



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Estructuras

**COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CARGAS DE TRABAJO
DEBIDO A CAMBIOS DE MASAS Y RIGIDEZ DE UNA ESTRUCTURA DURANTE SU
PROCESO CONSTRUCTIVO EN ÁREAS DE ÍNDICE DE SISMICIDAD MAYOR A 4 SEGÚN
NSE DE AGIES**

Ing. Cristián Renato Vásquez De León

Asesorado por Mtra. Inga. Ana Celeste Coutiño Mendizábal

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CARGAS DE TRABAJO
DEBIDO A CAMBIOS DE MASAS Y RIGIDEZ DE UNA ESTRUCTURA DURANTE SU
PROCESO CONSTRUCTIVO EN ÁREAS DE ÍNDICE DE SISMICIDAD MAYOR A 4 SEGÚN
NSE DE AGIES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. CRISTIÁN RENATO VÁSQUEZ DE LEÓN
ASESORADO POR MTRA. INGA. ANA CELESTE COUTIÑO MENDIZABAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escovedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Adolfo Orozco Coloma
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CARGAS DE TRABAJO
DEBIDO A CAMBIOS DE MASAS Y RIGIDEZ DE UNA ESTRUCTURA DURANTE SU
PROCESO CONSTRUCTIVO EN ÁREAS DE ÍNDICE DE SISMICIDAD MAYOR A 4 SEGÚN
NSE DE AGIES**



Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrados de la Facultad de Ingeniería, con fecha 14 de enero de 2022.

Ing. Cristián Renato Vásquez De León

LNG.DECANATO.OI.463.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CARGAS DE TRABAJO DEBIDO A CAMBIOS DE MASAS Y RIGIDEZ DE UNA ESTRUCTURA DURANTE SU PROCESO CONSTRUCTIVO EN ÁREAS DE ÍNDICE DE SISMICIDAD MAYOR A 4 SEGÚN NSE DE AGIES**, presentado por: **Ing. Cristián Renato Vásquez De León**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada 
Decana

Guatemala, mayo de 2023
AACE/gaoc



Guatemala, mayo de 2023

LNG.EEP.OI.463.2023

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CARGAS DE TRABAJO DEBIDO A CAMBIOS DE MASAS Y RIGIDEZ DE UNA ESTRUCTURA DURANTE SU PROCESO CONSTRUCTIVO EN ÁREAS DE ÍNDICE DE SISMICIDAD MAYOR A 4 SEGÚN NSE DE AGIES”

presentado por **Ing. Cristián Renato Vásquez De León** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 10 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CARGAS DE TRABAJO DEBIDO A CAMBIOS DE MASAS Y RIGIDEZ DE UNA ESTRUCTURA DURANTE SU PROCESO CONSTRUCTIVO EN ÁREAS DE ÍNDICE DE SISMICIDAD MAYOR A 4 SEGÚN NSE DE AGIES** del estudiante **Cristián Renato Vásquez De León** quien se identifica con número de carné **202190594** del programa de Maestría En Estructuras.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador
Maestría En Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 10 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS POR CARGAS DE TRABAJO DEBIDO A CAMBIOS DE MASAS Y RIGIDEZ DE UNA ESTRUCTURA DURANTE SU PROCESO CONSTRUCTIVO EN ÁREAS DE ÍNDICE DE SISMICIDAD MAYOR A 4 SEGÚN NSE DE AGIES"** del estudiante **Cristián Renato Vásquez De León** del programa de **Maestría En Estructuras** identificado(a) con número de carné 202190594.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtra. Inga. Ana Celeste Coutiño Mendizabal
Colegiado No. 8757
Asesora de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la capacidad y sabiduría para cumplir una meta más en mi vida.
Mis padres	Iracema Ivonne De León Urizar y Juan Woanerges Vásquez García.
Mi hermana	Laura Isabel Vásquez De León.
Mis abuelos	Juan Vicente Vázquez López, Virginia Isabel García Pérez, Laura Joaquina Urizar Fuentes y Walter Noel De León Flores (q. e. p. d.).
Mis amigos	Claudia Alejandra Rojas Lima, Carlos García Robles, Daniel Córdova Monterroso y Rafael de Jesús Vélez López.

AGRADECIMIENTOS A:

Escuela de Estudios de Postgrados	Por brindarme la oportunidad de pertenecer a esta casa de estudios y poder superar mis metas académicas de forma ética y profesional.
Mis padres	Por brindarme lo mejor de ellos en todo momento, luchar por mis sueños y siempre tener un hogar cálido lleno de valores.
Mis amigos	Por apoyarme en los momentos que más necesité e impulsarme a seguir adelante.
Inga. Celeste Coutiño	Por asesorarme y darme su apoyo durante el proceso de investigación.
Ing. Bladimir Chicas Paz	Por el apoyo durante la ejecución del proyecto, y la confianza para el diseño y análisis estructural.
Ing. Iván Andrés De León Pac	Por el apoyo durante el análisis y diseño de la estructura.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. MÉTODOS DE ANÁLISIS	1
1.1. Procesos estocásticos.....	1
1.1.1. Funciones de correlación.....	3
1.1.2. Análisis de Fourier	4
1.1.3. Funciones de densidad espectral	4
1.1.4. Funciones de transferencia.....	5
1.1.5. Funciones de coherencia.....	6
1.2. Método MIMO (<i>Multiple input – multiple output</i>)	6
2. SISTEMAS ESTRUCTURALES Y AFECTACIONES AMBIENTALES	9
2.1. Eventos de sitio	10
2.2. Sistemas estructurales para viviendas	14
3. MODELO EXPERIMENTAL	17
3.1. Parámetros iniciales para modelos de análisis.....	18

3.2.	Análisis y diseño	20
3.2.1.	Espectro de diseño sísmico para Santa Catarina Pinula	20
3.2.2.	Modelo matemático en ETABS para estructura completa.....	24
3.2.3.	Modelo matemático en ETABS para estructura hasta primer nivel de construcción.	35
3.2.4.	Modelo matemático en ETABS para estructura modificada.	40
4.	INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO.....	45
4.1.	Acelerómetros	48
4.2.	Deformímetros	49
4.3.	Anemómetros.....	51
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
5.1.	Formas modales	53
5.2.	Desplazamientos laterales	56
5.3.	Fuerzas laterales y masa	57
5.4.	Consideraciones	58
	CONCLUSIONES.....	61
	RECOMENDACIONES	63
	REFERENCIAS	65
	APÉNDICE	69
	ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Clasificación de los procesos aleatorios.....	1
2.	Relaciones lineales para analizar señales	2
3.	Relaciones cuadráticas para analizar señales.	3
4.	Algoritmo de identificación mimo.....	7
5.	Placas tectónicas de Guatemala.....	9
6.	Cinturón de fuego.....	10
7.	Ubicación de epicentros de sismos de Guatemala	12
8.	Mapa de zonificación sísmica de Guatemala	14
9.	Fotografía de área para construcción de vivienda.	18
10.	Espectro de diseño.....	23
11.	Definición de material para muro de mampostería de block clase B....	26
12.	Definición de material concreto	27
13.	Definición de material de acero de refuerzo	28
14.	Definición de espectro de diseño	29
15.	Perspectiva 3d de modelo matemático	30
16.	Perspectiva de planta de nivel base de modelo analítico.....	31
17.	Perspectiva de planta de nivel 1 de modelo matemático	32
18.	Perspectiva de planta de nivel 2 de modelo matemático	33
19.	Comportamiento por sismo dinámico de estructura	34
20.	Participación de masa	35
21.	Derivas máximas del sistema.....	35
22.	Perspectiva 3d de estructura con primer nivel construido.....	36
23.	Participación de masa de estructura con primer nivel de construcción..	37

24.	Derivas máximas del sistema con primer nivel de construcción	38
25.	Fotografía de construcción de elementos verticales de primer nivel.....	39
26.	Fotografía de losa de primer nivel.....	39
27.	Perspectiva en elevación de eje 5 de la estructura.....	40
28.	Sección de viga compuesta para refuerzo de eje 5	41
29.	Comportamiento de estructura modificada por sismo dinámico	42
30.	Participación de masa de estructura modificada	43
31.	Derivas máximas del sistema con primer nivel de construcción	43
32.	Fotografía de fundición de losa de segundo piso	43
33.	Colocación de viga de acero para refuerzo de eje 5.....	44
34.	Espectro sísmico.....	45
35.	Proceso de recolección de datos	47
36.	Sistema masa-resorte.....	49
37.	Deformímetro de lamina	50
38.	Transformador LVDT (transformador diferencial de variación lineal)....	50
39.	Anemómetro tipo robinson.....	51

TABLAS

I.	Historia sísmica de guatemala.....	11
II.	Sistema de muros E2.....	15
III.	Irregularidades en elevación	15
IV.	Irregularidades en planta	16
V.	Parámetros de diseño y revisión.....	17
VI.	Parámetros para consideración de sismo.....	19
VII.	Cargas para análisis y diseño.....	20
VIII.	Propiedades de muro de mampostería.....	24
IX.	Cálculo de espesor equivalente y peso volumétrico de muro de mampostería.....	25

X.	Factores para monitoreo estructural.....	46
XI.	Comparación de periodo de respuesta de estructura.....	53
XII.	Comparación de participación de masa	55
XIII.	Comparación de derivas máximas	57
XIV.	Comparación de masas y fuerzas laterales	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
hn	Altura total del edificio expresado en metros
Hp	Altura por nivel del edificio expresado en metros
Sv	Carga sísmica vertical
Fa	Coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos
Fv	Coeficiente de sitio para periodos de vibración largos
Na	Coeficiente por proximidad de las amenazas especiales para periodos de vibración cortos
Nv	Coeficiente por proximidad de las amenazas especiales para periodos de vibración largos
Cs	Coeficiente sísmico
Δu	Deriva máxima tolerable expresada en metros
R	Factor de reducción de respuesta sísmica
Kd	Factor de determinación de los niveles de diseño
Io	Índice de sismicidad
kgf	Kilogramo fuerza, unidad de medida de fuerza
kg	Kilogramo, unidad de cantidad de materia.
m	Metro, unidad de medida de longitud
Scr	Ordenada espectral de periodo corto del sismo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés
S1r	Ordenada espectral de periodo 1 segundo del sismo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés

S1s	Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración de 1 segundo
Scs	Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto
Sa(T)	Ordenada espectral para un periodo T
Ts	Periodo expresado en segundos que separa los periodos cortos de los largos
Ta	Periodo fundamental de vibración expresado en segundos
To	Periodo expresado en segundos que define el inicio de la meseta de períodos cortos del espectro

GLOSARIO

Análisis modal	Es una técnica de análisis dinámico de una estructura con frecuencias y modos naturales al igual que el amortiguamiento.
Análisis no lineal	Análisis sísmico que considera la degradación de los elementos estructurales hasta acercarse al rango inelástico de un sistema estructural.
Block	Unidad de mampostería hecha de concreto utilizada para apilar con mortero y formar un muro de carga para una estructura.
Deriva	Desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical.
Espectro de diseño	Es la respuesta de vibración de un edificio durante un evento sísmico.
Masa	Es la magnitud física de la cantidad de materia que contiene la estructura.
Mocheta	Elemento vertical para mampostería confinada de concreto reforzado.

Modo de vibración	Es la forma específica de cómo vibra un sistema estructural.
Mortero	Mezcla de arena, cemento, y agua para pegar unidades de block.
Rigidez	Resistencia a la deformación de un sistema estructural.
Sistema estructural	Es la clasificación de un edificio que depende de los elementos que soportaran las cargas laterales y gravitacionales.
Solera	Elemento horizontal para mampostería confinada de concreto reforzado.

RESUMEN

En esta investigación se realiza un diseño estructural y seguimiento durante la construcción por medio de un modelo matemático para una estructura designada para una vivienda unifamiliar, ubicada por el kilómetro 16.5 Carretera a el Salvador, Lote 7, Condominio Buenafuente, municipio de Santa Catarina Pinula, Guatemala.

El modelado matemático se realizó en el *software* ETABS, este proceso consistió en realizar 3 modelos, el primero de la estructura completa, el segundo con un primer nivel construido sin llegar a su capacidad total, y por último un tercer modelo basado en cambios realizados durante la construcción, en los cuales se revisaron comportamientos dinámicos por cambios de masas y rigideces.

Este análisis se realizó para una estructura ubicada en un sitio con índice de sismicidad de 4.1 considerando los criterios de AGIES en la actualización del 15 de julio de 2020.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se han identificados daños en estructuras, por alteración de las cargas dinámicas de trabajo debido a cambio de su masa y rigidez durante su proceso constructivo, en áreas con índice de sismicidad mayor a 4 según NSE de AGIES.

En este tiempo se han identificado fallas en edificios durante su construcción por alteración de las cargas dinámicas de trabajo debido a cambio de sus masas y rigideces durante su proceso constructivo en áreas con índice de sismicidad mayor a 4 según Normativa de Seguridad Estructural (NSE) de AGIES (2018).

En las edificaciones algunos diseños no definen la metodología constructiva en donde se pasan por alto detalles estructurales que se definen por el especialista de estructuras, esto repercute más en áreas del sector privado en donde se presentan cambios durante la construcción.

Por otra parte, existe la falta de planeación de ejecución de obra en la cual se inician ocupaciones de áreas durante de la construcción provocando cargas en niveles de manera prematura tanto por la parte del cliente como para almacenamiento de material.

Además, se tiene ausencia de equipos para un monitoreo de estructuras durante los procesos constructivos generando una supervisión más puntual revisando las variaciones de las propiedades dinámicas.

- Formulación de preguntas
 - Pregunta central
 - ¿Cómo se pueden identificar los daños en estructuras provocados por alteración de las cargas dinámicas de trabajo debido a cambio de masas y rigidez durante su proceso constructivo?
 - Preguntas auxiliares
 - ¿Cómo se pueden monitorear los cambios de las propiedades dinámicas de las estructuras?
 - ¿Cuál es la forma de realizar una evaluación estructural sobre cargas dinámicas durante la construcción?
 - ¿Cómo se pueden evitar sobreesfuerzos en elementos estructurales para prevenir daños parciales o totales durante el proceso constructivo?

OBJETIVOS

General

Comparar las propiedades dinámicas por cargas de trabajo debido a cambios de masas y rigideces de una estructura durante su proceso constructivo en áreas de índice de sismicidad mayor a 4 según NSE de AGIES.

Específicos

1. Proponer un proceso para monitorear el comportamiento dinámico de la estructura por medio de modelos matemáticos.
2. Establecer un procedimiento para la evaluación del comportamiento estructural cuando se produzca alteración de cargas dinámicas durante la construcción.
3. Evaluar un mecanismo instrumental para el monitoreo estructural de la Obra.

HIPÓTESIS

La identificación de los daños en estructuras provocados por alteración de las cargas dinámicas de trabajo, debido a cambio de masas y rigidez durante su proceso constructivo, pueden prever daños y mejorar la seguridad de la estructura.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

Se realizará por medio de un análisis multivariado de los efectos en elementos estructurales de una edificación por medio de un modelo con el que se busca encontrar el comportamiento por fases de la construcción asignando cargas de trabajo con el fin de analizar cada una de las fases; así como analizar la estructura finalizada. Con base a lo mencionado se revisará las tendencias de cada fase para considerar si hay variaciones significativas como mínimas que puedan afectar o mejorar el comportamiento de una estructura.

Por otra parte, se realizarán preguntas a constructores y colaboradores sobre anomalías que hayan detectado o vivido durante la construcción de un edificio ya que son las personas que tiene más experiencia en el ámbito de la construcción dando mayor probabilidad de detectar algún efecto en las estructuras que en su caso podría ser no esperado o lo contrario.

Se investigará sobre estructuras recién construidas como también las que están en proceso sobre territorios altamente sísmicos según la normativa guatemalteca.

Se pretende realizar un modelo de una estructura donde se someterá a fases de construcción en las cuales no tendrá toda la masa ni rigidez en la cual se basó el diseño asignando cargas de trabajo. Así también edificaciones que tengan daños prematuros en elementos estructurales ya no estén ocupadas.

Para ello se contempla los siguiente:

- Levantamiento de estructuras a analizar
- Revisión de información y modelos
- Determinar cargas de trabajo a las que pueden estar sometidos elementos estructurales durante su construcción
- Analizar datos de comportamiento dinámico por fases de construcción
- Revisión de códigos y normas de diseño en caso exista una diferencia no prevista
- Comparación, análisis y conclusión de resultados.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades dinámicas de las estructuras se establecen por medio de vibraciones causadas por algún tipo de excitación, ya sea por algún factor ambiental o inducido para estudio. Esto genera indicadores que podemos designar como señales las cuales se puede ser posible corroborar el comportamiento real de la estructura mediante equipos especializados comparado con un modelo matemático de acuerdo con un diseño estructural, durante los últimos años se ha estado innovando metodologías para obtener datos más cercanos a la realidad. En la actualidad en Guatemala se cuenta con muy pocas estructuras que posean algún tipo de monitoreo para obtener registros o un procedimiento establecido para implementarlo.

Guatemala es uno de los países considerados como altamente sísmicos por la posición geográfica donde se encuentra. Por otra parte, debido al récord histórico que se posee de sismos y daños que han ocasionado en el país, se han estado considerando mejoras a lo largo de los años con respecto a sistemas de estructuras, limitaciones y usos adecuados. Con base a esto se crearon las Normas de Seguridad Estructural, por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES) las cuales han tenido actualizaciones donde se especifican las consideraciones a tomar según la ubicación que posea una estructura dentro del país.

Por otra parte, la construcción con mampostería confinada es uno de los más realizados y reconocidos en el país, sobre todo para viviendas a lo largo de todo el territorio nacional. Este tipo de construcciones poseen grandes ventajas para los propietarios ya que son consideradas económicas y la mano de obra es

en gran parte calificada para este tipo de construcciones siempre y cuando se realice una correcta supervisión por un profesional capacitado. Gran parte de esto ha provocado a que se abuse de este sistema estructural como también no se consideren supervisiones e incluso diseños de las estructuras como también realizar algún tipo de cambio durante la construcción y no considerar los efectos que se puedan provocar como se presenta en esta investigación.

La instrumentación en estructuras para monitoreo durante factores ambientales en el país es muy escasa como también de acceso a tal información. Por otro lado, no existe un método definido para realizar este tipo de monitoreos en el país, como también qué tipo de instrumentos utilizar de acuerdo con la tipología de la estructura.

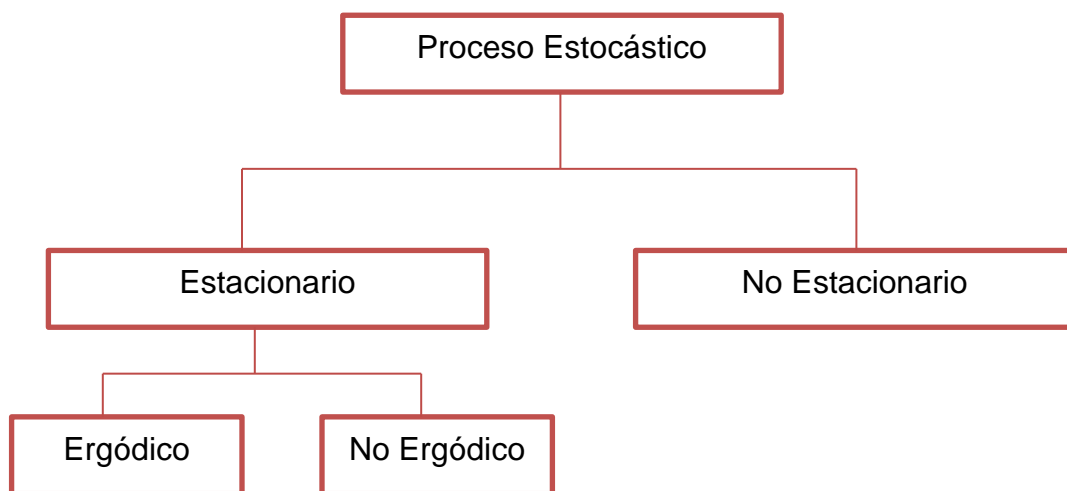
1. MÉTODOS DE ANÁLISIS

1.1. Procesos estocásticos

Los fenómenos físicos que afectan a las estructuras son muy variantes, al grado de que cada uno genera un registro único de manera aleatoria y muy difícil de repetirse, siendo así que se opta por describir en términos probabilísticos como menciona Ángel (2013) y Bendat y Piersol (2010).

El proceso estocástico conlleva un método estricto, de manera que recolecta los todos los registros de forma aleatoria según Bendat y Piersol (2010).

Figura 1. **Clasificación de los procesos aleatorios**



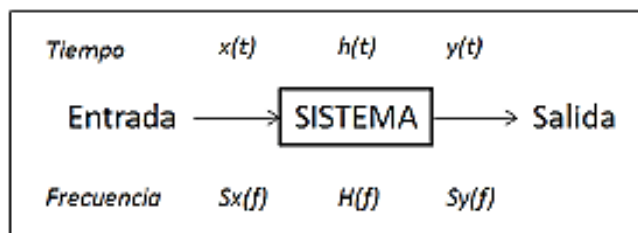
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Con base a este proceso los datos generados usualmente son promedios, pueden ser correlaciones, procesos matemáticos probabilísticos, promedio cuadrado, y otros más. Es importante destacar que cuando el tiempo permanece constante en cada una de las propiedades que se analiza, se considera estacionario, incluso así, cuando los resultados de los valores promedio calculados son similares a un solo registro sobre el tiempo, esto se considera como ergódico (Ángel, 2013).

Para el análisis de datos se puede considerar en dos categorías: con muestras individuales y con muestras múltiples como menciona Bendat y Piersol (2010).

De acuerdo con Bernal y Melo (s.f.), el conocimiento de señales y parámetros se utilizan para identificar el sistema, como se describe a continuación:

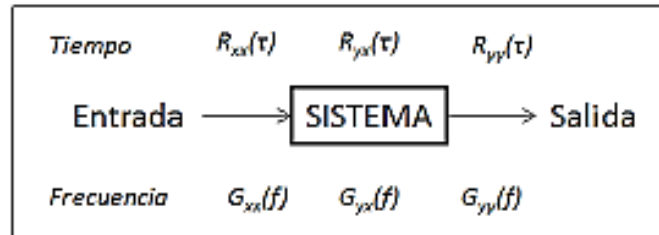
Figura 2. **Relaciones lineales para analizar señales**



x(t): Señal de entrada en el dominio temporal
y(t): Señal de salida en el dominio temporal
h(t): Respuesta impulsiva del sistema
S_x(f): Espectro lineal de Fourier de x(t)
S_y(f): Espectro lineal de Fourier de y(t)
H(f): función de transferencia del sistema.

Fuente: Bernal y Melo (s.f.). *Técnicas experimentales análisis de señales.*

Figura 3. **Relaciones cuadráticas para analizar señales**



$R_{xx}(\tau)$: Autocorrelación de la entrada $x(t)$

$R_{yy}(\tau)$: Autocorrelación de la salida $y(t)$

$R_{yx}(\tau)$: Autocorrelación cruzada de $x(t)$ e $y(t)$

$G_{xx}(f)$: Potencia espectral de $x(t)$

$G_{yy}(f)$: Potencia espectral de $y(t)$

$G_{yx}(f)$: Potencia espectral cruzada de $x(t)$ e $y(t)$

Fuente: Bernal y Melo (s.f.). *Técnicas experimentales análisis de señales*.

1.1.1. Funciones de correlación

Estas funciones se caracterizan por el dominio de tiempo, existen dos las cuales se definen de la siguiente manera:

- Autocorrelación: esta se define por un proceso aleatorio siendo un promedio relacionado con el tiempo τ de una señal (Bendat y Piersol, 2010).

$$R_{xx}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt \quad (1)$$

- Correlación cruzada: en este caso se consideran 2 señales, ya sean vectores o funciones distintas las cuales se desplazan en un tiempo τ (Bendat y Piersol, 2010).

$$R_{xy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt \quad (2)$$

1.1.2. Análisis de Fourier

Este tipo de análisis es muy conocido por el gremio de ingenieros para un análisis frecuencial de una función que puede ser reescrita en diferentes componentes armónicos según Newland (1993). Para representar estos procedimientos se tienen las siguientes formas:

- Transformada de Fourier: esta permite obtener una función de dominio temporal a frecuencial (Bendat y Piersol, 2010).

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (3)$$

- Espectro de amplitudes de Fourier: en una notación polar la transformada, las amplitudes son representadas por $|S_x(f)|$ y las amplitudes por $e^{-i\theta}$, puede expresarse de la siguiente manera:

$$S_x(f) = |S_x(f)|e^{-i\theta} \quad (4)$$

1.1.3. Funciones de densidad espectral

Estas se conocen por el dominio de frecuencia de las funciones de correlación y se pueden definir de la siguiente manera:

- Espectro de potencia: esta está definida por la transformada de Fourier con base a la función de autocorrelación con respecto al registro del tiempo, esta se conoce como la función de densidad auto espectral.

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (5)$$

- Espectro cruzado de potencia: este se define por la correlación cruzada como la transformada de Fourier.

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (6)$$

Por otra parte Murià (2007) indica que también esto se puede obtener como un producto del espectro con la conjugada del espectro de la señal con otra.

$$S_{xx}(f) = S_x(f)S_y(f) \quad (7)$$

1.1.4. Funciones de transferencia

De acuerdo con Bendat y Piersol (2010), esta función representa las propiedades dinámicas de un sistema lineal o también una forma matemática de dominio de frecuencias entre espectros.

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad (8)$$

En este caso se tiene un inconveniente ya que por la forma de la función pueden existir términos del denominador iguales a 0. Meruane (2011) propone alternativas para la función $H(f)$ con potencias espectrales donde se puede definir 2 ecuaciones transformando dominios de frecuencia entre las auto correlaciones y correlaciones cruzadas representadas de la siguiente manera:

$$H_1(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} \quad (9)$$

$$H_2(f) = \frac{G_{yy}(f)}{G_{yx}(f)} \quad (10)$$

Al momento de realizar este proceso, existe una variabilidad entre las funciones, así como también se asume que no existieran ruidos o errores humanos para la medición. Por esta razón se define una función llamada función de coherencia.

1.1.5. Funciones de coherencia

Esta función se define como una relación entre las funciones de transferencia en donde existen límites entre 0 cuando no existe ninguna señal y 1 cuando la coherencia da un resultado ideal. Bendat y Piersol (2010) definen la función de la siguiente manera:

$$Y^2_{xy}(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (11)$$

1.2. Método MIMO (*multiple input – multiple output*)

Este algoritmo se utiliza de manera que genera datos de parámetros de resolución para un proceso de optimización identificando las propiedades dinámicas, considerando registros de desplazamiento, velocidad y aceleración (Mau y Li, 1991).

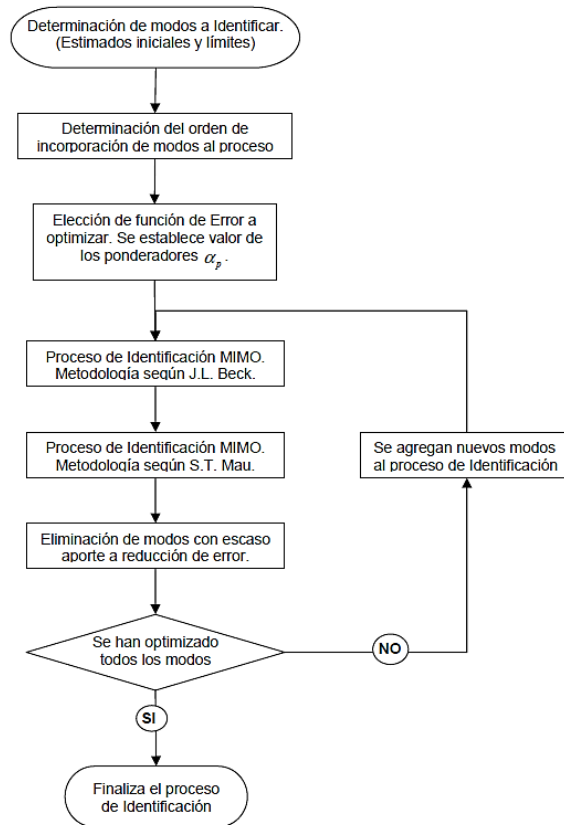
Este algoritmo está basado en una resolución de los modos de una estructura que siendo así el modo J de la estructura el vector b_j (Carreño, 1999).

$$b_j = \left[c_j^{(1)} + c_j^{(2)} + \Phi_{j,1}, \dots, \Phi_{j,p} \right] \quad (12)$$

Luego de este barrido por modos, se busca minimizar el valor del error donde se optimizan las variables modo, para finalizar se procede con un nuevo barrido. Cada una de las iteraciones minimizan el error calculado.

Posterior el algoritmo presenta las siguientes etapas descritas en el diagrama para el caso del estudio de Carreño (1999).

Figura 4. **Algoritmo de identificación MIMO**



Fuente: Carreño (1999). *Registro y tratamiento de acelerogramas.*

2. SISTEMAS ESTRUCTURALES Y AFECTACIONES AMBIENTALES

Guatemala es considerado un país de alta sismicidad, los factores ambientales de esta característica es la posición geográfica en donde se encuentran 3 placas tectónicas.

Figura 5. **Placas tectónicas de Guatemala**



Fuente: Prensa Libre (2015). *Sismo de 4,5 grados remece Chimaltenango y la capital.*

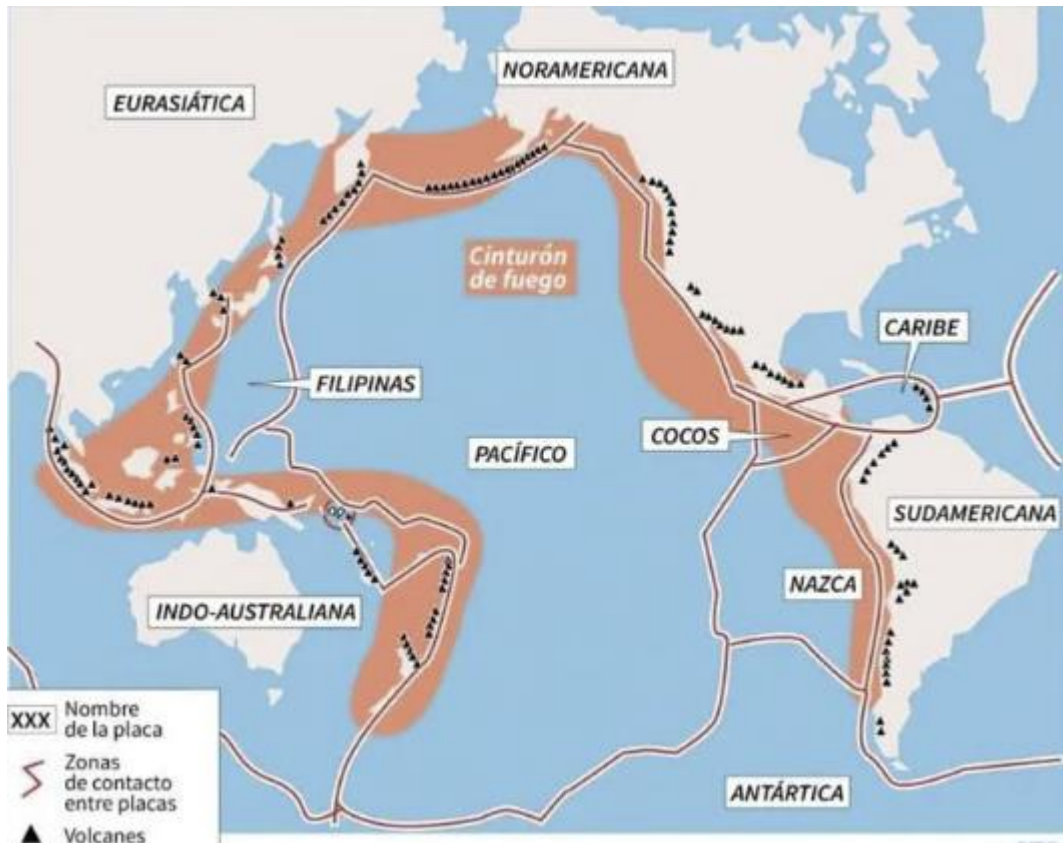
Consultado el 12 de septiembre de 2022. Recuperado de

<https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/sismo-de-45-grados-registrado-en-zona-oeste-de-guatemala/>.

Además, el territorio del país hace parte del conjunto de la línea de volcanes que se encuentran rodeando el océano pacífico, esto ha sido

denominado como Cinturón de fuego, el cual es otro factor ambiental que recurren con sismos de alta magnitud.

Figura 6. **Cinturón de fuego**



Fuente: Mi sistema Solar (2018). *Cinturón de Fuego: ¿Qué Es?, Mapa, Países, Volcanes y Más.* Consultado el 12 de septiembre de 2022. Recuperado de <https://misistemasolar.com/cinturon-de-fuego/>.

2.1. **Eventos de sitio**

Se tiene registro de la Historia sísmica de Guatemala como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla I. **Historia sísmica de Guatemala**

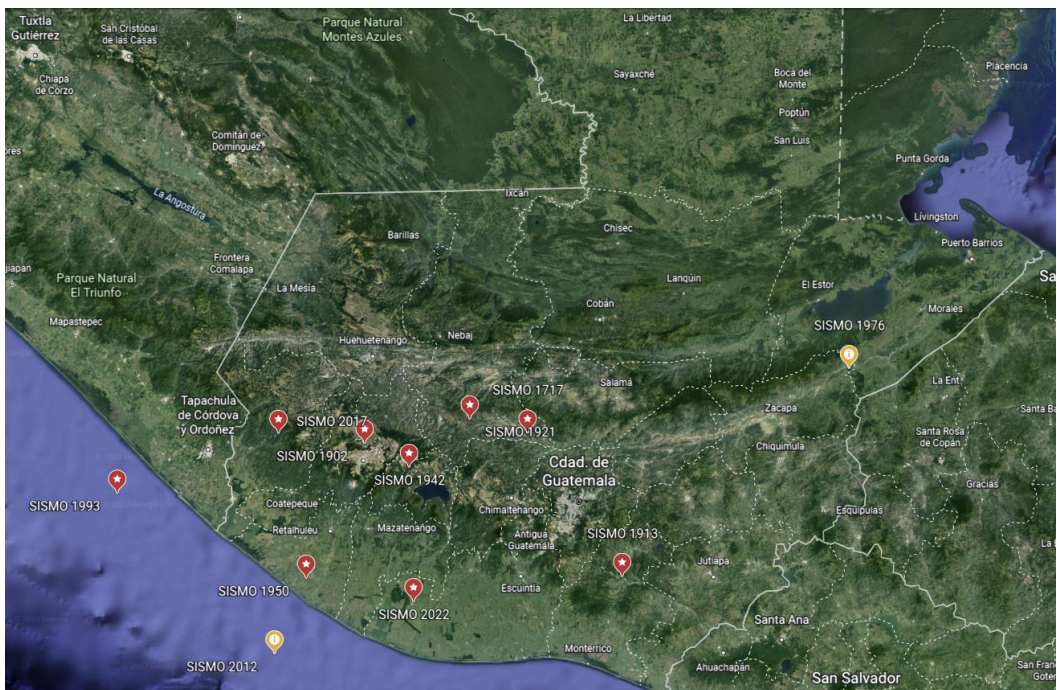
Sismo	Fecha	Magnitud (R)	Intensidad	Latitud	Longitud	Profundidad (km)
Terremoto de San Miguel	29 de septiembre de 1717	7.4	IX	14.57	90.73	60
Terremoto de San Perfecto	19 de abril de 1902	7.5	-	14.90	91.50	25
Santa Rosa	8 de marzo de 1913	6.4		14.28	90.30	25
Santa Cruz el Quiché	7 de febrero de 1921	7	-	15.00	91.00	15
Sololá	6 de agosto de 1942	7.9	-	14.80	91.30	60
Retalhuleu	23 de octubre de 1950	7.3	-	14.30	91.80	-
Izabal	4 de febrero de 1976	7.5	-	15.2	89.20	5
San Marcos	9 de Octubre de 1993	7.3		14.70	92.7	34
Retalhuleu	12 de noviembre de 2012	7.4	VII	13.98	91.96	45
San Pablo	6 de noviembre de 2017	6.6	V	14.977	91.929	94

Continuación tabla I.

Nueva Concepcion	16 de febrero de 2022	6.8	VII	14.193	91.296
-----------------------------	--------------------------------------	------------	------------	---------------	---------------

Fuente: INSIVUMEH (2022). Terremotos en Guatemala.

Figura 7. **Ubicación de epicentros de sismos de Guatemala**



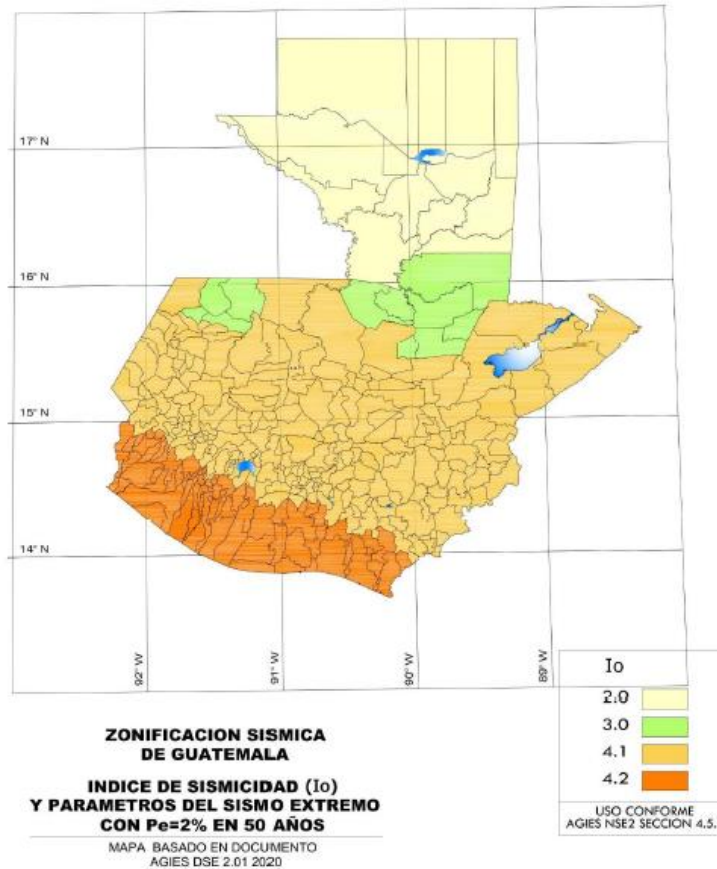
Fuente: Google Earth Pro (2022). Consultado el 12 de septiembre de 2022. Recuperado de
Lansat/Copernicus

En la historia de estos eventos, 2 de ellos han sido los más alarmantes de Guatemala, tanto por daños estructurales, como la pérdida de vidas humanas. A raíz de estos fenómenos, es que se empiezan a regir normativas con respecto a los sistemas constructivos del país.

El evento de 1976, el terremoto más mortífero hasta la fecha de Guatemala afectando la zona central del país, remarcó grandemente que las estructuras de viviendas construidas con adobe y madera no pueden ser consideradas para habitar. Posteriormente en 2012, ocurre un sismo que provoca muchos daños estructurales para viviendas de mampostería reforzada y mampostería confinada, declarando en gran parte de ellas inhabitables. Además, hasta ese año aún existían estructuras realizadas con adobe y madera de las cuales también salieron afectadas como también algunas desplomadas en su totalidad.

Derivado a estos acontecimientos, en Guatemala se creó la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES. En este sentido, la AGIES estableció las Normas de Seguridad Estructural, NSE, obligatorias para el diseño y construcción en Guatemala. Con la actualización realizada el 15 de julio de 2020, se mantienen vigentes dichas normas para la seguridad estructural y protección sísmica. En esta investigación nos enfocaremos en las zonas con índice de sismicidad mayor o igual a 4.1, mismas que se presentan en el mapa de zonificación sísmica de Guatemala (AGIES, 2018).

Figura 8. **Mapa de zonificación sísmica de Guatemala**



Fuente: AGIES (2018). *Normativa de Seguridad Estructural*.

2.2. **Sistemas estructurales para viviendas**

En Guatemala la construcción evolucionada desde estructuras masivas y de comportamiento frágil que es el adobe y madera, a la mampostería y concreto reforzado (Orozco, 2019).

Existe gran cantidad de mano de obra como también accesibilidad a los materiales para construcciones de mampostería, sobre todo con block de

concreto. AGIES (2018) clasifica este sistema como E2 con las siguientes características.

Tabla II. **Sistema de muros E2**

Sistema de muros	Norma
De concreto reforzado DA	NSE 7.1
De concreto reforzado DB	NSE 7.9
De mampostería reforzado DA	NSE 7.4
De mampostería reforzado DB	NSE 4.1

Fuente: AGIES (2018). *Normativa de Seguridad Estructural*.

Por otra parte, también se consideran modificaciones en diseño debido a irregulares en las estructuras, que para el caso de viviendas puede representarse mayor cantidad de irregularidades, en lo cual también se puede llegar a abusar de las capacidades del sistema estructural E2.

Tabla III. **Irregularidades en elevación**

Tipo de irregularidad	Característica
V1-A	Piso flexible
V1-B	Piso flexible caso extremo
V2	Masa irregular verticalmente
V3	Geometría vertical escalonada
V4	Discontinuidad en el plano vertical
V5	Condiciones de potencial debilidad
V6	Discontinuidad en la resistencia lateral, piso débil

Continuación tabla III.

V7	Discontinuidad en la resistencia lateral, piso extremadamente débil
-----------	---

Fuente: AGIES (2018). *Normativa de Seguridad Estructural*.

Tabla IV. **Irregularidades en planta**

Tipo de irregularidad	Característica
H1-A	Irregularidad torsional
H1-B	Irregularidad torsional extrema
H2	Esquina entrante
H3	Diafragma discontinuo
H4	Desfase lateral
H5	Sistema no paralelo

Fuente: AGIES (2018). *Normativa de Seguridad Estructural*.

Estas características se consideran para realizar un diseño y construcción con un comportamiento satisfactorio ante un evento sísmico. En las NSE 2 y 3 de AGIES (2018), se especifica con mayor profundidad las consideraciones para tal diseño, en el siguiente capítulo se expandirá más con las consideraciones tomadas para el modelo experimental de una vivienda unifamiliar.

3. MODELO EXPERIMENTAL

Para esta investigación se analizó una estructura para una vivienda unifamiliar. Para ello en la siguiente tabla se determinan los siguientes parámetros a considerar para el diseño y revisión.

Tabla V. **Parámetros de diseño y revisión**

Materiales	Resistencia	Peso propio
Concreto	210 kg/cm ²	2,400 kg/m ³
Acero de refuerzo	4,200 kg/cm ²	7,850 kg/m ³
Suelo	15,000 kg/m ²	1,600 kg/m ³
Arena volcánica húmeda	-	1,800 kg/m ³
Block clase B	100 kg/cm ²	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

La propuesta arquitectónica presenta una vivienda de 2 niveles con 322 metros cuadrados de construcción, ubicada en kilómetro 16.5, carretera a El Salvador, municipio de Santa Catarina Pinula, del departamento de Guatemala.

Figura 9. **Fotografía de área para construcción de vivienda**



Fuente: [Fotografía de Bladimir Chicas Paz]. (Santa Catarina Pinula, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.

3.1. Parámetros iniciales para modelos de análisis

Para este análisis se realizaron 2 modelos inicialmente, uno de ellos para analizar específicamente los muros de mampostería confinada por fases de construcción, en este caso, primer nivel y segundo nivel.

Así mismo se inició con los parámetros para el sismo, considerando la ubicación se tienen los siguientes datos de acuerdo con (AGIES, 2018).

Tabla VI. **Parámetros para consideración de sismo**

Factor	Parámetro
Sistema estructural	E2
Categoría	Obra ordinaria
Clase de sitio	C
Nivel de protección sísmica	D
I_0	4.10
S_{cr} [s]	1.54
S_{1r} [s]	0.68
F_a	1.00
F_v	1.00
R	4.00
Ω_r	3.00
Cd	3.50
ρ	1.05

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Por otra parte, para cargas de servicio se consideró, en el caso de sobrecarga muerta, instalaciones, piso cerámico, rellenos, y el sistema de vigueta y bovedilla. En el caso de cargas vivas se consideró de acuerdo con NS2 de (AGIES, 2018).

En la siguiente tabla se especifica la distribución y valor de cargas consideradas para el análisis y diseño.

Tabla VII. **Cargas para análisis y diseño**

Tipo de carga	Losas de entrapiso	Losa de cubierta
Instalaciones	25 kg/m ²	25 kg/m ²
Piso ceramico	15 kg/m ²	-
Relleno	180 kg/m ²	100 kg/m ²
Bovedilla	108 kg/m ²	108 kg/m ²

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.2. Análisis y diseño

A continuación, se desarrollará el análisis y diseño sísmico.

3.2.1. Espectro de diseño sísmico para Santa Catarina Pinula

Considerando los datos iniciales para parámetros de diseño se determinan los factores S_{cs} y S_{1s} , para el cálculo de la ordenada espectral.

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a \quad (13)$$

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v \quad (14)$$

Los factores F_a , F_v , corresponden a un ajuste por el tipo de suelo en donde se está ubicando, los factores N_a y N_v , corresponden a un ajuste por intensidad sísmica.

AGIES (2018) en su última actualización indica que todos estos factores tienen el valor de 1. Siendo así los valores resultantes son los siguientes:

$$S_{cs} = 1.54$$

$$S_{1s} = 0.68$$

Posterior, se realizó la calibración a nivel de diseño en donde se considera un tipo de obra ordinaria y con índice de sismicidad 4.1, corresponde a un sismo ordinario con un factor de acuerdo con NSE-2 de AGIES (2018) con una probabilidad del 10 % de ser excedido en 50 años. Esta calibración se representa de la siguiente manera:

$$S_{cd} = K_d * S_{cs} \quad (15)$$

$$S_{1d} = K_d * S_{1s} \quad (16)$$

Siendo así los siguientes resultados:

$$K_d = 0.66$$

$$S_{cd} = 1.02$$

$$S_{1d} = 0.45$$

Por otro lado, se consideró los factores del periodo de la siguiente manera:

$$T_s = \frac{S_{1s}}{S_{cs}} \quad (17)$$

$$T_0 = 0.2 * T_s \quad (18)$$

Donde:

$$T_s = 0.44$$

$$T_o = 0.09$$

Así mismo, se realizó el cálculo del periodo fundamental en segundos en donde se consideran las características del sistema estructural que se está analizando como lo indica NSE-3 de AGIES (2018).

$$T_a = K_T * (H_n)^x \quad (19)$$

Donde los factores tienen los siguientes valores de acuerdo con un sistema estructural E2:

$$H_n = 7.10$$

$$K_T = 0.049$$

$$x = 0.75$$

$$T_a = 0.213$$

Para el cálculo de la ordenada espectral $S_a(T)$ se consideraron los siguientes parámetros de acuerdo con NSE-2 de AGIES (2018).

$$S_a(T) = K_{cd} \left[0.4 + 0.6 \frac{T_a}{T_s} \right] \quad \text{cuando} \quad T_a < T_o \quad (20)$$

$$S_a(T) = S_{cd} \quad \text{cuando} \quad T_o \leq T_a \leq T_s \quad (21)$$

$$S_a(T) = \frac{S_{1d}}{T} \leq S_{cd} \quad \text{cuando} \quad T_s \leq T_a \leq T_L \quad (22)$$

$$S_a(T) = \frac{S_{1d}}{T^2} * T_L \quad \text{cuando} \quad T_a \geq T_L \quad (23)$$

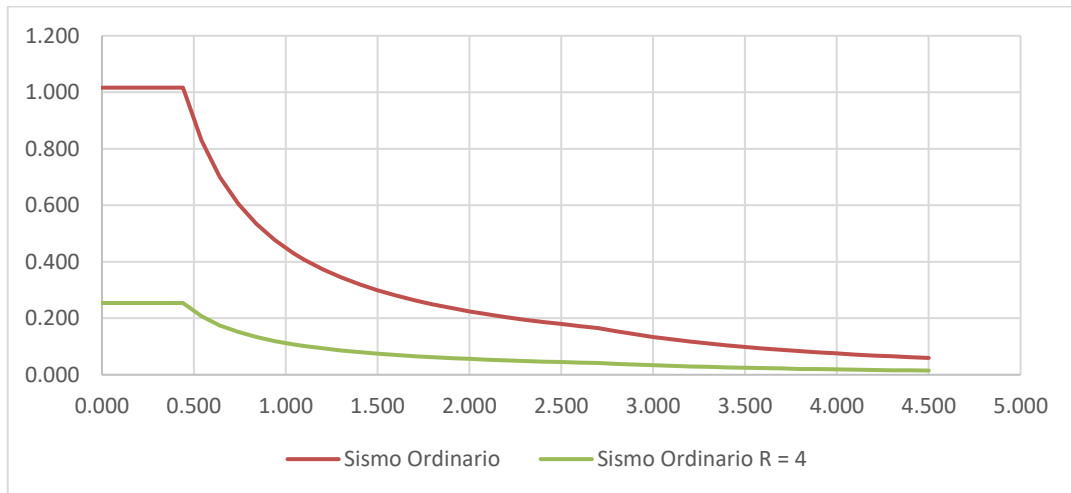
Siendo así el resultado siguiente:

$$S_a(T) = 1.016$$

$$S_a(T)/R = 0.254$$

Finalmente se grafica el espectro de diseño como se expresa en la siguiente figura:

Figura 10. **Espectro de diseño**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.2.2. Modelo matemático en ETABS para estructura completa

Se realizó el análisis no lineal de la estructura, como primer paso se consideró en el modelo toda la estructura para evaluar el comportamiento en conjunto de esta.

Para el diseño de muro de mampostería se consideró block de un tabique clase B de 14 cm de espesor con colocación de mortero de lecho parcial, que de acuerdo con la norma NSE 7.4 sección 5.7.3 de AGIES (2018), se combinó con un mortero clase S. Por otro lado, se realizó el cálculo de las propiedades para el muro que se ingresó al modelo matemático.

Tabla VIII. **Propiedades de muro de mampostería**

Concepto	Valor
Espesor de muro [cm]	14
Largo de muro [cm]	39
Altura de analisis [cm]	100
Espesor lateral [cm]	2.5
Espesor de tabique [cm]	2.5
Largo de vacío [cm]	15.75
Ancho de vacío [cm]	9.00
Clase de block	B
Tipo de mortero	S
Peso de muro [kg/m ²]	135.00
Peso de acabados [kg/m ²]	48.00
Peso total de muro [kg/m ²]	183.00
Área de vacío [cm ²]	141.75
Área bruta [cm ²]	546

Continuación tabla VIII.

Area neta [cm²]	262.5
Inercia con área bruta [cm⁴]	69,205.50
Inercia con área de vacío [cm⁴]	29,466.28
Inercia real de bloque [cm⁴]	39,739.22

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Por último, se despejó con la fórmula de inercia el espesor equivalente para el muro para realizar el cálculo del peso volumétrico equivalente de muro utilizado en el modelo matemático.

Tabla IX. **Cálculo de espesor equivalente y peso volumétrico de muro de mampostería**

Concepto	Valor
Espesor equivalente [cm]	8.04
Peso volumétrico [kg/m³]	2276.38

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 11. **Definición de material para muro de mampostería de block clase B**

The image shows a software dialog box titled "Material Property Data" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is organized into several sections:

- General Data:** Contains fields for "Material Name" (Mamp Block B), "Material Type" (Masonry), "Directional Symmetry Type" (Isotropic), "Material Display Color" (a red color swatch with a "Change..." button), and "Material Notes" (with a "Modify/Show Notes..." button).
- Material Weight and Mass:** Features two radio buttons: "Specify Weight Density" (selected) and "Specify Mass Density". Below are input fields for "Weight per Unit Volume" (2276.38 kgf/m³) and "Mass per Unit Volume" (232.126 kgf-s²/m⁴).
- Mechanical Property Data:** Includes input fields for "Modulus of Elasticity, E" (708750000 kgf/m²), "Poisson's Ratio, U" (0.2), "Coefficient of Thermal Expansion, A" (0.0000081 1/C), and "Shear Modulus, G" (295312500 kgf/m²).
- Design Property Data:** Contains a single button labeled "Modify/Show Material Property Design Data...".
- Advanced Material Property Data:** Contains three buttons: "Nonlinear Material Data...", "Material Damping Properties...", and "Time Dependent Properties...".

At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Figura 12. Definición de material concreto

The image shows a software dialog box titled "Material Property Data" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is organized into several sections:

- General Data:** Includes fields for Material Name (3000Psi), Material Type (Concrete), Directional Symmetry Type (Isotropic), Material Display Color (a red color swatch with a "Change..." button), and Material Notes (with a "Modify/Show Notes..." button).
- Material Weight and Mass:** Features two radio buttons: "Specify Weight Density" (selected) and "Specify Mass Density". Below are input fields for Weight per Unit Volume (2402.77 kgf/m³) and Mass per Unit Volume (245.014 kgf-s²/m⁴).
- Mechanical Property Data:** Contains input fields for Modulus of Elasticity, E (2194996450 kgf/m²), Poisson's Ratio, U (0.2), Coefficient of Thermal Expansion, A (0.0000099 1/C), and Shear Modulus, G (914581854.13 kgf/m²).
- Design Property Data:** A single button labeled "Modify/Show Material Property Design Data..."
- Advanced Material Property Data:** Three buttons: "Nonlinear Material Data...", "Material Damping Properties...", and "Time Dependent Properties..."
- Modulus of Rupture for Cracked Deflections:** Two radio buttons: "Program Default (Based on Concrete Slab Design Code)" (selected) and "User Specified" (with an empty input field).

At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Figura 13. Definición de material de acero de refuerzo

Material Property Data

General Data

Material Name: A615Gr60

Material Type: Rebar

Directional Symmetry Type: Uniaxial

Material Display Color: Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

Material Weight and Mass

Specify Weight Density Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 0.00785 kgf/cm³

Mass per Unit Volume: 0.000008 kgf-s²/cm⁴

Mechanical Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2038901.92 kgf/cm²

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000117 1/C

Design Property Data

Modify/Show Material Property Design Data...

Advanced Material Property Data

Nonlinear Material Data... Material Damping Properties...

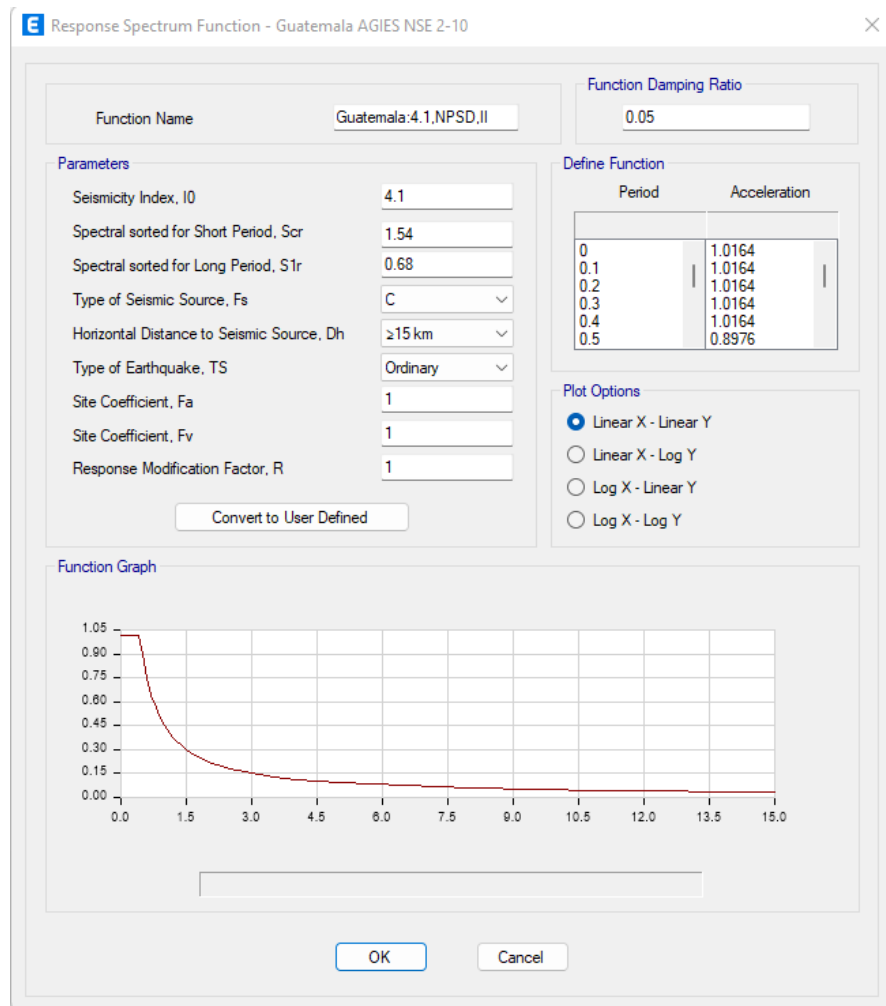
Time Dependent Properties...

OK Cancel

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

De igual manera se ingresa el sismo calculado, en esta parte se coloca con una ductilidad de $R = 1$, posteriormente en la definición de casos se realiza la modificación de ductilidad $R = 4$ como se consideró para el diseño inicialmente.

Figura 14. Definición de espectro de diseño



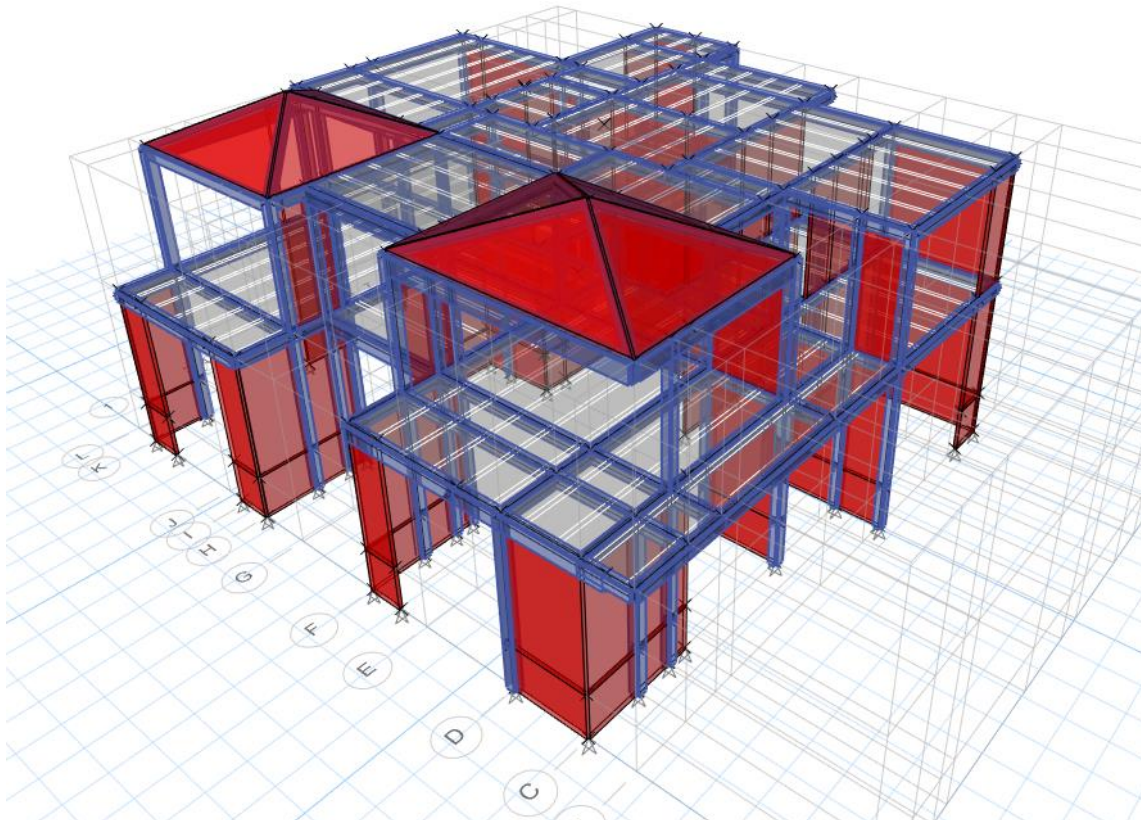
Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Posteriormente se realiza el modelado de los elementos estructurales de acuerdo con la propuesta arquitectónica, en el modelado para mampostería se incluyen los siguientes elementos para el modelado:

- Vigas y soleras de remate
- Columnas, mochetas aisladas y mochetas de carga

- Losa de vigueta y bovedilla
- Muros de mampostería

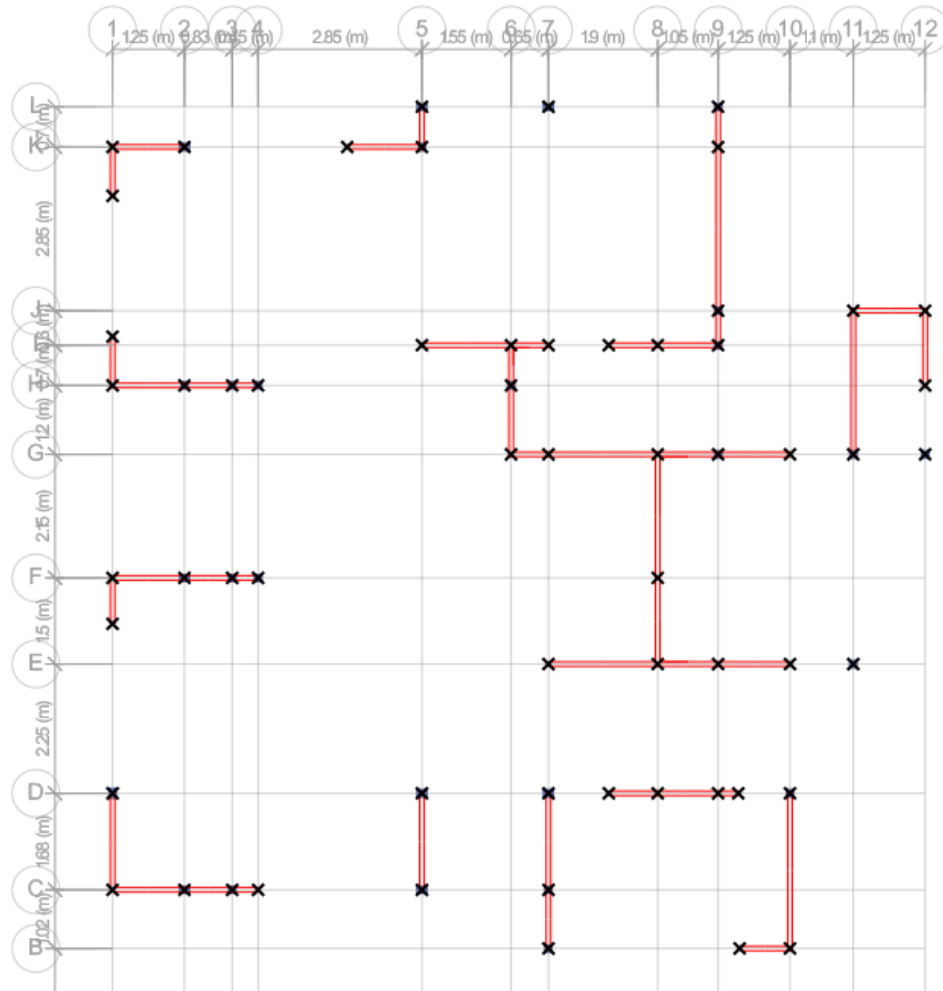
Figura 15. **Perspectiva 3D de modelo matemático**



Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

En esta etapa se evaluaron todos los elementos estructurales con su comportamiento en conjunto, así mismo se detectaron áreas críticas en donde se encuentra un espacio sin elementos verticales para transferir las cargas.

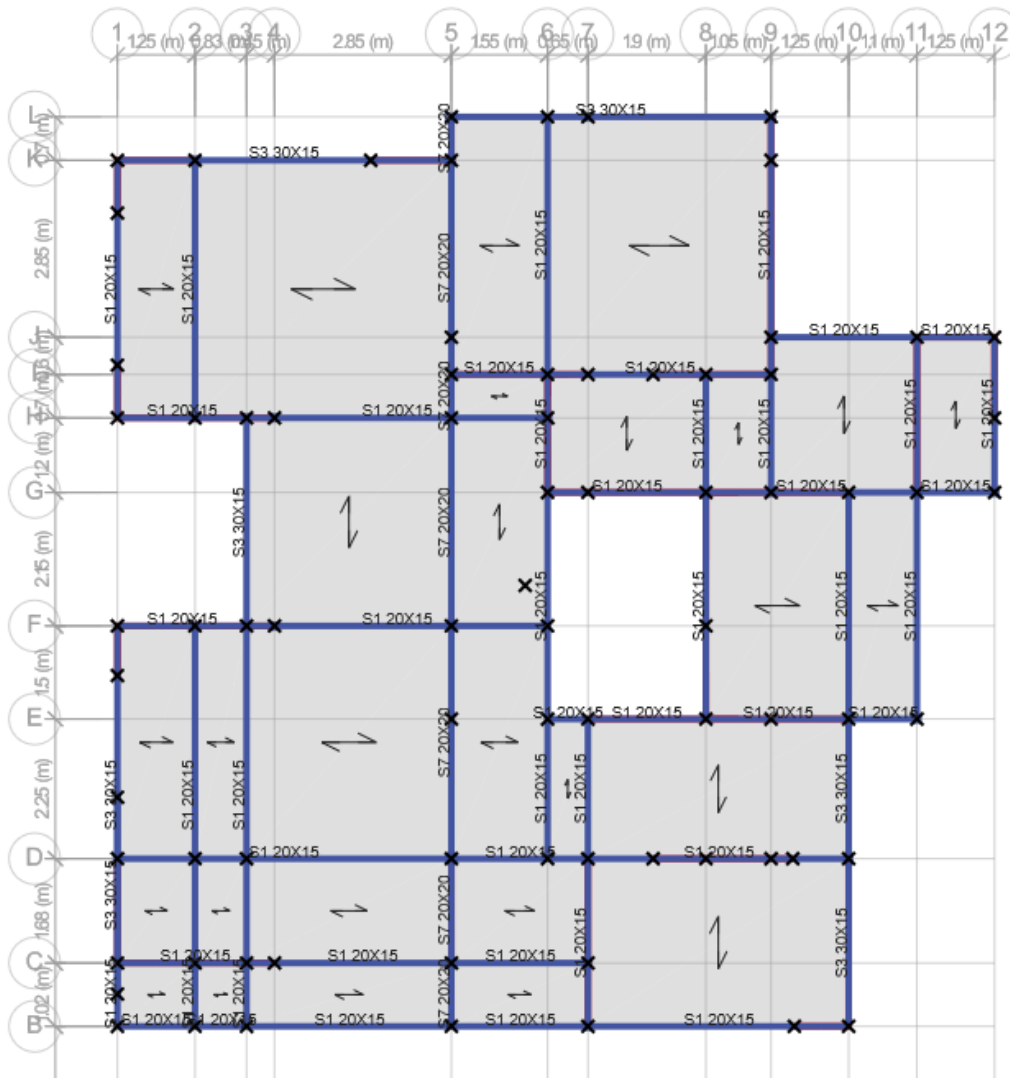
Figura 16. **Perspectiva de planta de nivel base de modelo analítico**



Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

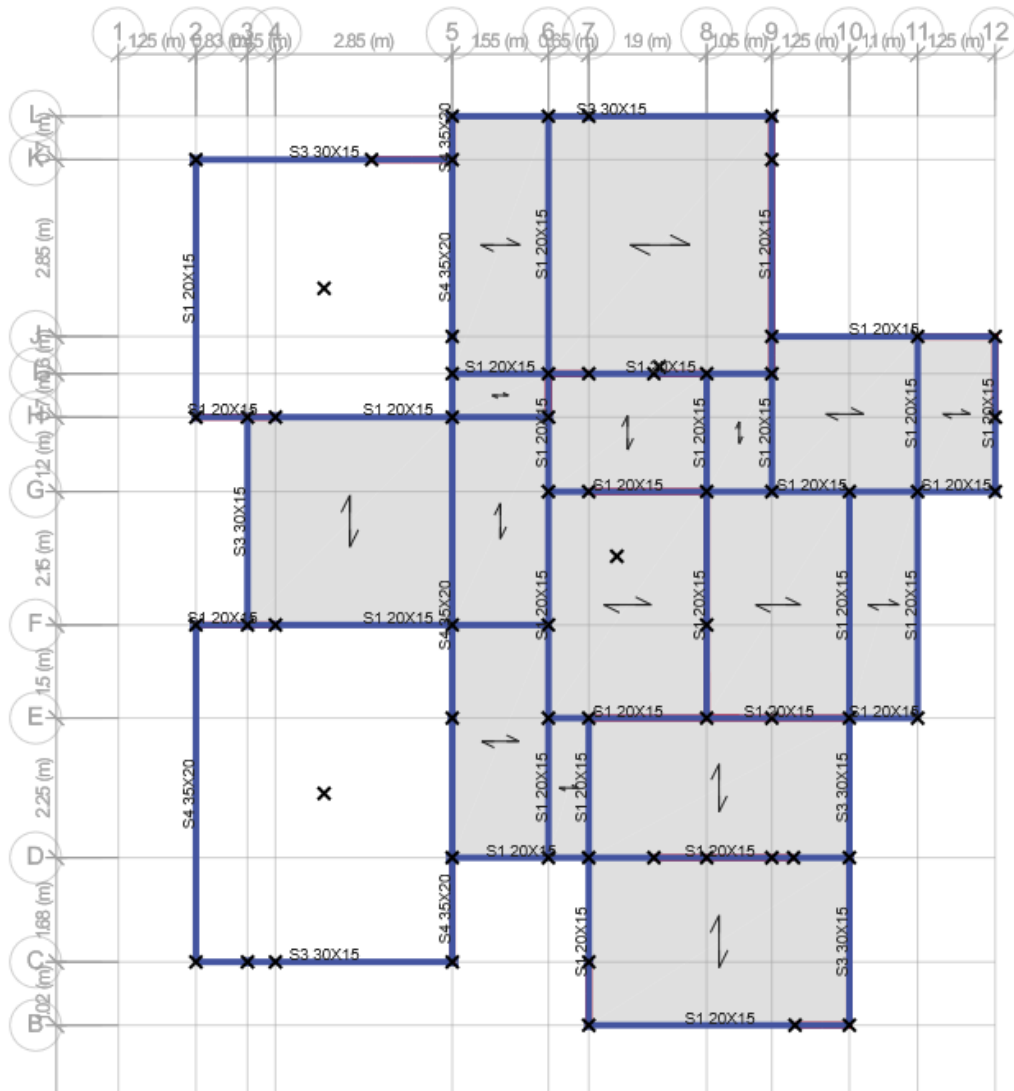
En este plano se pueden observar la escasez de elementos verticales para carga en el eje 5. Por tal razón se realizó un ajuste en vigas para formar partes más simétricas y distribución de cargas como también la dirección de las viguetas para el sistema de losa, obteniendo un comportamiento satisfactorio.

Figura 17. Perspectiva de planta de nivel 1 de modelo matemático



Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

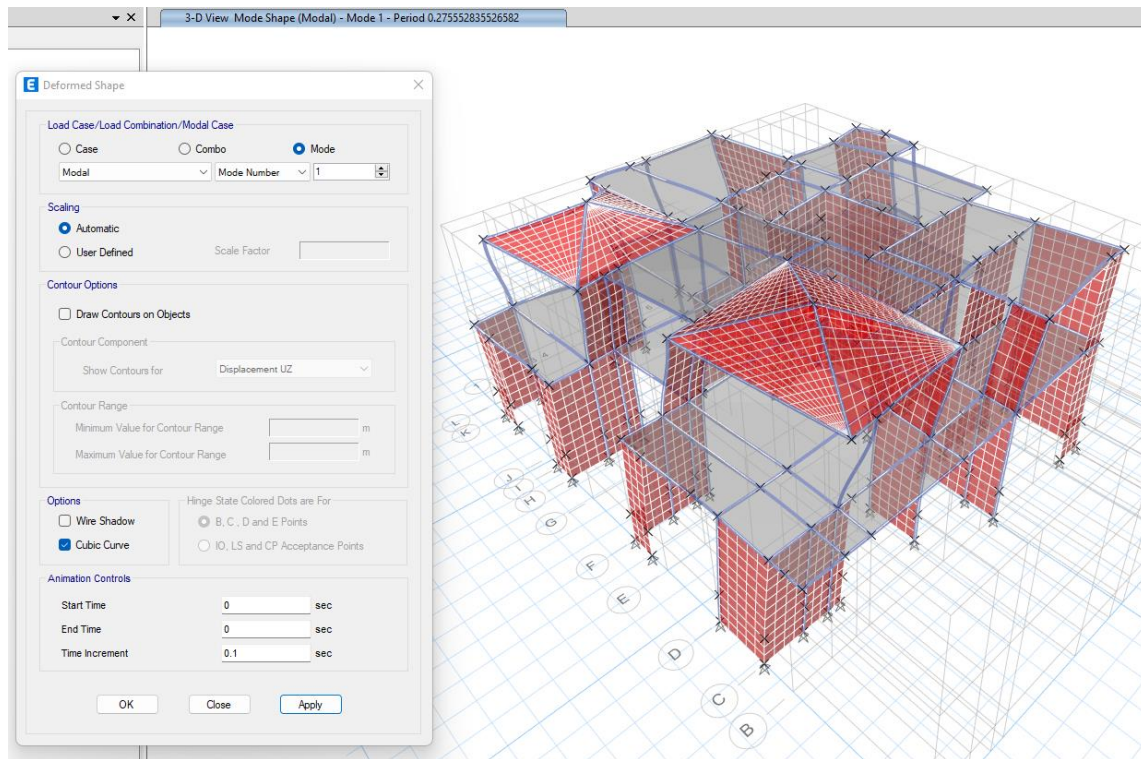
Figura 18. Perspectiva de planta de nivel 2 de modelo matemático



Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Por otra parte, se evaluó el comportamiento de la estructura obteniendo resultados muy cercanos a lo calculado de acuerdo con la normativa de AGIES (2018).

Figura 19. Comportamiento por sismo dinámico de estructura



Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

En esta revisión se observa que el periodo de la estructura resulta en 0.214 segundos, de acuerdo con el análisis estructural. Con el procedimiento de AGIES (2018) se obtienen 0.254 segundos. Por otro lado, se buscó que la participación de masa llegue a más de 90 %. Así mismo también la revisión de derivas máximas del sistema, cumpliendo con AGIES (2018).

Figura 20. Participación de masa

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX
Modal	37	0.054	0.0013	0.0048	0	0.9414	0.8797	0	0.0147
Modal	38	0.054	0.0007	0.0064	0	0.9421	0.886	0	0.0164
Modal	39	0.054	0.0002	0.001	0	0.9422	0.887	0	0.0031
Modal	40	0.054	1.043E-05	0.0008	0	0.9422	0.8878	0	0.0022
Modal	41	0.053	0.0026	0.0114	0	0.9448	0.8992	0	0.0208
Modal	42	0.053	0.0007	0.007	0	0.9455	0.9063	0	0.0138
Modal	43	0.052	3.376E-05	0.0003	0	0.9455	0.9065	0	0.0005
Modal	44	0.052	0.0003	0.0003	0	0.9458	0.9068	0	0.001
Modal	45	0.051	3.997E-05	0.0003	0	0.9458	0.9071	0	0.0017
Modal	46	0.05	0.0006	0.001	0	0.9464	0.9082	0	0.0048
Modal	47	0.049	0.0004	0.026	0	0.9468	0.9342	0	0.0932
Modal	48	0.048	3.033E-05	0.0026	0	0.9468	0.9368	0	0.0062
Modal	49	0.047	0.0001	0.0004	0	0.9469	0.9371	0	0.0016
Modal	50	0.046	0.0001	0.0005	0	0.947	0.9376	0	0.002

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Figura 21. Derivas máximas del sistema

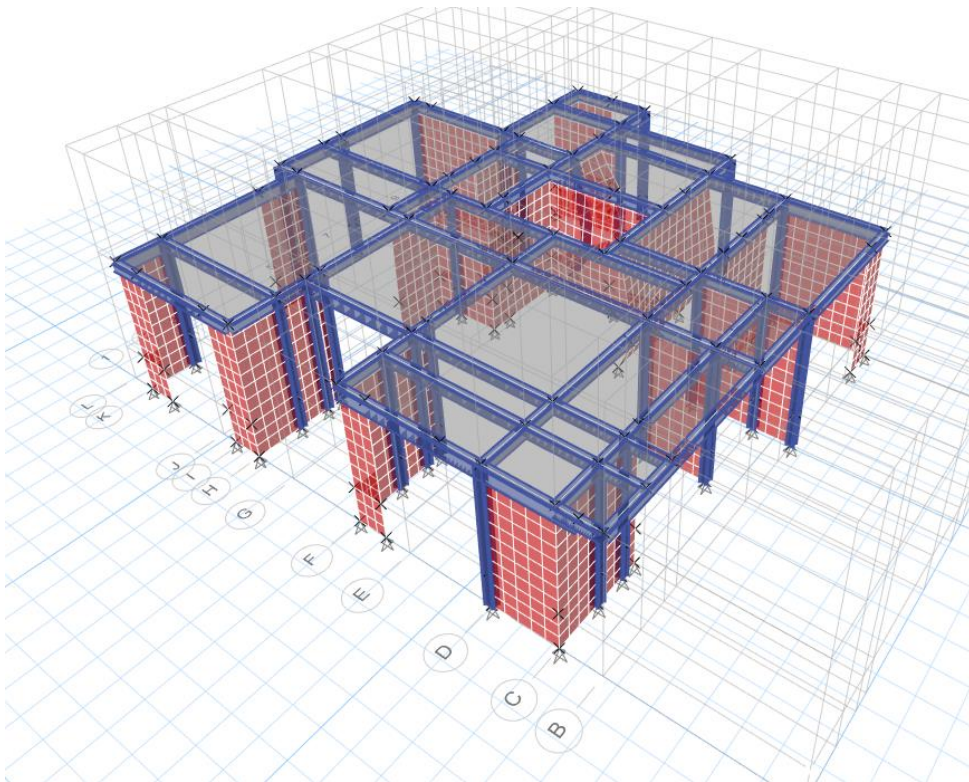
Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Direction	Max Drift m	Avg Drift m	Ratio
N2	Dead	LinStatic			X	0.000424	0.000167	2.541
N2	Dead	LinStatic			Y	0.000429	0.000189	2.273
N2	Live	LinStatic			X	0.000148	6.2E-05	2.387
N2	Live	LinStatic			Y	0.000157	6.9E-05	2.275
N2	Modal	LinModEigen	Mode	1	X	6.8E-05	6E-06	12.216
N2	Modal	LinModEigen	Mode	1	Y	8.7E-05	3.1E-05	2.828
N2	Modal	LinModEigen	Mode	2	X	6.5E-05	5.3E-05	1.237
N2	Modal	LinModEigen	Mode	3	X	3E-06	3E-06	1.147
N2	Modal	LinModEigen	Mode	3	Y	2E-06	1E-06	3.023
N2	Modal	LinModEigen	Mode	4	Y	6.7E-05	3.8E-05	1.757
N2	Modal	LinModEigen	Mode	5	Y	9E-06	5E-06	1.824
N2	Modal	LinModEigen	Mode	6	X	1E-05	4E-06	2.925
N2	Modal	LinModEigen	Mode	6	Y	8E-06	2E-06	3.558
N2	Modal	LinModEigen	Mode	7	X	3E-06	1E-06	4.121
N2	Modal	LinModEigen	Mode	7	Y	4E-06	3E-06	1.744
N2	Modal	LinModEigen	Mode	8	X	3E-06	1E-06	4.047

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

3.2.3. Modelo matemático en ETABS para estructura hasta primer nivel de construcción.

Para este modelo se consideró la resistencia del concreto a un 80 % de su capacidad ya que durante el proceso constructivo se empieza a realizar colocación de elementos cargas de trabajo mientras los elementos llegan a fraguar.

Figura 22. **Perspectiva 3D de estructura con primer nivel construido**



Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Al momento de realizar el análisis en el programa, se detecta que la participación de masa es menor al 90 %, como también que 3 de los muros actúan de manera irregular, esto nos indica que la estructura al estar construida solo en 1 nivel, con un sismo puede afectar inicialmente a los muros, para lo cual se deberán reforzar.

Figura 23. **Participación de masa de estructura con primer nivel de construcción**

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX
Modal	37	0.054	2.262E-05	4.316E-06	0	0.8819	0.8743	0	0.0065
Modal	38	0.054	0.0006	0.0005	0	0.8824	0.8748	0	0.0038
Modal	39	0.053	0.0007	4.914E-05	0	0.8831	0.8748	0	6.172E-06
Modal	40	0.053	1.146E-06	8.23E-06	0	0.8831	0.8748	0	1.643E-06
Modal	41	0.052	0.0013	0.0003	0	0.8843	0.8751	0	0.0008
Modal	42	0.051	0.0001	0.0008	0	0.8844	0.8759	0	0.0042
Modal	43	0.05	0.0016	0.0015	0	0.886	0.8774	0	0.0067
Modal	44	0.048	2.604E-05	0.0012	0	0.8861	0.8787	0	0.0102
Modal	45	0.047	0.0003	0.0006	0	0.8864	0.8793	0	0.0025
Modal	46	0.046	0.0004	0.0008	0	0.8867	0.8801	0	0.0025
Modal	47	0.045	2.081E-05	6.974E-06	0	0.8868	0.8801	0	1.03E-06
Modal	48	0.044	0	9.692E-07	0	0.8868	0.8801	0	1.551E-05
Modal	49	0.041	6.189E-06	0.0009	0	0.8868	0.881	0	0.0035
Modal	50	0.041	3.632E-05	0.0016	0	0.8868	0.8826	0	0.0054

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Figura 24. Derivas máximas del sistema con primer nivel de construcción

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Direction	Max Drift m	Avg Drift m	Ratio
N1	Dead	LinStatic			X	0.000413	5.5E-05	7.532
N1	Dead	LinStatic			Y	0.000851	0.000151	5.626
N1	Live	LinStatic			Y	0.000854	0.000172	4.976
N1	Modal	LinModEigen	Mode	1	Y	0.000834	0.000416	2.003
N1	Modal	LinModEigen	Mode	2	X	0.000312	0.000151	2.067
N1	Modal	LinModEigen	Mode	2	Y	0.001074	0.000283	3.794
N1	Modal	LinModEigen	Mode	3	X	0.000606	0.000257	2.354
N1	Modal	LinModEigen	Mode	3	Y	0.000558	0.000147	3.791
N1	Modal	LinModEigen	Mode	4	X	0.000209	0.000104	2.016
N1	Modal	LinModEigen	Mode	4	Y	0.001292	0.000617	2.094
N1	Modal	LinModEigen	Mode	5	X	0.000248	8.5E-05	2.909
N1	Modal	LinModEigen	Mode	5	Y	0.001484	0.000735	2.02
N1	Modal	LinModEigen	Mode	6	X	0.000786	0.000381	2.06
N1	Modal	LinModEigen	Mode	6	Y	0.000386	7.9E-05	4.9
N1	Modal	LinModEigen	Mode	7	X	0.000143	6.9E-05	2.063
N1	Modal	LinModEigen	Mode	7	Y	0.001297	0.000389	3.331

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Durante este proceso de análisis y construcción del primer piso surgió un cambio repentino para el segundo nivel de la vivienda, algo muy común para este tipo de proyectos, para lo cual se procedió a realizar un nuevo modelo de análisis de la estructura y evaluar nuevamente los elementos y el comportamiento de estos. El cambio consistió en que en el segundo nivel se eliminarán más muros, afectando a vigas y muros del eje crítico antes mencionado.

Figura 25. **Fotografía de construcción de elementos verticales de primer nivel**



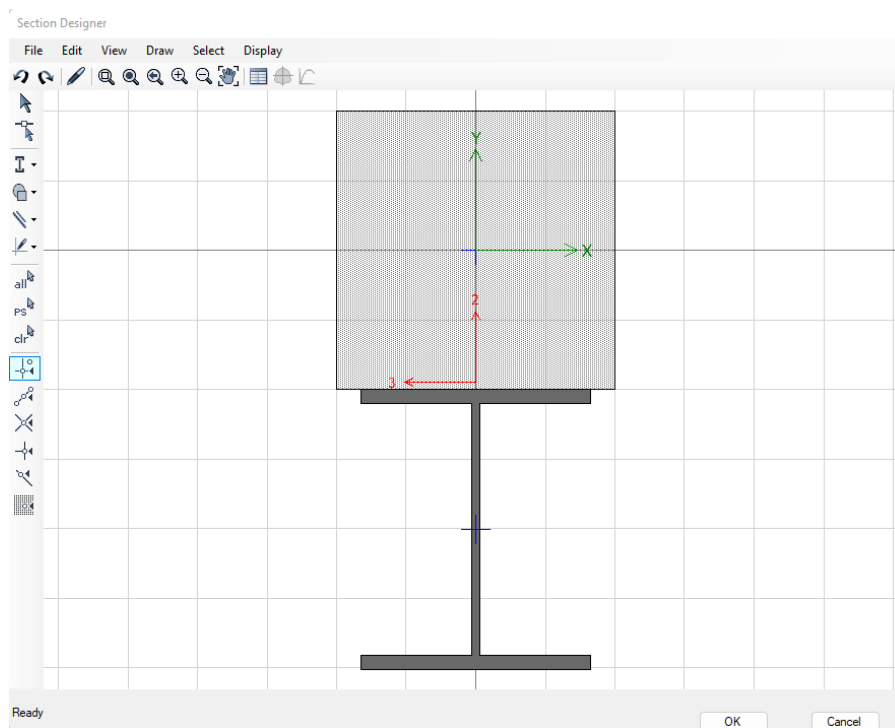
Fuente: [Fotografía de Bladimir Chicas Paz]. (Santa Catarina Pinula, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.

Figura 26. **Fotografía de losa de primer nivel**



Fuente: [Fotografía de Bladimir Chicas Paz]. (Santa Catarina Pinula, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.

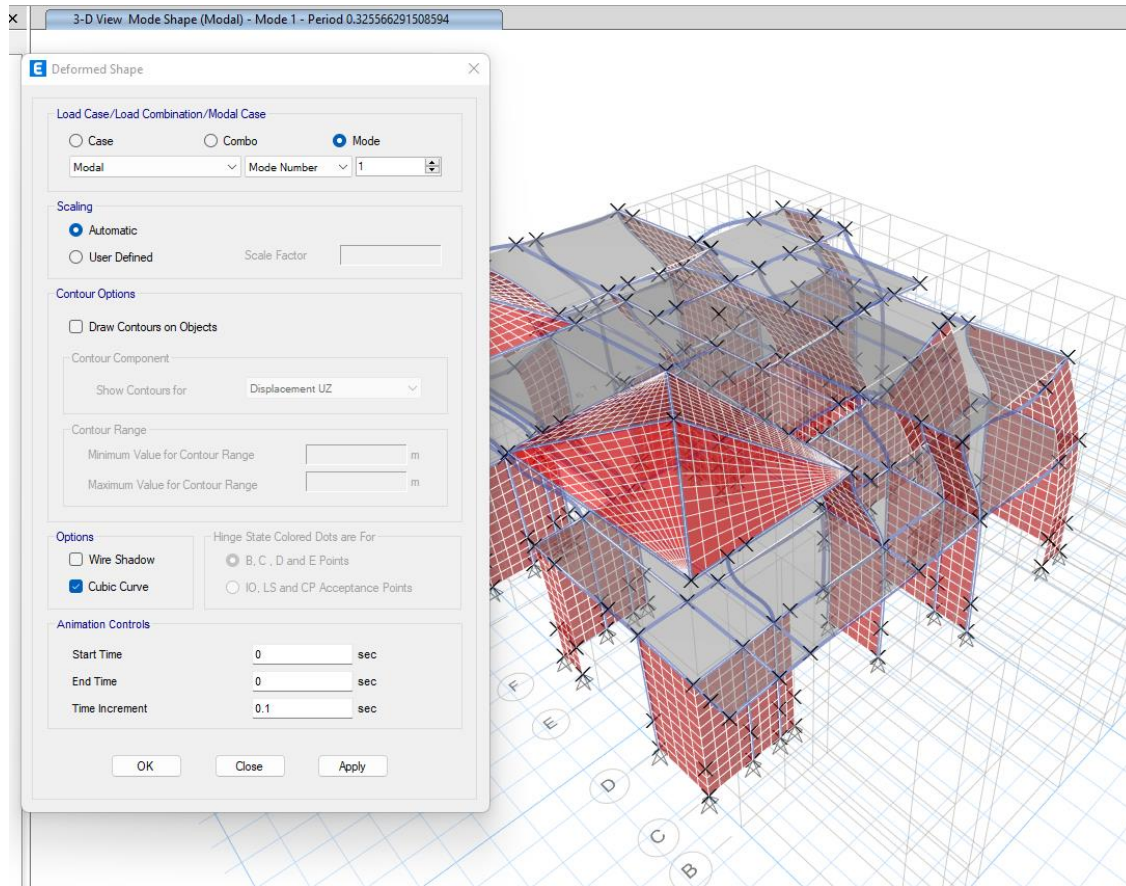
Figura 28. Sección de viga compuesta para refuerzo de eje 5



Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Por otra parte, la estructura se ve afectada por el periodo de respuesta de está obteniendo 0.325 segundos, un efecto más tardío para la estructura a comparación de la propuesta inicial.

Figura 29. Comportamiento de estructura modificada por sismo dinámico



Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Por otra parte, la participación de masa, y las derivas se encuentran dentro de los rangos establecidos, sin embargo, incrementaron. Esto fue aceptado por el responsable de la construcción.

Figura 30. Participación de masa de estructura modificada

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX
Modal	37	0.054	0.0002	0.002	0	0.9401	0.904	0	0.0035
Modal	38	0.054	0.0001	0.0005	0	0.9402	0.9045	0	0.0001
Modal	39	0.054	6.285E-07	0.0003	0	0.9402	0.9048	0	0.0007
Modal	40	0.054	0.0001	3.115E-06	0	0.9403	0.9048	0	0.0001
Modal	41	0.053	0.0002	0.0014	0	0.9405	0.9062	0	0.0004
Modal	42	0.053	0.0002	0.0001	0	0.9407	0.9063	0	0.0002
Modal	43	0.052	0	2.096E-05	0	0.9407	0.9063	0	2.345E-05
Modal	44	0.052	0.0003	3.752E-05	0	0.941	0.9064	0	0.0001
Modal	45	0.051	3.186E-05	0.0003	0	0.941	0.9067	0	0.0019
Modal	46	0.051	4.138E-05	0.0245	0	0.9411	0.9312	0	0.0676
Modal	47	0.05	0.001	0.0009	0	0.9421	0.9321	0	0.0043
Modal	48	0.048	2.466E-05	0.0002	0	0.9421	0.9323	0	0.002
Modal	49	0.047	0.0001	0.0003	0	0.9422	0.9326	0	0.0013
Modal	50	0.046	0.0002	0.0005	0	0.9424	0.9331	0	0.0018

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Figura 31. Derivas máximas del sistema con primer nivel de construcción

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Direction	Max Drift m	Avg Drift m	Ratio
N2	Dead	LinStatic			X	0.000349	0.00011	3.17
N2	Dead	LinStatic			Y	0.000252	0.000106	2.477
N2	Live	LinStatic			X	2.3E-05	1.3E-05	1.777
N2	Live	LinStatic			Y	5E-05	3.3E-05	1.528
N2	Modal	LinModEigen	Mode	1	X	8.7E-05	7.2E-05	1.201
N2	Modal	LinModEigen	Mode	2	X	8.1E-05	1.3E-05	6.119
N2	Modal	LinModEigen	Mode	2	Y	9.3E-05	3E-05	3.097
N2	Modal	LinModEigen	Mode	3	X	1E-06	4.403E-08	16.212
N2	Modal	LinModEigen	Mode	3	Y	1E-06	3.135E-07	4.701
N2	Modal	LinModEigen	Mode	4	Y	7.8E-05	4.4E-05	1.776
N2	Modal	LinModEigen	Mode	5	Y	9E-06	5E-06	1.888
N2	Modal	LinModEigen	Mode	6	X	9E-06	3E-06	2.878
N2	Modal	LinModEigen	Mode	6	Y	5E-06	4.529E-07	12.074
N2	Modal	LinModEigen	Mode	7	X	3E-06	1E-06	3.994
N2	Modal	LinModEigen	Mode	7	Y	5E-06	3E-06	1.771
N2	Modal	LinModEigen	Mode	8	X	4E-06	1E-06	4.044

Fuente: elaboración propia, empleando Etabs.

Figura 32. **Fotografía de fundición de losa de segundo piso**



Fuente: [Fotografía de Bladimir Chicas Paz]. (Santa Catarina Pinula, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala

Figura 33. **Colocación de viga de acero para refuerzo de eje 5**

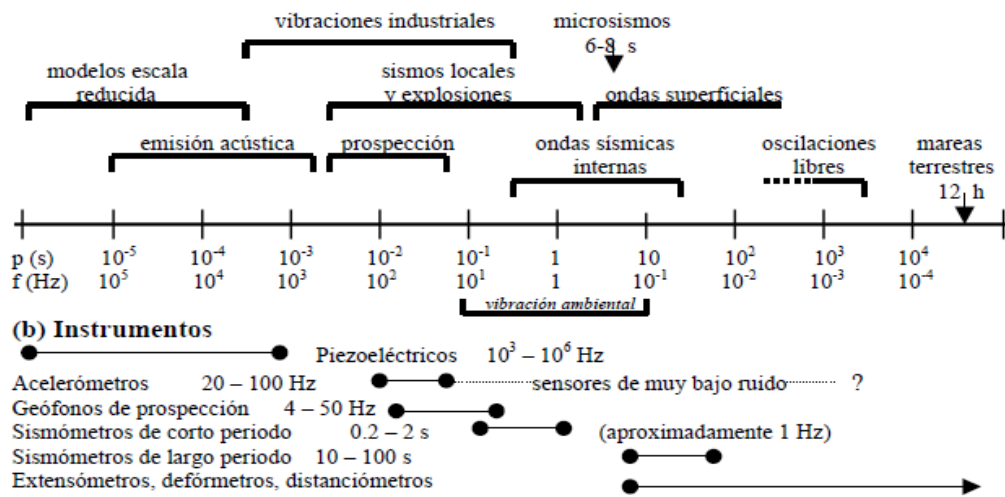


Fuente: [Fotografía de Bladimir Chicas Paz]. (Santa Catarina Pinula, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala

4. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO

Las consideraciones que se deben de tomar para la elección de instrumentación requieren que se tenga conocimiento sobre espectros de frecuencia de vibraciones como lo pueden ser los sismos, vibraciones por industrias, construcciones aledañas, entre otras. Por otra parte, se requiere la amplitud de movimiento de suelo (Barreras, 1999).

Figura 34. Espectro sísmico



Fuente: Roca (1996). *Apuntes docentes del curso instrumentación sísmica*.

El esquema de la figura 1 representa intervalos de medición de periodos y frecuencias para las cuales se pueden registrar una señal que puede ser velocidad o aceleración para medir pequeñas amplitudes, en su defecto estas pueden ser registradas como una sola señal. Sin embargo, la norma American

National Standard Institute (ANSI S2.47), indica realizar medidas simultáneas para funciones de transferencia con un equipo de al menos 2 canales.

Para el diseño de edificaciones se crean modelos matemáticos en diferente *software* con el fin de predecir el comportamiento dinámico de las mismas. Existen aspectos estructurales de los cuales existen incertidumbres en sus comportamientos (Murià y González, 1995).

Para mediciones dinámicas se requieren aparatos donde los factores a considerar sean vibraciones industriales, sismos locales, fallas locales, mareas, entre otras. Para la selección de un instrumento a utilizar se debe tomar en cuenta el movimiento de la estructura que se desea monitorear, con ello se determina el ancho de banda y rango dinámico para el tipo de señal. En este caso se pueden considerar diferentes factores según el caso que se presente (Glisic y Inaudi, 2007).

Tabla X. **Factores para monitoreo estructural**

Estrategia de monitoreo	Instalación del sistema de monitoreo	Mantenimiento del sistema de monitoreo	Manejo de los datos	Cierre de actividades
Objetivo del monitoreo	Instalación de sensores	Proporcionar el suministro eléctrico	Ejecución de las mediciones	Interrupción del monitoreo
Selección de los parámetros a monitorear	Instalación de accesorios	Proporcionar líneas de comunicación	Almacenamiento de los datos	Retiro del sistema de monitoreo
Selección de equipo	Instalación de unidades de lectura	Ejecución de planes de mantenimiento	Proporcionar acceso a los datos	Almacenamiento del equipo de monitoreo

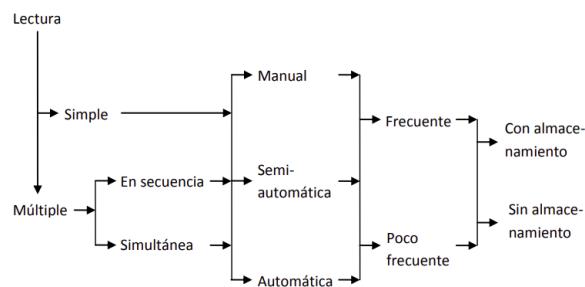
Continuación tabla X.

Establecer puntos de medición	Instalación de <i>software</i>	Reparación y reemplazo de elementos descompuestos	Visualización	Instalación de <i>software</i>
Determinar el calendario	Interacción con los usuarios		Salida de datos	Interacción con los usuarios
Aprovechamiento de datos			Interpretación de los datos	
Costos			Análisis de datos	
			Uso de datos	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Para la información generada y el almacenamiento se puede hacer de manera manual, semiautomática o automática, tanto en un sitio o de manera remota. Para ello se efectúan las posibles combinaciones del proceso representadas en el siguiente esquema.

Figura 35. **Proceso de recolección de datos**



Fuente: elaboración propia, con datos de Glisic y Inaudi (2007). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*.

Con base a los parámetros que se desean monitorear estos se dividen en 3 categorías de manera general:

- Monitoreo estático
- Monitoreo dinámico
- Sistema de identificación y análisis modal

Además, se podrían hacer combinaciones de acuerdo con el tipo de estructura que se desee analizar. Así mismo los parámetros dependen de factores como la magnitud de las cargas, condiciones ambientales, degradación de elementos, entre otros. Por otra parte, se pueden clasificar por su comportamiento como, mecánicos, físicos o químicos (Glisic y Inaudi, 2007).

Así también la colocación de sensores en las estructuras también depende de la forma de esta como también de los datos que se requieran para análisis como propone Melone (2002), para estructuras regulares se sugieren ubicaciones en base, intermedio y techo.

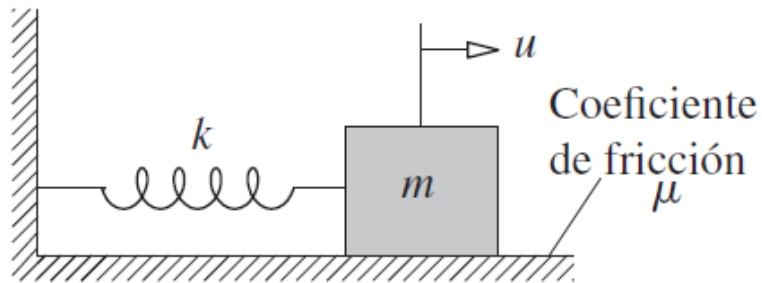
4.1. Acelerómetros

Estos instrumentos sirven para medir la magnitud de la aceleración sometida de los cuerpos, estos son recomendados utilizar en la superficie del objeto de estudio, permitiendo realizar lecturas exactas y que no sean desplazados del punto de medición, se pueden utilizar resinas, silicón o tornillos para la fijación. Estos se pueden clasificar dependiendo de la dirección:

- Uniaxiales
- Biaxiales
- Triaxiales

Para entender cómo se interpretan las aceleraciones se considera un sistema masa-resorte:

Figura 36. **Sistema masa-resorte**

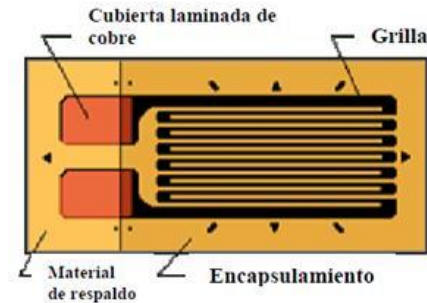


Fuente: Chopra (2014). *Dinámica de estructuras*.

4.2. **Deformímetros**

Estos instrumentos se utilizan para verificar la deformación por aplicación de esfuerzos para la determinación de propiedades dinámicas, el más común es del deformímetro de lámina conformado por una placa de metal delgado acoplado a una base delgada de resina como aislante.

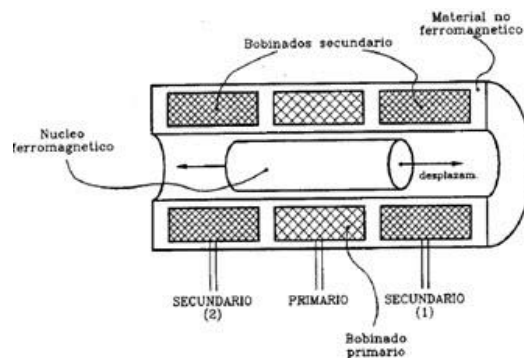
Figura 37. **Deformímetro de lamina**



Fuente: Choque (s.f.). Extensométrica. Consultado el 19 de septiembre de 2021. Recuperado de <http://urielchoquel.blogspot.com>.

Este es un dispositivo universal. Es un transformador diferencial variable lineal (LVDT) por sus siglas en inglés, el cual puede detectar deformaciones mayores a las de un deformímetro. Tienen una complicación al momento de medir pequeños desplazamientos a comparación de un deformímetro.

Figura 38. **Transformador LVDT (transformador diferencial de variación lineal)**



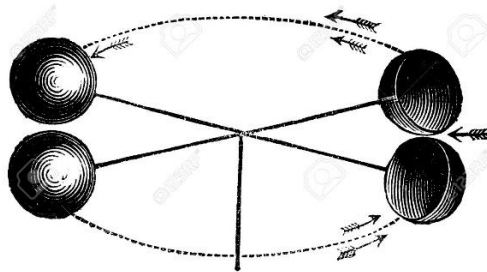
Fuente: APUNTES DEEE ESPE (2009). *LVDT (transformador diferencial de variación lineal)*.

Consultado el 19 de septiembre de 2021. Recuperado de <http://apuntesdeee.blogspot.com/2009/12/lvdt-transformador-diferencial-de.html>.

4.3. Anemómetros

Este instrumento es más conocido ya que se utiliza para la medición del fenómeno meteorológico que es el viento por el movimiento del aire desde zonas de baja a alta presión. Para edificios altos y en puentes este factor puede provocar casos extremos en estabilidad como la dificultad durante su construcción. El anemómetro mide la velocidad y la dirección.

Figura 39. **Anemómetro tipo Robinson**



Fuente: Morphart (s.f.). *Anemómetro de robinson*. Consultado el 5 de septiembre de 2021. Recuperado de https://es.123rf.com/photo_13766533_anem%C3%B3metro-de-robinson-o-el-grabado-de-viento-indicador-de-la-vendimia-ilustraci%C3%B3n-del-antiguo-grabado-del.html.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Debido a los cambios realizados durante la construcción de la estructura para vivienda, se pudo observar los cambios provocados de acuerdo con las propiedades dinámicas y cambios de masas de la estructura, incluyendo que se llegó a un riesgo muy alto por lo que se debió reforzar un eje de la estructura.

5.1. Formas modales

A continuación, se realiza la comparación de periodo de respuesta de estructura.

Tabla XI. **Comparación de periodo de respuesta de estructura**

Modal	T (s) Propuesta inicial de estructura	T (s) Propuesta final de estructura
1	0.276	0.326
2	0.206	0.286
3	0.203	0.203
4	0.15	0.151
5	0.145	0.145
6	0.142	0.142
7	0.124	0.124
8	0.124	0.124
9	0.121	0.121
10	0.12	0.12
11	0.115	0.115
12	0.111	0.111
13	0.108	0.105

Continuación tabla XI.

14	0.105	0.105
15	0.105	0.103
16	0.103	0.098
17	0.097	0.095
18	0.095	0.093
19	0.093	0.092
20	0.092	0.092
21	0.092	0.087
22	0.084	0.084
23	0.084	0.083
24	0.083	0.082
25	0.08	0.08
26	0.074	0.077
27	0.072	0.073
28	0.07	0.072
29	0.064	0.07
30	0.063	0.064
31	0.06	0.06
32	0.056	0.056
33	0.055	0.055
34	0.055	0.055
35	0.055	0.055
36	0.054	0.054
37	0.054	0.054
38	0.054	0.054
39	0.054	0.054
40	0.054	0.054
41	0.053	0.053
42	0.053	0.053
43	0.052	0.052
44	0.052	0.052

Continuación tabla XI.

45	0.051	0.051
46	0.05	0.051
47	0.049	0.05
48	0.048	0.048
49	0.047	0.047
50	0.046	0.046

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En este comparativo se puede notar que inicialmente el periodo de la estructura modificada se alargó en una cantidad de 5 segundos, esto por la razón de que se eliminaron muros que evidentemente tenían un aporte al momento de enfrentar un sismo. En el modo 1 y 2 los periodos se desfasan, indicando más duración en un movimiento en sentido x, y posteriormente en y, a partir del modo 3, en este caso torsión, el comportamiento se muestra de manera similar.

Así mismo con la realizando una comparación de la figura 20 con la figura 30 que contienen la participación de masa se tiene una pequeña variación como se muestra a continuación.

Tabla XII. **Comparación de participación de masa**

Figura	Participación de masa sentido X	Participación de masa sentido Y
20	0.947	0.9376
30	0.9424	0.9331

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Con base a esto se puede observar que la participación de masa ha disminuido, esto por razón de que se eliminaron elementos del nivel 2 que participaban en el comportamiento de la estructura.

5.2. Desplazamientos laterales

Para la comparación de derivas por fuerzas laterales primero se calcula la deriva máxima permitida según AGIES (2018). Inicialmente consideramos los factores para el tipo de sistema al que estamos analizando el cual es un E2-DA, de mampostería reforzada.

$$R = 4$$

$$Cd = 3.5$$

$$\Omega_r = 2.5$$

Posterior se realizó el cálculo de deriva última tolerable de acuerdo con la tabla 4.3.3 de NSE-3 de AGIES (2018). En donde el factor de acuerdo con la norma nos indica lo siguiente. Para este caso se consideró un análisis con edificaciones en general, debido a que esta estructura se consideró con refuerzo de acero estructural.

$$\Delta_u = Factor * H_p \quad (24)$$

$$Factor = 0.02$$

$$H_p = 5.8$$

$$\Delta_u = 0.116$$

Tabla XIII. **Comparación de derivas máximas**

Nivel	Altura (m)	Δ_u (m)	Δ_u/C_d (m)	Deriva X	Deriva X	Deriva Y	Deriva Y
				modelo inicial (m)	modelo final (m)	modelo inicial (m)	modelo Final (m)
2	2.90	0.0580	0.0166	0.0104	0.0029	0.0013	0.0079
1	2.90	0.0580	0.0166	0.0007	0.0007	0.0017	0.0036

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Como podemos observar, ambos modelos se encuentran dentro del rango permitido de acuerdo con AGIES (2018). Así mismo podemos notar como las derivas en comparación con el modelo inicial contra el final, disminuyen para el sentido x para el nivel 2, esto surge por la razón de que en el piso 1 el sistema de vigueta y bovedilla fue modificado con respecto a su sentido, a razón de los cambios realizados durante el proceso de construcción. Por otra parte, tenemos en el sentido y, incremento tanto en nivel 1 y 2, esto debido a la misma razón de cambiar el sentido de vigueta y bovedilla, por otra parte, la eliminación de algunos muros de nivel 2, para lo cual se agregó una viga de acero estructural.

5.3. Fuerzas laterales y masa

En este caso tenemos variaciones más significativas debido a que acá se involucra la masa y rigidez, tenemos entendido que se eliminaron elementos, como también se reforzaron otros.

Tabla XIV. **Comparación de masas y fuerzas laterales**

Estructura	Masa (kg)	Fuerza lateral x (kgf)	Fuerza lateral y (kgf)
Inicial	329,881.61	92,292.92	88,505.22
Final	314,898.86	68,011.92	75,925.99

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En este punto se puede observar el cambio de masa significativo, al momento de realizar la modificación del modelo. Por otra parte, la fuerza lateral es dependiente de la cantidad de masa, así como podemos ver que para el modelo final las fuerzas laterales han disminuido de igual manera, es importante destacar que estas fuerzas laterales fueron tomadas del comportamiento dinámico de la estructura.

5.4. Consideraciones

En este punto se ha determinado que para una supervisión adecuada para para comportamiento de estructuras, debemos ir de la mano con los modelos experimentales como herramienta esencial para tener un control adecuado, para ello se pueden tomar en cuenta los siguientes pasos:

- Modelar, analizar y diseñar de acuerdo con la normativa correspondiente.
- Modelar, revisar derivas y esfuerzos por partes de construcción, considerando cargas de trabajo, como también no considerar el 100 % de la capacidad de dicha parte en caso de no ser acero estructural. Esto por la razón de que el concreto tiene un proceso de fraguado.

- Al momento de realizar una variación, en la estructura, se debe actualizar el modelado, como también realizar los chequeos mencionados en el punto 1 y 2. En esta fase se recomienda que los elementos que se tengan encofrados y apuntalados se mantengan de la misma manera hasta determinar si es adecuado retirar la obra falsa.
- Al finalizar la obra gris, se debe verificar los elementos estructurales de manera que no tengan fallas prematuras.

Es importante mencionar que si se tiene la oportunidad se debe implementar instrumentación, esto con el objetivo de obtener datos en el caso de ocurrencia de un sismo y así poder revisar si se sobrepasó algún límite en algún elemento o no. Posteriormente esto se puede utilizar para análisis de desempeño de la estructura.

CONCLUSIONES

1. La comparación de las propiedades dinámicas por cargas de trabajo debido a cambios de masa y rigideces induce cambios significativos en las estructuras, las cuales pueden llegar a provocar daños severos en los elementos principales, provocando una inseguridad estructural al no realizar las revisiones correspondientes de manera física como en modelos matemáticos, sobre todo en áreas donde el índice de sismicidad es mayor a 4 de acuerdo con NSE de AGIES.
2. Un proceso adecuado para el monitoreo de un comportamiento dinámico de una estructura se puede realizar creando modelos matemáticos de la construcción de la estructura por fases, considerando que la capacidad de cada nivel no está al 100 % de desempeño.
3. Para evaluar las alteraciones de cargas dinámicas durante la construcción podemos tomar en cuenta los resultados obtenidos por un análisis modal en cuanto a la respuesta de la estructura ante un sismo, así también, evaluar las derivas generadas por el movimiento, comparadas con las permitidas de acuerdo con la normativa y por último analizar el cambio de masa, y comportamiento de los elementos ante la fuerza lateral en donde se determinará si requiere un refuerzo adicional o no.
4. Durante la construcción de una estructura se debe tener previamente el análisis y diseño de la estructura a edificar, como también un cronograma de trabajo de las cuales partiremos por colocar las revisiones en campo, y

así proceder como se indica en el capítulo 5, subíndice 5.4 de este documento.

5. La instrumentación es una herramienta esencial para las estructuras porque nos permite considerar datos más precisos del comportamiento de una estructura, por otra parte, se utiliza para valorar si la estructura aún puede ser habitable o está en un riesgo de desplome.
6. En los modelos matemáticos, los programas pueden llegar a considerar vigas de gran tamaño en el caso donde un muro exista solo entre 2 niveles de borde a borde, sin llegar a la base, es decir, para un edificio de 2 niveles, puede existir un muro entre el nivel 1 y 2. En este caso los esfuerzos pueden llegar a reducirse por este fenómeno para lo cual se deberá revisar minuciosamente los espacios que contengan estas características.
7. Las viviendas que podemos clasificar como lujosas, tienen a tener más irregularidades de lo esperado debido a ambientes amplios, desfases cortos de ejes, techos curvos, entre otros, para lo cuales es importante realizar los análisis correspondientes durante la construcción de la estructura, para no provocar daños prematuros, como también notificar al responsable la vulnerabilidad que puede llegar a tener la estructura.

RECOMENDACIONES

1. Implementar la metodología de análisis de estructuras por fases de construcción, sobre todo donde existan irregularidades relevantes, a fin de prevenir riesgos estructurales.
2. Evitar copiar diseños de otros proyectos o se asumen valores de estudios de suelos cercanos que no siempre tienen el mismo comportamiento, derivado a la presencia de patrones muy comunes en el sector construcción que no se realizan, tal como el estudio de suelos.
3. Realizar una correcta gestión profesional al momento de revisar propuestas arquitectónicas para una edificación al momento de un análisis y diseño, esto dado que el sistema estructural por mampostería, en algunos casos se llega a abusar de la capacidad que puede tener.

REFERENCIAS

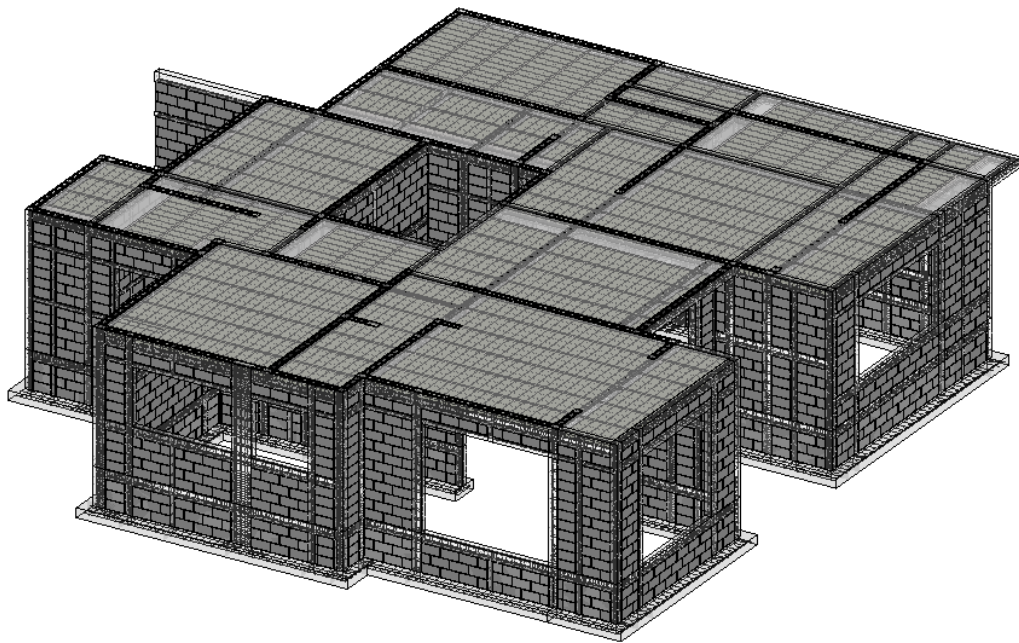
1. Acuña, T. R. (2009). *Variación debido a cambios de masa y rigidez de las propiedades dinámicas de una estructura en proceso constructivo* (Tesis de maestría). Universidad de Chile, Chile.
2. American National Standard Institute (1990). *Vibration of Building-Guidelines for te Measurement of Vibration and Evaluation of their effects on Buildings*. Washington D.C, Estados Unidos: Autor.
3. Ángel, D. H. (2013). *Identificación de las propiedades dinámicas de una estructura sometida a vibración ambiental empleando análisis espectral* (Tesis de maestría). Universidad EAFIT, Colombia.
4. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2018). *Normativa de seguridad estructural*. Guatemala: Autor.
5. Barreras, F. E. (1999). *Determinación de características dinámicas de estructuras*. Barcelona, España: Autor.
6. Bendat, J. y Piersol, A. (1993). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. New York, Estados Unidos: Jonh & Sons.
7. Bendat, J. y Piersol, A. (2010). *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

8. Bernal, R. y Melo, F. (s.f.). *Técnicas Experimentales Análisis de Señales*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Santiago.
9. Branko Glisic y Daniele Inaudi. (2007). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. Manno, Suiza: Autor.
10. Carreño, B. B. (1999). *Registro y Tratamiento de Acelerogramas*. Lima Perú: Autor.
11. Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras*. California, Estados Unidos: Autor.
12. Diaz, A. A. (2013). *Bases para la generación de un sistema de inspección estructural de edificios en Chile*. Valdivia, Chile: Autor.
13. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (2022). *Terremotos en Guatemala*. Guatemala: Autor.
14. Mau, S. y Li, Y. (1991). *A case Study of MIMO System identification Applied to Building Seismic Records*. Estados Unidos: Autor.
15. Melone, S. S. (2002). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales, análisis de su contribución al riesgo sísmico* (Tesis de maestría). Universitat Politècnica de Catalunya, España.
16. Meruane, V. (2011). *Dinámica Estructural, Apuntes para el curso ME706*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.

17. Murià, D. (2007). *Experiencia Mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados*. Ciudad de México, México: ai México.
18. Murià, D. y González, R. (1995). *Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México*. Ciudad de México, México: ai México.
19. Newland, D. E. (1993). *An Introduccion to Random vibrations and wavelet analysis*. Nueva York, Estados Unidos: Prentice Hall y Harlow.
20. Oca, C. A. (2009). *Pruebas de vibración ambiental para determinar las propiedades dinámicas de un edificio de 23 niveles y los efectos interacción suelo-estructura* (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México.
21. Orozco, G. F. (2019). *Análisis de vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería confinada, mediante análisis no lineal de cargas laterales incrementales en Guatemala* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
22. Roca, A. (1996). *Apuntes Docentes del Curso Instrumentación sísmica*. Barcelona, España: Autor.

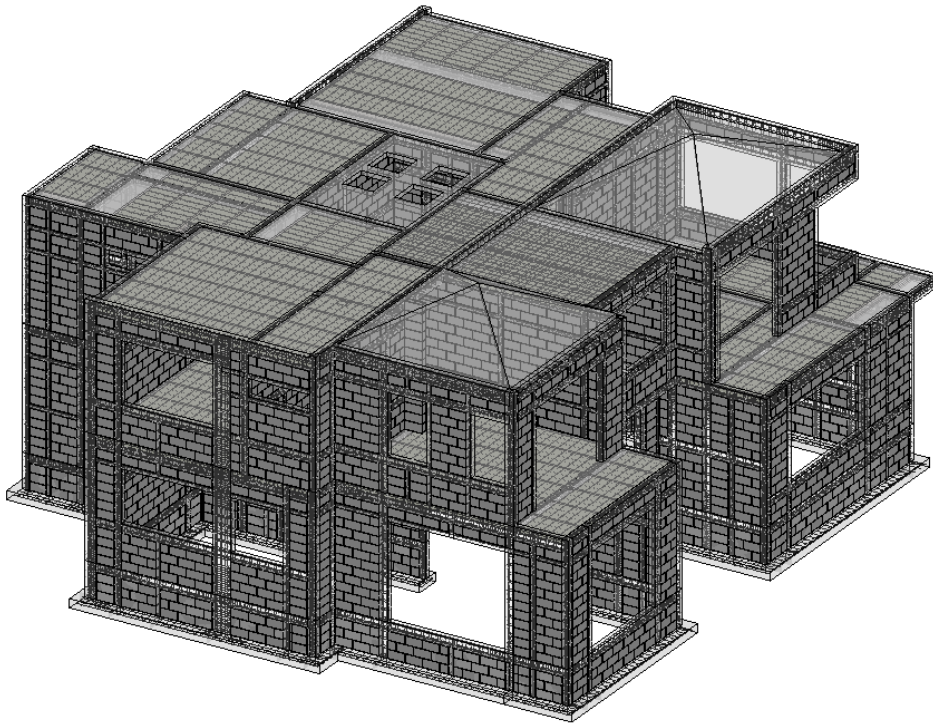
APENDICE

Apéndice 1. **Perspectiva de modelo 3D con visualización de armaduras de estructura con 1 nivel**



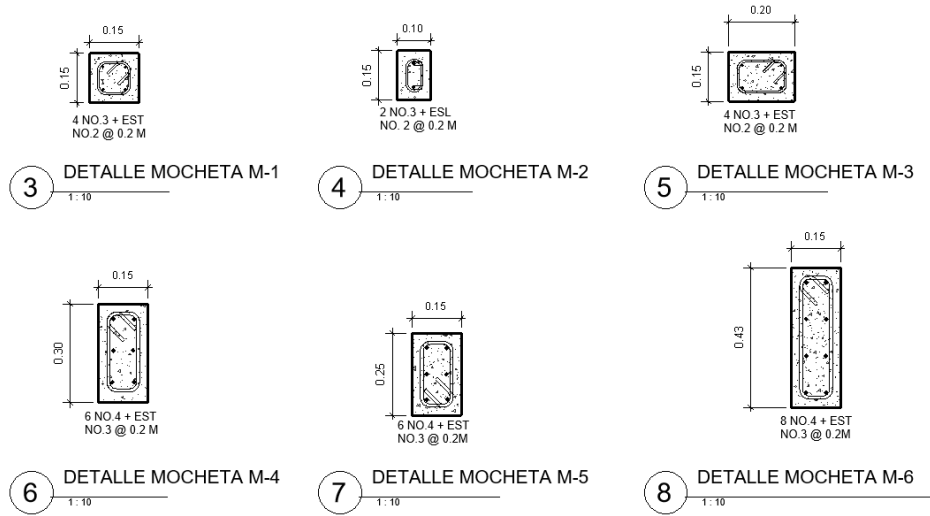
Fuente: elaboración propia, empleando Revit.

Apéndice 2. Perspectiva de modelo 3D de estructura con visualización completa



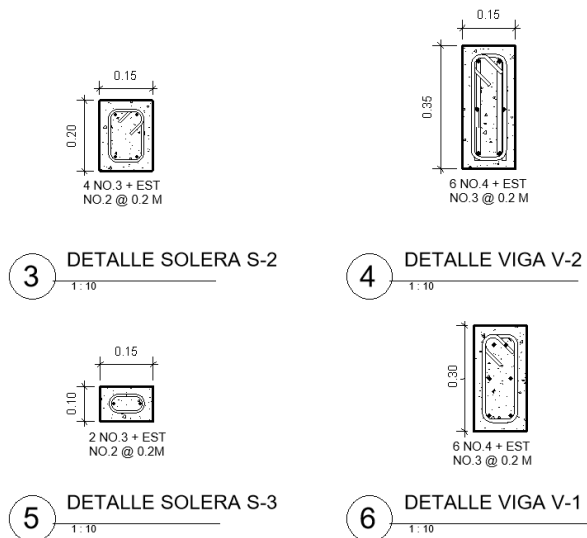
Fuente: elaboración propia, empleando Revit.

Apéndice 3. Detalle de mochetas



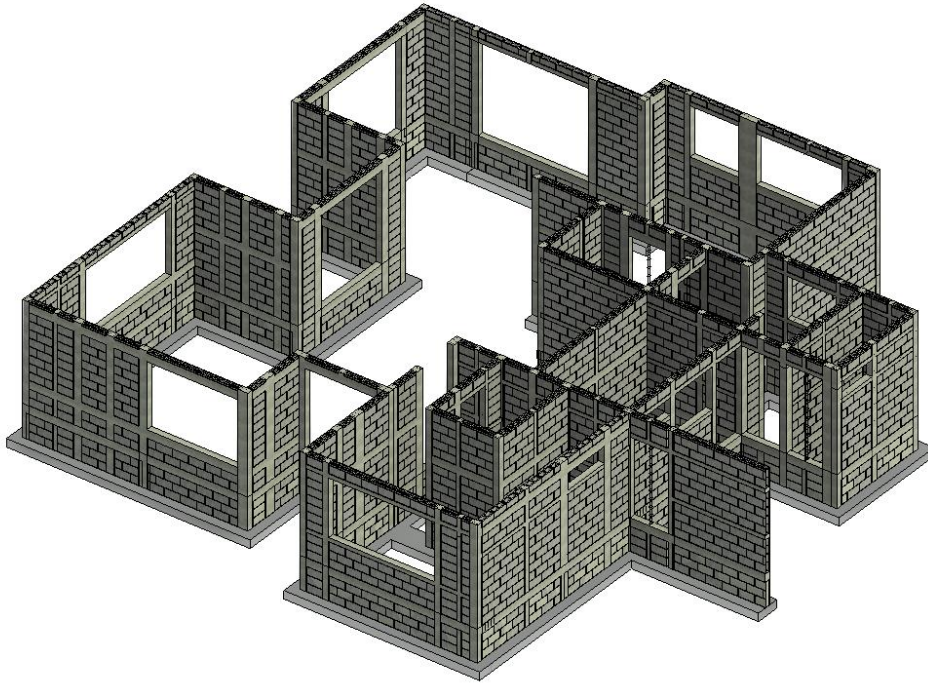
Fuente: elaboración propia, empleando Revit.

Apéndice 4. Detalle de vigas y soleras



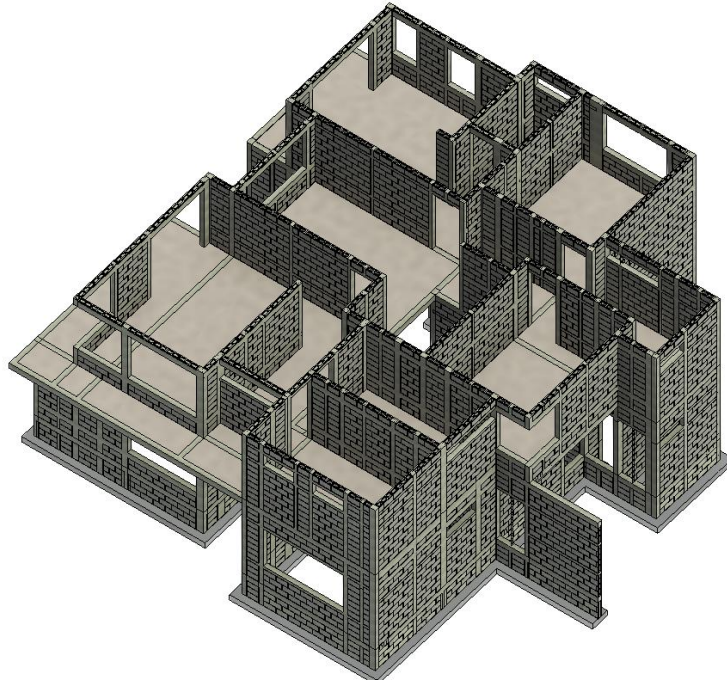
Fuente: elaboración propia, empleando Revit.

Apéndice 5. **Perspectiva 3D de elementos verticales de nivel 1**



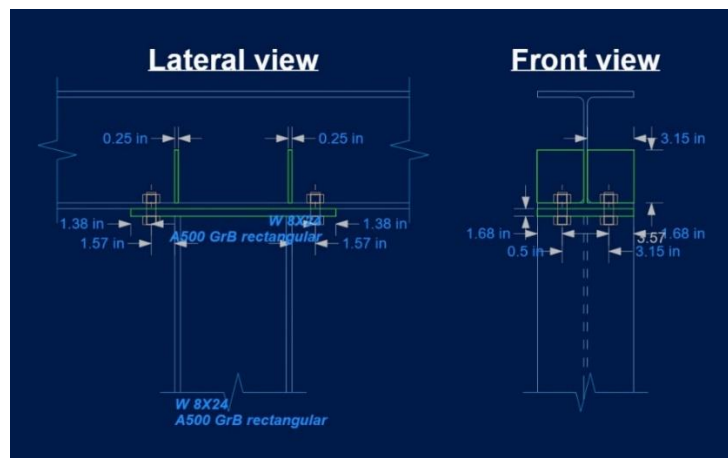
Fuente: elaboración propia, empleando Revit.

Apéndice 6. **Perspectiva 3D de elementos verticales de nivel 2**



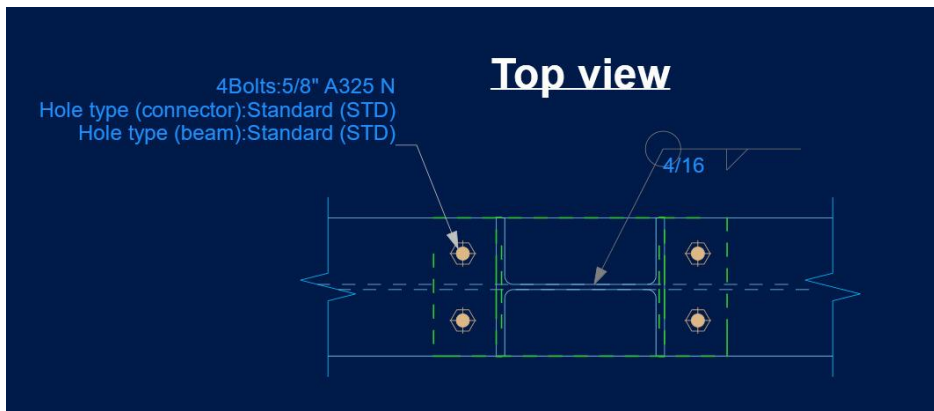
Fuente: elaboración propia, empleando Revit.

Apéndice 7. **Detalle 1 de refuerzo de marco con viga de acero estructural**



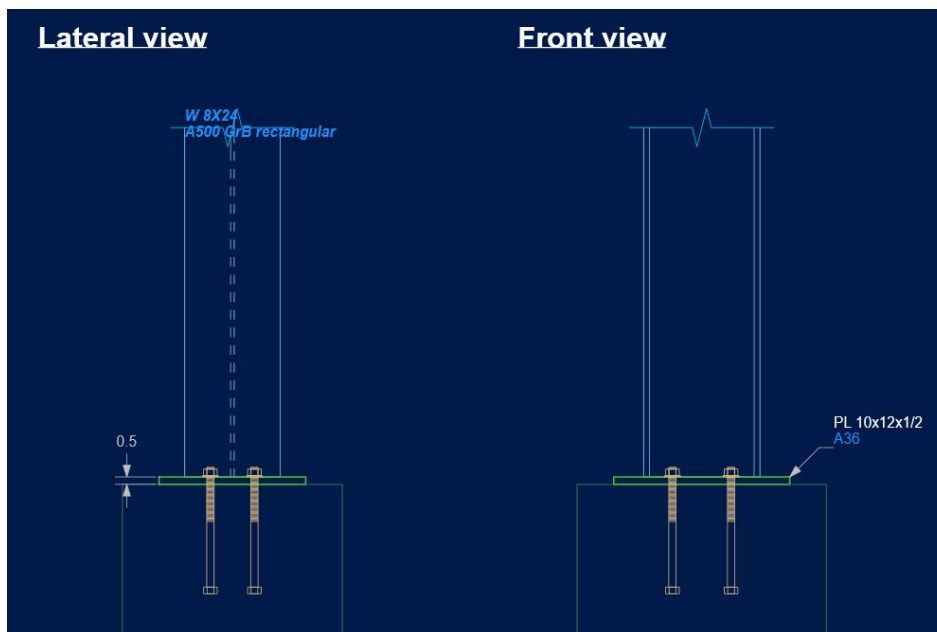
Fuente: elaboración propia, empleando RAM Connection.

Apéndice 8. **Detalle 1 de refuerzo de marco con viga de acero estructural**



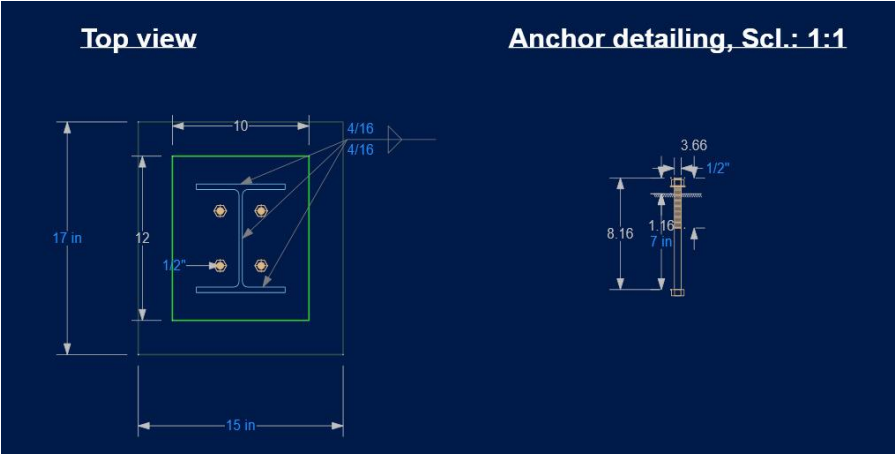
Fuente: elaboración propia, empleando RAM Connection.

Apéndice 9. **Detalle 2 de refuerzo de marco con viga de acero estructural**



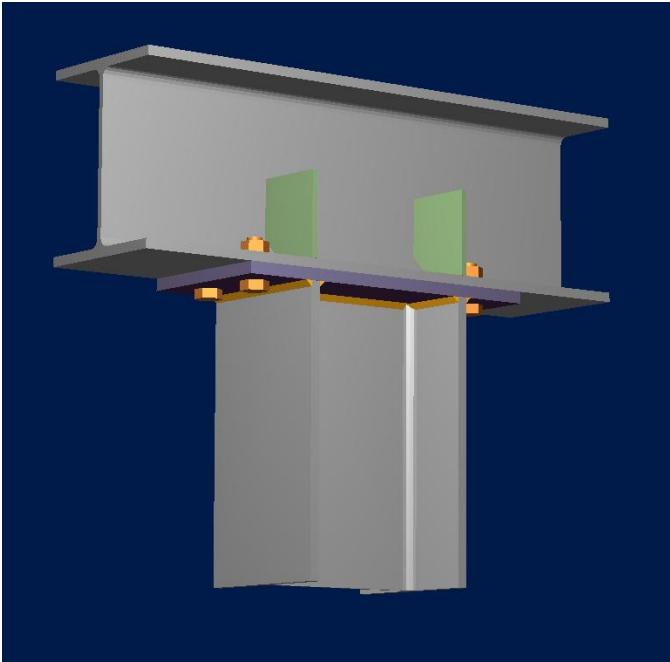
Fuente: elaboración propia, empleando RAM Connection.

Apéndice 10. **Detalle 3 de refuerzo de marco con viga de acero estructural**



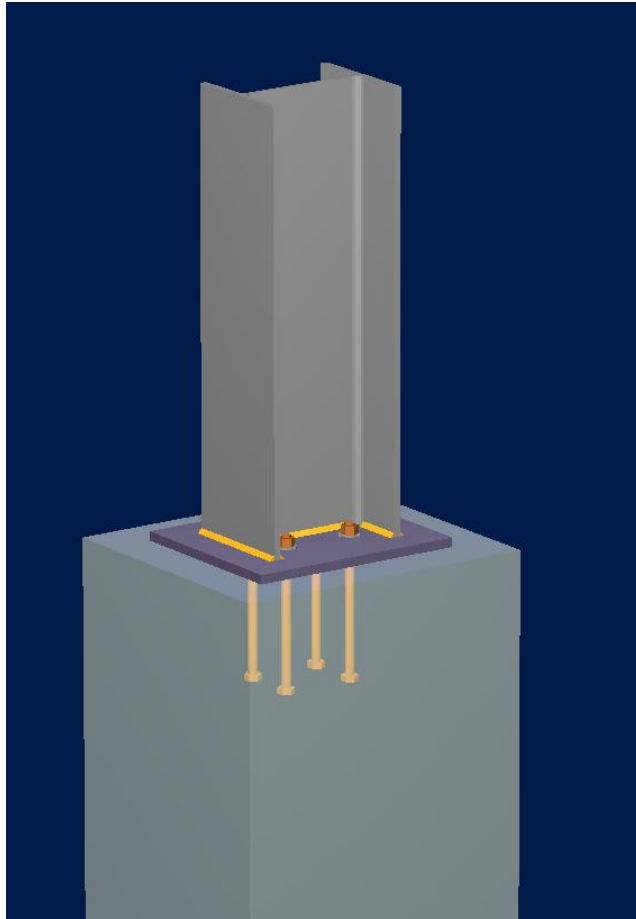
Fuente: elaboración propia, empleando RAM Connection.

Apéndice 11. **Perspectiva 3D de conexión de columna y viga**



Fuente: elaboración propia, empleando RAM Connection.

Apéndice 12. **Perspectiva 3D de conexión de columna a base**



Fuente: elaboración propia, empleando RAM Connection.

ANEXOS

Anexo 1. Fotografía de conexión



Fuente: [Fotografía de Bladimir Chicas Paz]. (Santa Catarina Pinula, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.

Anexo 2. Fotografía de trazo y zanjeo para cimentación



Fuente: [Fotografía de Bladimir Chicas Paz]. (Santa Catarina Pinula, Guatemala. 2022).
Colección particular. Guatemala.