)	579	₺ 2,525.00	₺ 1,462,723.98
Alambre negro de amarre (kg)	58	₺ 820.00	₺ 47,882.34
Mortero 175 kg/m2 (sacos)	280	₺ 4,895.00	₺ 1,368,452.32
Consumibles(Clavos, madera, etc)	10%		₺ 1,204,704.88
			₺ 13,251,753.69

Fuente: Elaboración propia

Duración aproximada de la construcción, según el sistema constructivo

Se muestra el cálculo realizado, para la estimación del tiempo necesario para la construcción de ambas obras.

Figura 70. Tiempo necesario para construcción mediante concreto reforzado

Tiempo de construcción utilizando concreto reforzado			
	Actividad	Rendimiento	Tiempo (horas)
Nivel 1	Colocación de acero (h/m ²)	0.04	8.75
	Colocación de formaleta (h/m ²)	0.28	43.60
	Colado de muros y losa (h/m ²)	0.03	6.56
	Tiempo de espera para desencofrado	-	24.00
	Desencofrado (h/m ²)	0.26	40.49
Nivel 2	Colocación de acero (h/m ²)	0.04	8.85
	Colocación de formaleta (h/m ²)	0.28	43.60
	Colado de muros y losa (h/m ²)	0.03	6.64
	Tiempo de espera para desencofrado	-	24.00
	Desencofrado (h/m ²)	0.26	40.49
Nivel 3	Colocación de acero (h/m ²)	0.04	5.33
	Colocación de formaleta (h/m ²)	0.28	43.60
	Colado de muros (h/m ²)	0.03	4.00
	Tiempo de espera para desencofrado	-	24.00
	Desencofrado (h/m ²)	0.26	40.49
Días de construcción			36

Fuente: Elaboración propia

Figura 71. Tiempo necesario para construcción mediante mampostería integral

Tiempo de construcción utilizando bloques de mampostería			
	Actividad	Rendimiento	Tiempo (horas)
Nivel 1	Confección de mortero y concreto de relleno (h/m ²)	0.04	6.23
	Acarreo de bloques y mortero (h/m ²)	0.33	51.39
	Colocación de acero muros y losa (h/m ²)	0.10	21.87
	Pega de bloques (h/m ²)	0.57	88.76
	Relleno de bloques (h/m ²)	0.17	26.47
	Colado de losa (h/m ²)	0.03	1.89
Nivel 2	Confección de mortero y concreto de relleno (h/m ²)	0.04	6.23
	Acarreo de bloques y mortero (h/m ²)	0.33	51.39
	Colocación de acero muros y losa (h/m ²)	0.10	22.13
	Pega de bloques (h/m ²)	0.57	88.76
	Relleno de bloques (h/m ²)	0.17	26.47
	Colado de losa (h/m ²)	0.03	1.89
Nivel 3	Confección de mortero y concreto de relleno (h/m ²)	0.04	6.23
	Acarreo de bloques y mortero (h/m ²)	0.33	51.39
	Colocación de acero muros y losa (h/m ²)	0.10	13.33
	Pega de bloques (h/m ²)	0.57	88.76
	Relleno de bloques (h/m ²)	0.17	26.47
Días de construcción			58

Fuente: Elaboración propia

Análisis de los resultados

Resultados obtenidos a partir del análisis estructural

De acuerdo con el análisis estructural de los modelos, se tiene que el diseño se realizó en una zona sísmica SIII, según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016). Para asignar una ubicación teórica específica, ambas estructuras se localizan en la zona de Pavas. Por no contar con estudio de suelos, se asigna un tipo de suelos S3.

Es importante recalcar, la importancia de realizar un estudio de suelos específico de la ubicación en la que se va a construir el proyecto. En este caso, se tomará el tipo de suelo S3 debido a que es un caso teórico, pero es fundamental efectuar un estudio de suelo, debido a que se puede obtener información acerca del nivel freático, que pueda perjudicar la capacidad portante del suelo, se puede tomar decisiones sobre que tipo de fundación utilizar, además, se puede verificar la calidad del terreno, debido a que puede tratarse de terrenos que han sido usados como relleno, lo que provocara inestabilidad y asentamientos en la estructura posterior a la construcción.

La estructura se clasifica como tipo muro, con una irregularidad en altura e irregularidad grave en planta, lo cual indica según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016) en la sección 4.4.3.b, se asigna una ductilidad local de 1. Esta irregularidad grave se debe a los espacios en planta que no cuentan con losa (ver en apéndices figura 75,76 y 77), lo que genera que el centro de masa se encuentre desplazado, y, en consecuencia, se dé una excentricidad con respecto al centro de rigidez (figura 36 y 37).

Con respecto a las cargas, se aplicó una SCM de 435 kg/cm², contemplando el peso del entrepiso, una carga viva de 200 kg/m² y una carga viva de 40 kg/m² para cubierta de techo, ambas obtenidas del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

Inicialmente para la estructura de concreto reforzado, se planteó un predimensionamiento de muro de 10cm de espesor, y viga de 12x40, sin embargo, al realizar las primeras iteraciones, se logró observar que con vigas de 10x30 y muros de 10cm, se cumplía con los requerimientos de derivas indicadas por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

Para el caso de mampostería integral, según el predimensionamiento inicial, las dimensiones mínimas establecidas de vigas de 40x12 y muros de bloques de 12cm, también cumplían con los requerimientos de las derivas dadas por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), y al ser las dimensiones mínimas posibles, se mantiene dicha propuesta.

En la figura 38 se muestra el cortante basal por la fuerza sísmica para ambos modelos. Se puede observar, que en ambas direcciones, la fuerza sísmica es mayor para el caso de la estructura en mampostería integral. En el eje ortogonal "x", la fuerza sísmica es 1.55 veces mayor y para el eje ortogonal "y" la fuerza sísmica es de 1.32 veces mayor, comparándolo con la estructura de concreto reforzado.

En la figura 39, se muestran los datos del porcentaje de participación de masas, en cada modo de vibración. Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en la sección 7.5.2.d, menciona que la suma de las masas en cada eje ortogonal debe sumar al menos 90%. En este caso, para el diseño en mampostería, se necesitaron 33 modos de vibración, para lograr un 90.39% de la participación de la masa en el eje ortogonal "x", dando como resultado en el eje "x" una participación de masa de 0.2855% en el modo de vibración 14, con un periodo de 0.072s, y en el eje "y", el mayor porcentaje de participación de masas es de 0.293 en el modo de vibración 5, con un periodo de 0.129s. Para el caso de la estructura en concreto reforzado, se necesitaron 36 modos de vibración, para lograr un 90.29% de la participación de la masa en el eje ortogonal x, dando como resultado en el eje "x" una participación de masa de 0.2921% con un periodo de 0.042s en el

modo de vibración 20, y en el eje “y”, el mayor porcentaje de participación de masas se dio en modo de vibración 6, con un porcentaje de 0.5927%, con un periodo de 0.078s.

Adicional a esto, en la figura 41 y 42, se muestran las derivas obtenidas para ambos modelos, y se observa que se encuentran por debajo de los límites, y controladas según las indicaciones del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), esto para ambos modelos.

Además, en las figuras 43 y 44, se muestran las deformaciones máximas dadas para la estructura de concreto reforzado, donde se tienen deformaciones de 0.000726m y 0.007838m para el eje ortogonal “x” y “y” respectivamente. Para la estructura de mampostería integral. En la figura 45 y 46, se muestra las deformaciones máximas de 0.002885m y 0.015894m para el eje ortogonal “x” y “y” respectivamente.

Con esto, se muestra que tanto para el eje ortogonal “x” y “y”, la estructura en mampostería tiene mayores deformaciones máximas. En el sentido “x”, la deformación máxima se encuentra en el eje C y en el sentido “y”, el eje donde se encuentra la mayor deformación es el eje 5 (ver figura 72, 73 y 74 en apéndices).

Al analizar la cantidad de modos de vibración, y los desplazamientos de cada modelo, se puede observar, que, para el caso de la estructura en concreto reforzado, tiene menores desplazamientos, esto debido a que el concreto reforzado tiene mayor rigidez que la mampostería, por lo tanto, necesita mayor cantidad de maneras de vibrar, para conseguir aportar la mayor cantidad de masa posible. Esto se da, debido a la resistencia a la compresión de ambos materiales, porque el concreto f_c 210kg/cm² es 53% más resistente que la mampostería clase A, con un f_m 100kg/cm².

Análisis de resultados obtenidos del diseño estructural

A nivel de diseño estructural, en el modelo de concreto reforzado, se tiene que la propuesta inicial de colocar muros de 10 cm de espesor, es acertada, esto porque al realizar el diseño estructural de los elementos tipo muro mediante flexocompresión y cortante, se verifica que solo necesitan la cuantía mínima de acero, es decir, la estructura de concreto estructural, es lo suficientemente rígida para resistir las cargas a las que está sometida, de modo que la necesidad de acero para soportar dichas cargas, es la mínima.

Según el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en la sección 8.6.4.a, menciona que la cuantía mínima de acero, tanto para el eje transversal como el longitudinal, no puede ser menor a 0.0025, esto quiere decir, que al utilizar una varilla #3, la separación máxima debe ser de 28 cm, para ambos sentidos de la malla de acero. Al realizar el diseño de los elementos, se logra verificar, que con varilla #3 a cada 28cm, en ambos sentidos, cumple con los requerimientos de diseño. Por lo tanto, se tiene únicamente un tipo de muro, el cual está detallado en la figura 48, como MC1.

Con las vigas de entepiso, solo se realizó la verificación de cumplimiento, del primer nivel, para poder verificar primero las vigas que teóricamente deberían de resistir mayores cargas, debido a que son las que soportan las cargas de los dos niveles superiores. Al estar siempre apoyadas sobre los muros, realmente no están sometidas a cargas importantes, de modo que al realizar el diseño de cada viga del primer nivel, se logra evidenciar, que con tan solo una varilla #3 en la parte inferior, es suficiente para soportar las cargas aplicadas, sin embargo, en la sección 8.2.2 del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), se menciona que como mínimo, los elementos a flexión deben estar conformados por dos varillas en la parte superior e inferior, además, por recomendación del profesor Hugo Navarro, para mayor facilidad constructiva, es recomendable utilizar vigas formadas por aros, por lo menos las vigas de entepiso. Para la viga corona, se tomó la decisión de reforzarla mediante ganchos, por no tener que empotrar las viguetas de entepiso y por no estar sometida a cargas importantes. El detallado final del muro y las vigas de entepiso, se muestran en la figura 48 y 49, respectivamente.

Finalmente, en la figura 50, se muestra el detallado de los elementos de borde y el detallado de la conexión viga-entepiso respectivamente. Para los muros de concreto reforzado, se hizo la verificación para ver la necesidad de colocar elementos de borde.

Según los requerimientos del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), en la sección 8.6.4, se indica que al existir esfuerzos mayores a 0.20 f_c , se deben colocar elementos de borde, sin embargo, se realizó la verificación para cada muro y no fue requerido utilizar elementos de borde, sin embargo, se deben colocar elementos de confinamiento.

Para el sistema en mampostería estructural, se tiene que inicialmente, se propone mampostería clase A, de 12x20x40 cm, esto como propuesta mínima, ya que, según la sección 9.7.10 del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), para edificios de 3 nivel, la relación entre la altura libre por nivel y el espesor, no debe ser mayor a 25, lo cual se cumple debido a que la altura de piso máxima es de 2.9 metros. En la figura 53, se muestra la planta estructural de los tres niveles, en donde se observa la distribución de dos tipos de muros (MM1 y MM2). Según la sección 9.3.3.c, del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016), se indica que la cuantía mínima vertical y horizontal mínima debe ser 0.002 veces el espesor por cada 100cm, lo cual, en nuestro caso, quiere decir que se necesita #3 a cada 60cm en cada dirección como mínimo.

Al efectuar el análisis por flexocompresión, por el método alternativo mencionado en la sección 9.7.6 del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016) y diseño por cortante, se logra obtener dos muros con diferente cuantía de acero. El muro MM1 (figura 53), el cual cuenta con un poco más del acero mínimo, este muro tiene una distribución de muro de #3 a cada 60cm para el acero transversal y #3 a cada 40cm para el acero longitudinal, y el muro MM2 (figura 53), que cuenta con la cuantía mínima de refuerzo, de #3 a cada 60cm en ambas direcciones.

Para el caso de las vigas (figura 54), al igual que con el modelo en concreto estructural, se analizaron las vigas del primer nivel únicamente. Al analizar cada una de las vigas, se encontró que igualmente solo se necesita un refuerzo #3 en la parte inferior, y con ello se cumpliría con las soluciones requeridas, sin embargo, también se propuso utilizar una viga con 4#3 para el refuerzo longitudinal, con aros a cada 20cm y para la viga corona, utilizar un gancho de acero refuerzo transversal a cada 20cm con 2#3 por acero longitudinal, y con esto los requerimientos en las vigas cumplen.

Finalmente, de la figura 57 a la 60, se muestran las cantidades de acero para cada elemento estructural de ambos modelos. En la figura 61, de manera comparativa, se muestran las cantidades totales de acero, para muros, vigas y columnas. La mayor diferencia de acero, se encuentra en el acero para muros. Con el sistema en concreto reforzado, se necesita 286 varillas #3 de más, en comparación con el sistema mampostería, y esto se debe a que según la cuantía de acero dada por el CSCR, la separación en el acero en concreto reforzado utilizando #3, es de 28 cm y en mampostería utilizando #3 a cada 60cm como máximo, lo que genera que se deba colocar mayor cantidad de varillas.

Comparación a nivel económico y tiempo de construcción, entre ambos modelos

En relación con la inversión económica para desarrollar la estructura, ya sea, en mampostería o en concreto reforzado, se tomarán en cuenta únicamente los insumos necesarios para levantar la estructura hasta la obra gris, no se contemplan acabados.

En primera instancia, se muestra la figura 68, la cual muestra el monto total de la obra desarrollada en concreto reforzado.

Entre los datos más importantes, entra el concreto bombeado, la mano de obra y la formaleta metálica. En el caso del concreto reforzado, se consultó a la concretera Precovensa S.A, sobre el costo del m³ de concreto, y se cotizó a ₡ 71,000/m³ de concreto con resistencia de f'c 210kg/cm², el cual puede variar, dependiendo de factores como la lejanía del proyecto. Luego, la mano de obra por m³ de concreto, lo que contempla, armado y desarmado de formaleta, armado de acero, vibrado del concreto y demás. Se consultó dicho costo a contratistas que se dedican a realizar este tipo de trabajos, y usualmente ronda cerca de ₡95,000/m³. Y finalmente, el precio del alquiler de formaleta, el cual se consultó a la empresa Equirenta, y ronda cerca de ₡9,800/m².

Con base en los precios consultados a maestros de obra y a empresas constructoras, el costo final de la obra mediante el sistema constructivo de concreto reforzado, es aproximadamente de ₡ 20,694,403.29.

Por otra parte, para el edificio en mampostería integral, los precios están mejor balanceados con cada uno de los aspectos que se toman en cuenta para realizar un presupuesto del costo total de la obra.

Entre los aspectos con mayor peso económico (figura 69), se señala el precio total de los bloques de concreto, en donde aproximadamente se necesitan 5591 unidades de bloque de 12x20x40 clase A, el cual tiene un costo unitario de ₡ 460, añadido a esto, la mano de obra para su colocación es uno de los ítems con

mayor peso en este presupuesto, el cual tiene un costo de ₡ 600 por bloque colocado, obteniéndose como precio por mano de obra por colocación de bloques un monto total de ₡3,354,735. Para el sistema estructural de mampostería, contemplado los puntos señalados en la figura 69, se tiene un costo total de ₡13,251,753.69.

Al realizar una comparación de precios entre ambos modelos, se obtiene que construir con el sistema de concreto reforzado es 35.84% más costoso, ya que, se estaría consumiendo ₡7,416,181.5 de más.

Es importante tomar en cuenta, el aspecto de rapidez constructiva. En la figura 70 y 71, se muestran los rendimientos y tiempos aproximados para la ejecución de ambas obras, obteniendo los tiempos de ejecución por nivel.

Para el caso del concreto reforzado, se utilizó los rendimientos calculados por Villegas (2012), con ello, se logra calcular que, se tardaría cerca de 36 días, en tener la estructura en obra gris.

Por otro lado, con respecto a la estructura en mampostería integral, se utilizaron los rendimientos calculados también por Villegas (2012), gracias esto, se obtuvo que, en el caso de mampostería, la construcción de la estructura tiene una duración de 58 días.

Esto quiere decir, que, en cuestión de rapidez constructiva, si se realiza la construcción mediante concreto reforzado, se estaría construyendo 38% más rápido.

Con respecto a facilidad constructiva, en el caso de la mampostería, existen algunas desventajas, debido a que se requieren controles de calidad más estrictos, ya que con facilidad se pueden generar errores con el plomado de las paredes, al tener que colocar bloque por bloque, se vuelve un factor importante en relación con la facilidad constructiva, tener que pasar bloque por bloque por medio del refuerzo longitudinal, por lo tanto, que es importante contar con mano de obra especializada.

En el caso del concreto reforzado, el mayor inconveniente en relación con el uso es que al utilizar paneles para encofrar, se requiere que el personal cuente con conocimiento en el uso de cada uno de los paneles, y su respectiva ubicación, de lo contrario, se generarían atrasos que no están contemplados. También, es importante recalcar, que debe verificarse el correcto posicionamiento de los separadores, para asegurar que el acero cuente con el recubrimiento necesario.

Conclusiones

En relación con el análisis de la Modalidad de vivienda Urbana, Inclusiva y Sostenible y el modelo BIM de la vivienda por diseñar, se concluye lo siguiente:

- ✓ La zona sísmica escogida es la zona S III., debido a que según los estudios realizados por el MIVAH, las zonas con mayor idoneidad para el desarrollo de la modalidad VUIS, cuentan con esta zona sísmica. Además, al no existir estudio de suelos, se estable el sitio de cimentación S3.
- ✓ El análisis del anteproyecto arquitectónico, evidencia que, por estar constituido en su mayor parte de muros, en todas sus divisiones y en su perímetro, la edificación se clasifica como un sistema estructural tipo muro.

Respecto al análisis estructural de ambos sistemas constructivos, se concluye que:

- ✓ Se determinó que las fuerzas sísmicas son mayores para la estructura en mampostería integral, aproximadamente 1.55 veces mayor en el eje "x" y 1.32 veces mayor en el eje "y"
- ✓ Se determinó que la estructura es irregular en altura e irregular grave en planta, lo cual conlleva a asignar una ductilidad local igual a 1, según lo menciona el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016) en el inciso 4.3.4.
- ✓ Se concluyó, mediante el análisis de las cargas a las que está sometida la estructura, que la sobre carga muerta es de 435 kg/cm², contemplando el peso del entrepiso, una carga viva de 200 kg/m² y una carga viva de 40 kg/m² para cubierta de techo, ambas obtenidas del CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).
- ✓ Se concluye que, para el caso del edificio en concreto reforzado, es necesario mayor cantidad de modos de vibración, para obtener un mínimo del 90% de la masa en cada uno de sus ejes ortogonales, para el caso de concreto reforzado se necesitaron 36 modos de vibración mientras que para el edificio en mampostería 33.
- ✓ Se demostró que las derivas para ambos modelos estructurales se encuentran controladas y dentro de los rangos establecidos como aceptables por el CSCR 2010/14 (CFIA, 2016).

En relación con el diseño estructural de ambos modelos, se concluye que:

- ✓ En el modelo de concreto reforzado, se obtuvo como resultado que todos los elementos sismorresistentes, cumplen con los requerimientos, utilizando la cuantía mínima de acero, tanto vigas como columnas.
- ✓ Se determinó, que, en el modelo de mampostería, se generaron dos tipos de muros: el MM1 con varilla #3 a cada 60cm en ambas direcciones y el MM2 #3 a cada 40cm para acero longitudinal y #3 a cada 60cm para el acero transversal. Al mismo tiempo, se obtiene que las vigas en mampostería solo necesitan una varilla #3 en la parte inferior, pero se tomó la decisión de colocar 4#3 con aros #3 a cada 20cm

En relación con la comparativa de los resultados entre los dos diseños estructurales, se concluye lo siguiente:

- ✓ Es necesario utilizar un 43% más de varilla para el caso de los muros en concreto reforzado, debido al cumplimiento de la cuantía mínima.
- ✓ Se determinó, mediante rendimientos, que el edificio en mampostería tardaría un total de 58 días para su construcción, mientras que, en concreto reforzado, se tendría una duración de 36 días.

Respecto al análisis económico, en relación con únicamente, la obra gris entre ambas estructuras, se concluye lo siguiente:

- ✓ El costo final de la obra gris es de ¢20,694,403.29 para el concreto reforzado y ¢13,251,753.69 para el de mampostería, existe una diferencia entre ellos de ¢7,442,649.60, por lo tanto se concluye que a nivel económico y solo en materiales para obra gris, es más rentable el edificio en mampostería integral
- ✓ Se concluye que, ambos modelos cuentan con elementos estructurales que cumplen en su totalidad con los requerimientos para garantizar que ambas estructuras se clasifican como sismorresistentes. Por lo tanto, al tener la modalidad VUIS, un enfoque hacia las familias de escasos recursos se determina que la estructura que se recomienda construir sea en mampostería integral, debido a su bajo costo en relación con la estructura en concreto reforzado.

Recomendaciones

- ✓ Se recomienda a los encargados de la modalidad VUIS, contactar a las escuelas de las universidades públicas y privadas, para que ofrezcan a los estudiantes quienes están culminando su carrera, desarrollar su trabajo final de graduación, y así terminar los diseños faltantes de este proyecto, que por cuestiones de alcance y tiempo, no se efectuaron, como es el caso del diseño de las cimentaciones, estructura de cerchas y diseño electromecánico, para que se contemplen en su totalidad, los diseños necesarios para que el edificio cumpla con todas las normas de seguridad.
- ✓ A los encargados de la modalidad VUIS, se les recomienda indicar a las futuras empresas desarrolladoras, que utilicen los resultados generados en este proyecto, únicamente para presupuestos y predimensionamiento de los elementos estructurales. El desarrollador deberá contratar a un ingeniero para que diseñe la estructura, con base en las condiciones reales de sitio.
- ✓ Al tratarse la Modalidad VUIS, proyectos con énfasis en la inclusividad, se recomienda tomar en cuenta aspectos fundamentales como lo es el acceso a la edificación a toda persona, como lo es el uso de ascensores, para que se puede acceder a los niveles superiores. Además, tomar las consideraciones necesarias para que ninguna persona se encuentre excluida al uso de las instalaciones, tanto en áreas comunes como privadas.
- ✓ Con respecto al tema de sostenibilidad, se recomienda a la Modalidad VUIS, en los diseños, tomar en cuenta aspectos de ahorro energético y de confort para los usuarios, como lo es el diseño arquitectónico contemplando ventilación cruzada, uso de equipo de bajo consumo de agua potable, aprovechamiento de luz natural, y otros aspectos que puedan ayudar a tener un uso consciente de los recursos.

Apéndices

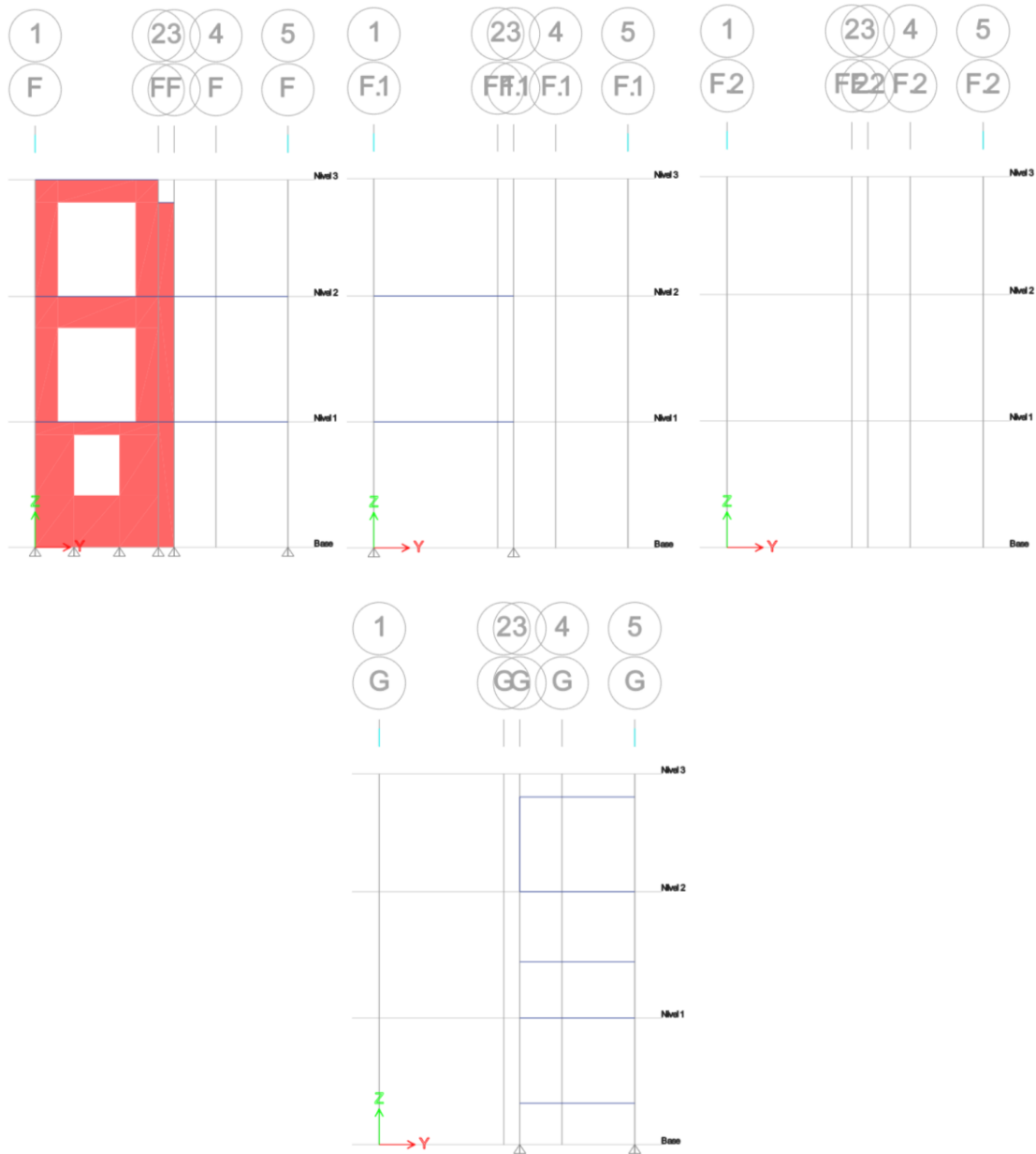
Imágenes de vista lateral de la estructura

Figura 72. Figuras de vista lateral del eje A al eje E.



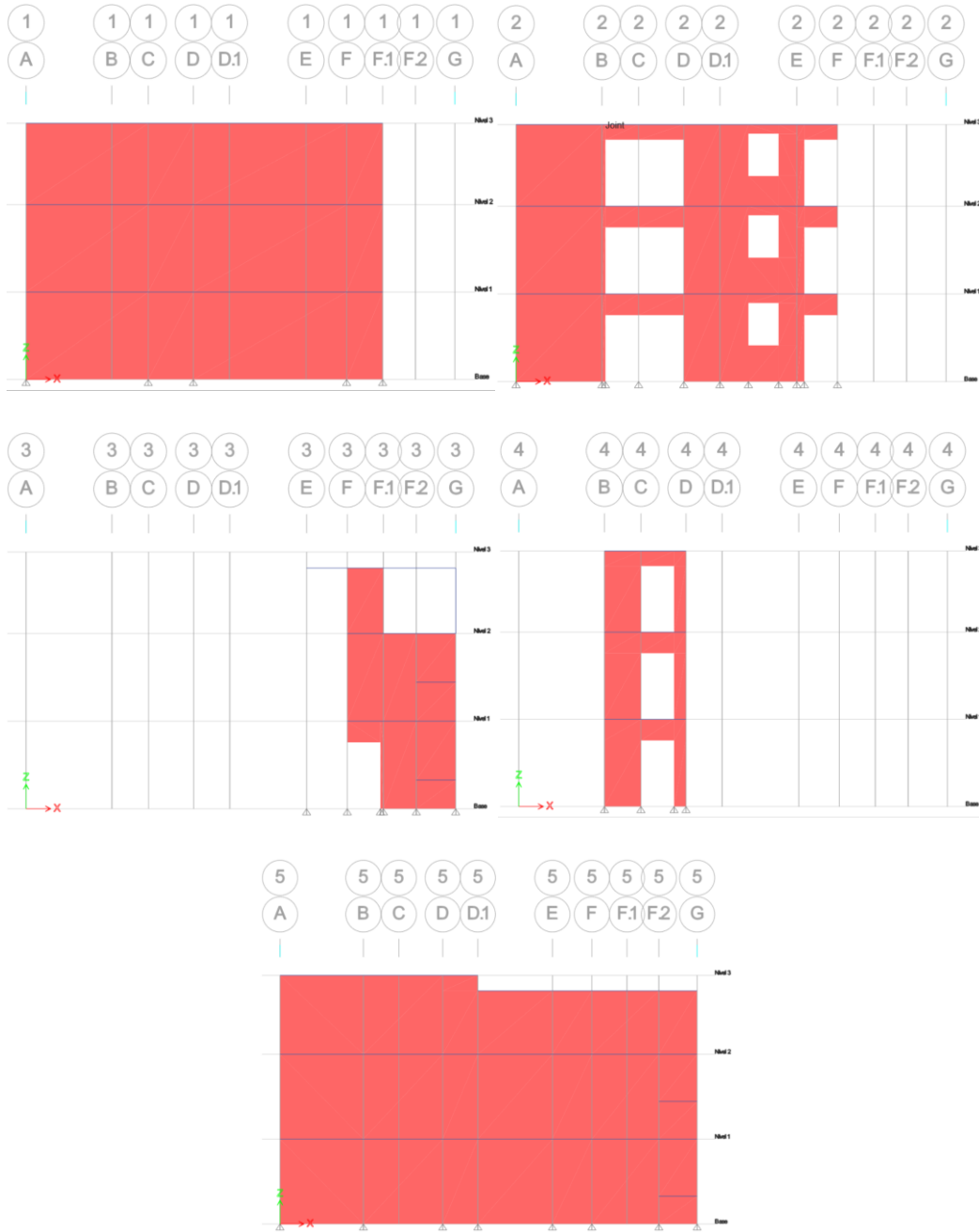
Fuente: Elaboración propia

Figura 73. Figuras de vista lateral del eje F al eje G.



Fuente: Elaboración propia

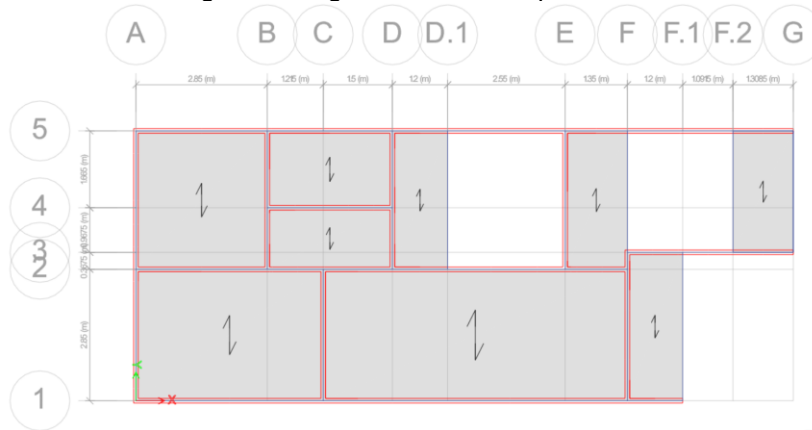
Figura 74. Figuras de vista lateral del eje 1 al eje 5.



Fuente: Elaboración propia

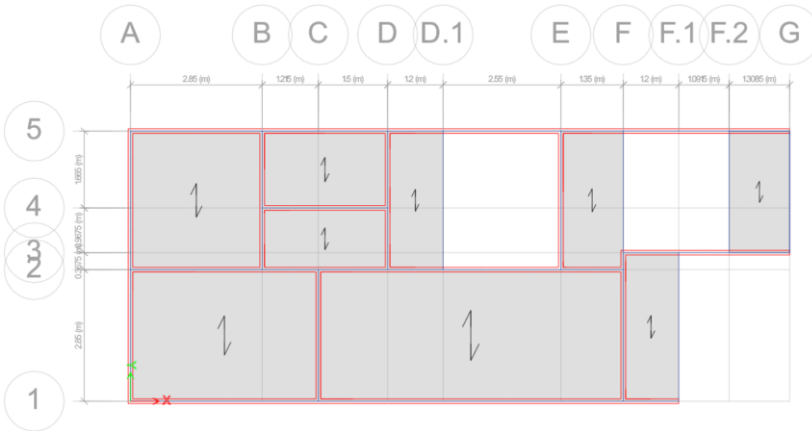
Imágenes de vista en planta de cada nivel

Figura 75. Figuras de vista en planta nivel 1



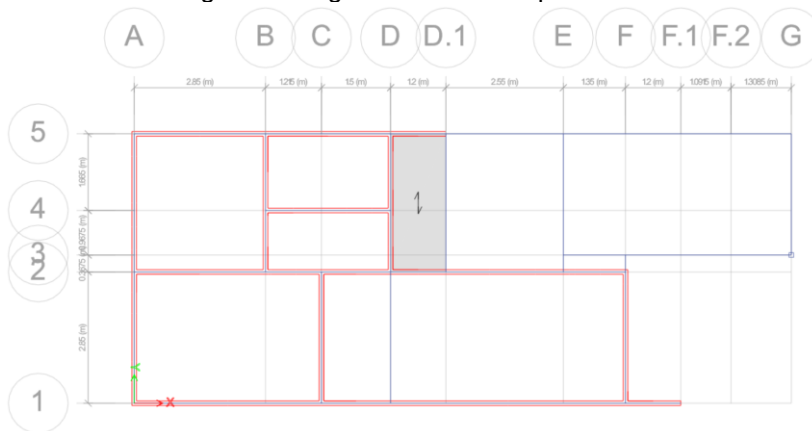
Fuente: Elaboración propia

Figura 76. Figuras de vista en planta nivel 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 77. Figuras de vista en planta nivel 3



Fuente: Elaboración propia

Anexos



Figura 78. Ficha técnica de viguetas Ph Prefabricados.

Entrepisos Tipo PH PREFABRICADOS

Diseño Viguetas de 15 con block de estereofon de 15

Uso para Cargas temporales unitarias mínimas de acuerdo al CSCR2010	CARGA TEMPORAL kg/m ²	SOBRECARGA ADICIONAL kg/m ²	CARGA SUPERIMPUESTA kg/m ²	ENTREPISO 20CM						
				VIGUETA VAB-2		VIGUETA VVB-2		VIGUETA VCB-2	VIGUETA VDB-2	VIGUETA VEB-2
				L _{max}		L _{max}		L _{max}	L _{max}	L _{max}
				m		m		m	m	m
				PESO 185,9 kg/m ²		CONCRETO DE SITIO 0,068 m ³ /m ²				
Habitación (casas de habitación, apartamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, edificios para internados en escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares). Azoteas con pendiente inferior a 5 por ciento.	200	50	250	3,69	4,23	4,70	5,28	5,78		
		75	275	3,60	4,12	4,59	5,15	5,64		
		100	300	3,52	4,03	4,48	5,04	5,52		
		125	325	3,44	3,94	4,38	4,93	5,40		
		150	350	3,37	3,86	4,29	4,84	5,30		
Oficinas, despachos, laboratorios, salones de lectura, aulas, salas de juego y similares.	250	50	300	3,46	3,97	4,41	4,98	5,64		
		75	325	3,39	3,88	4,32	4,88	5,52		
		100	350	3,32	3,80	4,23	4,78	5,40		
		125	375	3,25	3,73	4,15	4,68	5,30		
		150	400	3,19	3,66	4,07	4,60	5,20		
Voladizos en vía pública (marquesinas, balcones y similares). Garajes y aparcamientos (para automóviles exclusivamente).	300	50	350	3,28	3,75	4,18	4,71	5,52		
		75	375	3,21	3,68	4,10	4,62	5,40		
		100	400	3,15	3,61	4,02	4,54	5,30		
		125	425	3,10	3,55	3,95	4,46	5,20		
		150	450	3,04	3,49	3,88	4,38	5,11		
Escaleras, rampas, vestíbulos, pasajes de libre acceso al público. Lugares de reunión con asientos fijos, templos, cines, teatros, gimnasios, etc.	400	50	450	2,98	3,41	3,80	4,29	5,30		
		75	475	2,93	3,36	3,73	4,22	5,20		
		100	500	2,88	3,31	3,68	4,15	5,11		
		125	525	2,84	3,26	3,62	4,09	5,02		
		150	550	2,80	3,21	3,57	4,03	4,94		
Lugares de reunión desprovistos de asientos fijos, estadios, salones de baile, Bibliotecas, salones de archivo. Comercios, bodegas y fábricas de mercancía ligera.	500	50	550	2,75	3,15	3,50	3,96	5,11		
		75	575	2,71	3,11	3,46	3,90	5,02		
		100	600	2,67	3,07	3,41	3,85	4,94		
		125	625	2,64	3,03	3,37	3,80	4,87		
		150	650	2,61	2,99	3,32	3,75	4,80		
Comercios, bodegas y fábricas de mercancías con peso intermedio.	650	50	700	2,49	2,85	3,17	3,58	4,87		
		75	725	2,46	2,82	3,13	3,54	4,80		
		100	750	2,43	2,79	3,10	3,50	4,73		
		125	775	2,41	2,76	3,07	3,46	4,67		
		150	800	2,38	2,73	3,03	3,43	4,61		
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía pesada.	800	50	850	2,29	2,62	2,91	3,29	4,58		
		75	875	2,27	2,60	2,89	3,26	4,50		
		100	900	2,24	2,57	2,86	3,23	4,43		
		125	925	2,22	2,55	2,83	3,20	4,35		
		150	950	2,20	2,53	2,81	3,17	4,28		

Fuente: Entrepisos para casas prefabricadas (s. f.)

Figura 79. Zonas idóneas para el desarrollo de la Modalidad VUIS dentro de la GAM

DENTRO DE GAM									
Zonas Idóneas									
Provincia	Canton	Distrito	Anillo de Contencion	Zona PR de 2 a 4 P	Red Sanitaria AYA	900m.Estacion TEGAM	Lineas de Buses (IT)	Distrito prioritario	Idoneidad
San José	Alajuelita	Concepcion	SI	No Tiene PR	SI	NO	NO	NO	2.5
San José	Alajuelita	Alajuelita	SI	No Tiene	SI	NO	SI	NO	3.5
San José	Curridabat	Curridabat	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	Curridabat	Granadilla	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	Desamparados	Gravilias	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Desamparados	San Rafael Abajo	SI	SI	SI	NO	NO	NO	3
San José	Desamparados	San Antonio	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Desamparados	Desamparados	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Desamparados	Damas	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Desamparados	Los Guido	SI	SI	SI	NO	NO	SI	4
San José	Desamparados	San Miguel	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Goicoechea	San Francisco	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	Goicoechea	Calle Blancos	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	Goicoechea	Purrul	SI	SI	SI	NO	NO	SI	4
San José	Goicoechea	Ipis	SI	SI	SI	NO	NO	NO	3
San José	Goicoechea	Mata de Platano	SI	SI	SI	NO	NO	NO	3
San José	Goicoechea	Guadalupe	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Montes de Oca	San Pedro	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	Montes de Oca	San Rafael	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Montes de Oca	Mercedes	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Montes de Oca	Sabanilla	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Moravia	La Trinidad	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Moravia	San Vicente	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	San José	San Francisco de Dos Rios	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	San José	Catedral	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	San José	San Sebastian	SI	SI	SI	NO	SI	SI	5
San José	San José	Zapote	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	San José	Hatillo	SI	SI	SI	NO	SI	SI	5
San José	San José	Hospital	SI	SI	SI	SI	SI	SI	5
San José	San José	El Carmen	SI	SI	SI	SI	SI	NO	4
San José	San José	Mata Redonda	SI	SI	SI	SI	SI	NO	4
San José	San José	Merced	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	San José	Pavas	SI	SI	SI	SI	SI	SI	6
San José	San José	Uruca	SI	SI	SI	SI	SI	SI	6
San José	Tibas	San Juan	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	Tibas	Cinco Esquinas	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	Tibas	Anselmo Llorente	SI	SI	SI	SI	SI	NO	5
San José	Tibas	Leon XIII	SI	SI	SI	NO	SI	SI	6
San José	Tibas	Colima	SI	SI	SI	SI	SI	NO	4
San José	Vasquez de Coronado	San Isidro	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4
San José	Vasquez de Coronado	Patalillo	SI	SI	SI	NO	SI	NO	4

Fuente: Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (2022)

Figura 80. Zonas idóneas para el desarrollo de la Modalidad VUIS fuera de la GAM

FUERA DE GAM									
Zonas Idóneas									
Provincia	Canton	Distrito	Centralidad Urbana	Zona PR de 2 a 4 P	Red Sanitaria AYA	Servicios Básicos	Canton CNE-MIVAH	Distrito prioritario	Idoneidad
Alajuela	Palmares	Palmares	Palmares	No tiene PR	SI	SI	NO	NO	2.5
Guanacaste	Cañas	Cañas	Cañas	SI	SI	SI	SI	SI	5
Guanacaste	Liberia	Liberia	Liberia	SI	SI	SI	NO	SI	4
Guanacaste	Nicoya	Nicoya	Nicoya	SI	SI	SI	NO	SI	4
Limon	Guapiles	Guapiles	Guapiles	SI	SI	SI	SI	SI	5
Limon	Limon	Limon	Limon	SI	SI	SI	NO	SI	4
Puntarenas	Corredores	Corredor	Ciudad Neilly	Sin PR para CU	SI	SI	NO	NO	2.5
Puntarenas	Golfito	Golfito	Golfito	Sin PR para CU	SI	SI	NO	SI	3.5
Puntarenas	Garabito	Jaco	Jaco	Sin PR para CU	SI	SI	NO	SI	3.5
Puntarenas	Osa	Palmar	Palmar Norte	Sin PR para CU	SI	SI	SI	NO	3.5

Fuente: Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (2022)

Referencias

- American Society of Civil Engineers (ASCI). (2017). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16).
- Bondarenko, & García, I. (2012). Manual de cálculo y diseño de muros estructurales de concreto armado [Tesis de licenciatura]. Universidad de Carabobo.
- Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). (2022). American Concrete Institute (ACI). https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U19&Language=English&Units=US_Units
- Carranza, M. (2019). Estructuras de mampostería [Diapositivas]. Tecnológico de Costa Rica.
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2016) Revisión 2014. Código Sísmico de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Corrales, F. (2021). Diseño de un modelo BIM para vivienda social, vertical, en huella pequeña, y sostenible para los distritos centrales del cantón de San José y otros núcleos urbanos [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Entrepisos para casas prefabricadas. (s. f.). PH Prefabricados. Recuperado 28 de agosto de 2023, de <http://phprefabricados.com/casas-prefabricadas.html>
- García, M., & Monasterio, N. (2018). Introducción a la ciencia de los materiales y sus propiedades. Universidad del País Vasco. Recuperado 05 de diciembre de 2023, de https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/51172/mod_resource/content/0/Tema%207-Rotura%20y%20fallo%20mec%C3%A1nico%20de%20los%20materiales.pdf
- Guasch, A. (2017). Metodología para la inspección estructural en los procesos de mampostería en los proyectos de la empresa Miguel Cruz y Asoc. LTDA. [Tesis de Licenciatura]. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Harmsen, T. (2002). Diseño de estructuras de concreto reforzado (3.a ed.). <https://stehven.files.wordpress.com/2015/06/disenodeestructurasdeconcretoharmsen.pdf>
- Hidalgo, D. (2020, 13 febrero). Muros de mampostería en Costa Rica. Blog LanammeUCR. <https://bloglanammeucr.wordpress.com/2020/02/13/muros-de-mamposteria-en-costa-rica/#:~:text=En%20el%20primero%2C%20las%20paredes,para%20confinar%20pa%C3%B1os%20de%20mamposter%C3%ADa.>
- Linkimer, L. (2020). Ciencia ciudadana y herramientas de comunicación en la Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica. Revista Comunicación. https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/82254/Linkimer_Arroyo_2020_App.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2017). Diseño de Concreto reforzado (10.a ed.). <https://www.libreriaingeniero.com/2020/06/disenodeconcreto-reforzado-jack-mccormac-10ma-edicion.html>

- Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos (MIVAH). (2020). Recuperado 18 de septiembre de 2023, de https://www.mivah.go.cr/Vivienda_Urbana_Inclusiva_Sostenible.shtml
- Navarro, H. (2016). Fundamentos de análisis y diseño de estructuras en mampostería, basado en el Código Sísmico de Costa Rica 2010. Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Navas, A., & Fonseca, C. (2017, 19 enero). Vista de densidad de la mampostería de concreto en Costa Rica. Revista de la Universidad de Costa Rica. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/21746/27964>
- Moliní, F., & Salgado, M. (2012, 15 enero). Los impactos ambientales de la ciudad de baja densidad en relación con los de la ciudad compacta. Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales. Recuperado 18 de septiembre de 2022, de <https://www.ub.edu/geocrit/b3w-958.htm>
- Ortiz, L. (2007). Resistencia de materiales (3.a ed.). McGraw-Hill. <https://es.pdfdrive.com/resistencia-de-materiales-e183942725.html>
- Páez, D., Parra, S., & Montaña, C. (2006). Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería. <https://www.redalyc.org/pdf/4139/413940754001.pdf>
- Peralta, M., (2018). Modelado en SAP 2000. Análisis Estructural. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Pytel, A., & Singer, F. (2008). Resistencia de materiales (4.a ed.). Alfaomega. <https://www.libreriaingeniero.com/2017/07/resistencia-de-materiales-4ta-edicion-andrew-pytel-ferdinand-singer.html>
- Tena, A., Chinchilla, K., & Juárez, G. (2013). Evaluación de la flexibilidad elástica de sistemas de piso utilizados en edificios urbanos. Ingeniería sísmica. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2013000200006
- Uribe, J. (2022). Análisis de estructuras (2.a ed.). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1796/AnalisisdeEstructurasJairoUribe.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Vargas, M. (2014). Hacia una nueva política de densificación de las ciudades en Costa Rica. En Revistarquis. https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/revistarquis/article/view/14661/pdf_21
- Vázquez, & López. (2001). El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural. Editorial Noela.
- Villegas, J. (2012). Estimación de los rendimientos de mano de obra para el sistema constructivo de viviendas de concreto colado en sitio, empleado en el proyecto de vivienda La Campiña. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Wight, J. (2015). Reinforced Concrete Mechanics and Design (7.a ed.). Pearson.