ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Estudio del desempeño sísmico de estructuras sísmicamente aisladas mediante modelación 2D no lineal, considerando reducción de resistencia en su diseño estructural

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Maestría en estructuras civiles sismorresistente

Presentado por:

Walter James Flores Zambrano

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por permitirme culminar esta hermosa etapa de mi vida, a la Virgen María por estar presente en mis días, a mi esposa Gema Cedeño, a mi hijo Sebastián, a mi madre María Zambrano Govea, a mi padre Walter Flores Díaz por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido cumplir la meta. A la ESPOL por abrirme las puertas y fórmame como profesional. Y a todos los profesores que contribuyeron con nuestra formación académica especialmente al Ing. Luis Villavicencio.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Walter James Flores Zambrano* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Firmado electrónicamente por:
WALTER JAMES FLORES ZAMBRANO

Walter James Flores
Zambrano

EVALUADORES

Firmado electrónicamente por:
NADIA ROSAURA QUIJANO ARTEAGA

Ing. Nadia Quijano Arteaga, Msc.

PROFESOR DE LA MATERIA

Firmado electrónicamente por:
SAMANTHA ELIZABETH HIDALGO ASTUDILLO

Ing. Samantha Hidalgo, Msc.

PROFESOR DE LA MATERIA

Firmado electrónicamente por:
LUIS FERNANDO VILLAVICENCIO CAVERO

Ing. Luis Villavicencio Cavero, Msc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En la siguiente investigación se estudia el desempeño sísmico de una estructura con base fija y con sistema de aislación modificando los factores de reducción de resistencia ya que esto implica generación de rotulas plásticas y daño.

La investigación se centra en un pórtico representativo de un proyecto real con categoría esencial ubicado en Portoviejo, Manabí, Ecuador. La modelación se realizará en un software de código abierto Openseespy, se efectuará un análisis pushover y tiempo historia siguiendo el método de integración directa.

El proyecto se desarrollará usando modelación en 2D con análisis lineales y no lineales en la superestructura y en el sistema de aislación. Como resultado del análisis se mide datos importantes que son el desplazamiento máximo, la razón de ductilidad y el desempeño, con diferentes registros sísmicos del terremoto de pedernales del 2016.

Con los resultados del análisis luego de modificar los valores de reducción de resistencia se verifica la ventaja del uso de aislación ya que se evidencia una reducción de los parámetros analizados en comparación al sistema empotrado, en cambio las demandas de ductilidad aumentan significativamente en las estructuras aisladas al incrementar los factores de reducción. Esto demuestra la importancia de mantener en rangos elásticos las estructuras diseñadas con aisladores para garantizar su desempeño.

El uso de aislamiento en la base en edificaciones mejora el comportamiento frente a sismos, pero su efectividad depende de la correcta estructuración del sistema principal manteniéndose rígida frente a los sismos de diseño para no generar daños que cambien su desempeño.

Palabras clave: aislamiento sísmico, OpenSeesPy, reducción de resistencia, modelación no lineal.

ABSTRACT

In the following research, the seismic performance of a structure with a fixed base and with an isolation system is studied by modifying the strength reduction factors, as this influences the formation of plastic hinges and damage.

The study focuses on a representative frame from a real project classified as essential, located in Portoviejo, Manabí, Ecuador. The modeling will be carried out using the open-source software OpenSeesPy, performing pushover and time-history analyses following the direct integration method.

The project will be developed using 2D modeling with linear and nonlinear analyses applied to both the superstructure and the isolation system. The analysis will yield key results, including maximum displacement, ductility ratio, and performance, using different seismic records from the 2016 Pedernales earthquake.

Based on the analysis results after modifying the strength reduction factors, the advantages of using isolation are confirmed, as a reduction in the analyzed parameters is observed compared to the fixed-base system. However, ductility demands significantly increase in isolated structures when strength reduction factors are raised. This highlights the importance of maintaining structures with isolators within elastic ranges to ensure their performance.

The use of base isolation in buildings improves seismic behavior, but its effectiveness depends on the proper design of the primary system, ensuring it remains rigid under design-level earthquakes to avoid damage that could compromise its performance.

***Keywords**: seismic isolation, OpenSeesPy, strength reduction, nonlinear modeling.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES 5
RESUMEN I
ABSTRACT II
ÍNDICE GENERAL III
ABREVIATURAS VI
SIMBOLOGÍA VII
ÍNDICE DE FIGURAS VIII
ÍNDICE DE TABLAS IX
ÍNDICE DE PLANOS X
CAPÍTULO 1 11
1. Introducción 11
1.1 Antecedentes 12
1.2 Localización 12
1.3 Problemática para resolver 13
1.4 Justificación 14
1.5 Objetivos 15
1.5.1 Objetivo General 15
1.5.2 Objetivos Específicos 15
CAPÍTULO 2 16
2. Desarrollo del proyecto 16
2.1 Marco conceptual 16
2.1.1 Desempeño sísmico de estructuras aisladas 16
2.1.2 Aisladores sísmicos en estructuras 16
2.1.3 Tipos de aisladores sísmicos 17

2.1.4 Modelación no lineal 19
2.1.5 Reducción de resistencia en el diseño estructural 20
2.1.6 Sistema de aislación 21
2.2 Marco metodológico 22
2.2.1 Diagrama de proceso 22
2.2.2 Modelo no lineal del pórtico 2D 23
2.2.3 Introducción a la modelación no lineal 23
2.2.4 Procedimiento de la modelación 24
2.2.5 Definición de la geometría del pórtico: 24
2.2.6 Propiedades del material: 24
2.2.7 Definición de los aisladores sísmicos: 24
2.2.8 Cargas aplicadas: 24
2.2.9 Análisis no lineal estático: 25
2.2.10 Análisis dinámico tiempo-historia: 25
2.2.11 Ajuste del factor de reducción de resistencia (R): 25
2.2.12 Parámetros del modelo 25
2.2.13 Definición del modelo sin aisladores con base fija en openseespy 30
2.2.14 Análisis dinámico tiempo-historia 36
2.2.15 Registros sísmicos utilizados 37
2.2.16 Parámetros de evaluación 42
2.2.17 Inclusión de los aisladores sísmicos 42
2.2.18 Tabulación de datos 43
CAPÍTULO 3 51
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 51
3.1 Resultados 51
3.2 Análisis estático lineal 51

3.2.1 Modos de Vibración pórtico sin aislador 51
3.3 Análisis Estático modelo sin aisladores con R=8 52
3.4 Análisis dinámico lineal modelo sin aisladores con sismo match 53
3.5 Análisis no lineal estático modelo sin aisladores 55
3.6 Análisis no lineal estático modelo con aisladores 56
CAPÍTULO 6 58
4. Conclusiones Y Recomendaciones 58
4.1 Conclusiones 58
5. Recomendaciones 59
BIBLIOGRAFÍA 60
PLANOS Y ANEXOS 62
ANEXO I – PLANOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL 73
ORIGINAL SIN AISLADOR 73

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NEC	Norma ecuatoriana de la construcción
ASCE	American Society of Civil Engineering
AISC	American Institute of Steel Construction
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute

SIMBOLOGÍA

M	Metro
m2	Metro cuadrado
cm	Centímetro
cm2	Centímetro cuadrado
mm	Milímetro
mm2	Milímetro cuadrado
cm2	Centímetro cuadrado
mg	Miligramo
Kg	Kilogramo
Kg/cm2	Kilogramo/centímetro cuadrado
Kgf/cm2	Kilogramo fuerza/centímetro cuadrado

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 Ubicación del proyecto (Google Earth.,2024) 13
FIGURA 2 aislador sísmico de caucho (Electrocenter Colombia) 17
FIGURA 3 aislador sísmico (Cámara Chilena de la Construcción CChC, 2022) 18
FIGURA 4. Modelo bilineal de sistema de aislación sísmica. Saleem (2013)..... 21
FIGURA 5 diagrama de proceso siguiendo metodología cascada 23
FIGURA 6 Modelo 3d de proyecto final (Flores J.,2024) 26
FIGURA 7 Pórtico de diseño estructural propio (Flores J.,2024) 26
FIGURA 8. Sección de viga VP1 (Flores J.,2024) 27
FIGURA 9.Sección viga VP2 (Flores J.,2024) 28
FIGURA 10.Sección de columna (Flores J.,2024) 29
FIGURA 11.Modelo de pórtico en openseespy (Flores J.,2024) 31
FIGURA 12.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024) 37
FIGURA 13.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024) 38
FIGURA 14.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024) 39
FIGURA 15.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024) 39
FIGURA 16.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024) 40
FIGURA 17.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024) 41
FIGURA 18.Espectro compatible obtenido (Seismomatch)..... 41
FIGURA 19.Modelo con aisladores en openseepy (Flores J.,2024)..... 43
FIGURA 20.Deformación máxima pórtico base fija openseepy (Flores J.,2024)..... 48
FIGURA 21. Deformación máxima pórtico base fija no lineal (Flores J.,2024)..... 49
FIGURA 22. Deformación máxima pórtico base aislada (Flores J.,2024). 50
FIGURA 23.Modo 1 openseepy (Flores J.,2024). 51
FIGURA 24.Modo 2 openseepy (Flores J.,2024). 52
FIGURA 25. Derivas análisis estático sin aisladores (Flores J.,2024)..... 53
FIGURA 26.Espectro de respuesta utilizado..... 54
FIGURA 27.Grafico de derivas análisis dinámico sin aisladores. 55
FIGURA 28.Curva de capacidad modelo sin aisladores en openseespy 56
FIGURA 29.Curva de capacidad modelo con aisladores en openseespy 56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Propiedades geométricas viga VP1 28
Tabla 2.Propiedades geométricas viga VP2 29
Tabla 3.Propiedades geométrica de columna 29
Tabla 4.Parámetros del aislador. 43
Tabla 5.Parámetros y resultados sismo ACHN 45
Tabla 6.Parámetros y resultados sismo AES2 45
Tabla 7.Parámetros y resultados sismo ASDO 46
Tabla 8.Parámetros y resultados sismo APED 46
Tabla 9.Parámetros y resultados sismo APO1 47
Tabla 10.Parámetros y resultados sismo AMNT 47

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Plano 3D estructura principal

PLANO 2 Plano de superestructura

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento estructural durante y después de un sismo ha sido estudiado durante décadas, especialmente en lugares que están propensos a eventos telúricos. La ingeniería civil en su rama estructural ha desarrollado formas de soluciones para disminuir o mitigar los daños causado por estos fenómenos naturales, siendo el sistema de aislación una de las más eficientes. este sistema se basa en desvincular el movimiento de suelo respecto a la edificación, lo que permite alargar el periodo natural y disminuir las fuerzas que actúan sobre la edificación, esto reduce los daños potenciales en la parte estructural y no estructural (Naeim & Kelly, 1999; Chopra, 2020).

Sin embargo, la verificación por desempeño de sistemas estructurales aislados no es un proceso fácil, ya que al ingresas a rangos no lineales involucra el uso de diferentes variables de los materiales y elementos. Uno de los análisis que poco se ha investigado es verificar la estructura aislada haciendo reducciones en su resistencia. Esta variable puede permitir tener una estructura rígida siendo esto un enfoque más conservador sin comprometer la seguridad estructural (Priestley et al., 2007). En esta investigación se modela un pórtico en 2D, lo que permite evaluar cómo influye esta reducción en la respuesta estructural.

El análisis no lineal desarrollado en la modelación es importante, ya que permite evidenciar una respuesta más real bajo condiciones de sismos, proporcionando resultados más cercanos al desempeño (Mazzoni et al., 2006). Este trabajo busca evidenciar el comportamiento ante las variables mencionadas para mejorar las practicas del diseño estructural y tener edificaciones más seguras frente a eventos sísmicos.

.

1.1 Antecedentes

El sistema de asolación y disipación ha sido unas de las soluciones principales reconocidas por su gran efectividad en la reducción de daños provocados en un terremoto. Esta solución desvincula el movimiento del suelo en un sismo con respecto a la estructura, lo que permiten menos danos a sus elementos, al disminuir las fuerzas en la edificación estas mantendrán su integridad durante registro sísmicos importantes (Naeim & Kelly, 1999; Chopra, 2020).

Las investigaciones han demostrado que la reducción de su resistencia influye de manera directa en su demanda de ductilidad (Priestley et al., 2007; Cardone & Palermo, 2018). Lo que haría que aumente su vulnerabilidad frente a los registros sísmicos más severos. Siendo necesario ampliar la investigación mediante el análisis con estructuras de mayores periodos.

La importancia radica en evaluar el comportamiento de pórticos de acero que tengan aislación sísmica en su base, la evaluación de su desempeño mediante diferentes factores de reducción y registros símicos, siendo útil para una actualización de criterios de diseño en normativas que involucren temas de aislación.

Se realizará el estudio en base a información de un proyecto real diseñado para una estructura de uso de clínica catalogado por la NEC15 como estructura esencial.

1.2 Localización

El proyecto se encuentra ubicado en la ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí, en la avenida 5 de junio (800m del IESS), cuyas coordenadas geográficas son UTM 17S X:584m , Y:988m de acuerdo a la **FIGURA 1**.

FIGURA 1 Ubicación del proyecto (Google Earth.,2024)

1.3 Problemática para resolver

Las estructuras aisladas se diseñan en base a las normativas internacionales como son el ASCE 7 (ASCE, 2016) y el Euro código 8 (CEN, 2004) donde recomiendan factores bajos de reducción de demanda sísmica, R, lo que implica que las estructuras mantengan un comportamiento dentro del rango elástico durante el evento de un sismo. Este enfoque garantiza un mejor desempeño, pero limita el aprovechamiento de ductilidades propias de la estructura lo que implicaría en estructuras robustas y costosas.

El planteamiento es la necesidad de evaluar si el uso de factores de reducción de resistencia altos permitiría que las estructuras sobre aisladores ingresen al rango inelástico sin que se comprometa su desempeño sísmico. El estudio analiza como esta variación de valores influiría en los desplazamientos y ductilidad, utilizando para este fin un pórtico real de acero aislado como modelo de análisis. Esto permitirá evaluar en este caso, si las normativas internacionales son demasiado conservadoras y si existe potencial de utilizar estructuras menos robustas.

Estudios previos han determinado que considerar el comportamiento elástico de estructuras aisladas lleva a que la no linealidad sea absorbida por el sistema de aislamiento (Kikuchi et al., 2008).

El presente estudio pretende demostrar si las estructuras de base aisladas de periodo corto no incursionan en el rango no lineal para distintos registros símicos

1.4 Justificación

La historia de los terremotos son una realidad que se repite en muchas regiones a nivel mundial, las estructuras que no fueron diseñadas o preparadas para resistir los efectos sísmicos pueden llegar a sufrir daños devastadores, con pérdidas económicas y de vidas humanas. Con este antecedente, los sistemas de aislación y disipación sísmica han demostrado ser una solución efectiva de protección de estructuras y sus ocupantes (Naeim & Kelly, 1999; Chopra, 2020). Sin embargo, aún se debe seguir investigando como las estructuras aisladas responden a la no linealidad cuando su resistencia es reducida, en termino de desplazamientos y ductilidad (Priestley et al., 2007). Seguir la secuencia de la investigación para responder estas preguntas permitirá que las estructuras diseñadas sean más seguras y resilientes ante los sismos.

Esta investigación ayudara a llenar los vacíos en los estudios realizados. Aunque el análisis y ensayos de estructuras aisladas se han venido realizado con grandes avances, se ha prestado poca atención cuando se combina la aislación y la no linealidad (Cardone & Palermo, 2018). A partir de los resultados de este estudio se podrá discutir la actualización de las normativas vigentes.

Este proyecto se conecta con la meta número 11 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que busca crear ciudades y comunidades más resilientes. El enfoque se centra en la reducción del impacto de desastres naturales, como son los terremotos, mediante soluciones prácticas que disminuyan las pérdidas humanas y económicas. En este contexto, el uso de estrategias como la aislación sísmica y un diseño estructural avanzado juega un papel fundamental para alcanzar estos objetivos.

Además, al mejorar los diseños para que sean más seguros y eficientes, este proyecto también apoya el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9, que promueve la construcción de infraestructuras más resilientes y sostenibles, esenciales para el desarrollo industrial y la innovación.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño sísmico de un pórtico de acero con aisladores sísmicos en su base mediante un análisis no lineal tiempo-historia en OpenSeesPy, verificando el comportamiento al modificar los factores de reducción de resistencia.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Realizar análisis no lineales tiempo-historia para estudiar la respuesta de un pórtico de acero con aisladores bajo diferentes registros sísmicos.
- Analizar el impacto de los aisladores sísmicos en los factores de reducción de resistencia del sistema estructural para optimizar su comportamiento durante eventos sísmicos.
- Comparar los resultados con el comportamiento de un pórtico sin aisladores para identificar los beneficios de la aislación sísmica.

CAPÍTULO 2

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco conceptual

El análisis del desempeño de estructuras aisladas y no aisladas.

2.1.1 Desempeño sísmico de estructuras aisladas

El desempeño de una estructura ante un sismo se refiere a la capacidad de sus elementos y de forma global para resistir y absorber energía, manteniendo una funcionalidad definida de acuerdo con su uso y además que no colapse. Este concepto se ha venido desarrollando ampliamente en diferente literatura, como los estudios de Chopra (2001) y Bozorgnia & Bertero (2004), quienes hablan de la importancia de evaluar, esfuerzos, deformaciones y desplazamiento en diferentes elementos de una estructura. En las estructuras aisladas, su análisis es más complejo debido a la inclusión de estos equipos que modifican la respuesta dinámica de la estructura principal.

2.1.2 Aisladores sísmicos en estructuras

El usar aislador sísmico en la base es una herramienta común para reducir las fuerzas que actuaran en la estructura, Kelly (1997) y Naeim & Kelly (1999) propusieron que al momento de usarlos se permitirá que la superestructura reduzca su aceleración y desplazamientos. Según estudios recientes, como el de Mosqueda et al. (2004), los aisladores de fricción o elastoméricos permiten disipar energía y controlan los desplazamientos, lo que minimiza el daño estructural en eventos sísmicos severos.

FIGURA 2 aislador sísmico de caucho (Electrocenter Colombia)

2.1.3 Tipos de aisladores sísmicos

Hay una gran variedad de tipos de aisladores símicos, cada uno con características diferentes que van de acuerdo con la aplicación final según el tipo de proyecto, entre los más comunes tenemos:

- **Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)**: Estos aisladores, fabricados con capas que alterna caucho y acero, son eficaces para minimizar el movimiento provocado por los sismos. Como señala Kelly (1997), su capacidad para disipar energía y controlar los desplazamientos laterales los ha convertido en una solución ampliamente utilizada, especialmente en edificios de gran altura.
- **Aisladores de fricción (Friction Pendulum Systems, FPS)**: Estos dispositivos funcionan a partir del principio de fricción para disipar energía. Según lo explicado por Zayas et al. (1990), tienen la capacidad de regularse de forma automática dependiendo de la intensidad del sismo, lo que les va a permitir controlar los movimientos de manera efectiva. Esto los hace que sean adecuados para proteger estructuras como edificios, puentes, y entre otras estructuras.
- **Aisladores de plomo y caucho (Lead Rubber Bearings, LRB)**: "Estos aisladores combinan capas de caucho con un núcleo de plomo diseñado para

disipar energía de manera eficiente. Según Robinson y Tucker (1977), los LRB destacan por su alta capacidad de amortiguamiento, lo que los convierte en una opción ideal para proteger edificios estratégicos como hospitales y estaciones de emergencia.

Cada uno de estos dispositivos tienen limitaciones y ventajas, que la selección final dependerá del comportamiento, características, y demandas símicas a las que será sometido el proyecto Las investigaciones de Jangid (2007) sugiere que una correcta elección del tipo de aislador puede mejorar significativamente el comportamiento de una estructura bajo eventos sísmicos.

.

FIGURA 3 aislador sísmico (Cámara Chilena de la Construcción CChC, 2022)

2.1.3.1 Tipos de análisis en estructuras:

- Análisis estático: se evalúa el comportamiento de la estructura bajo cargas estáticas, como las gravitacionales. Este análisis sirve para entender cómo responde la estructura en estas condiciones siguiendo los lineamientos de la NEC 15.

- Análisis dinámico: se lleva a cabo un análisis dinámico para estudiar cómo la estructura reacciona ante cargas en movimiento, como las generadas por sismos.

- Análisis no lineal en historia de tiempo estático: El análisis no lineal en historia de tiempo estático, conocido como Pushover es un método utilizado para evaluar el comportamiento no lineal de una estructura bajo cargas estáticas crecientes.

- Análisis no lineal en historia de tiempo dinámico: se realiza un análisis detallado que incluye las no linealidades de los materiales y de la estructura. Este análisis permite que se simule su comportamiento real a lo largo del tiempo bajo eventos sísmicos, proporcionando una visión más completa y precisa de su desempeño.

2.1.4 Modelación no lineal

Trabajar en la modelación no lineal en estructuras que sean sismos resistentes, es importante para representar adecuadamente este comportamiento bajo grandes cargad o variaciones en los parámetros de ductilidad, Según estudios de Clough & Penzien (1993), los análisis lineales tradicionales subestiman el daño acumulado y la capacidad de deformación de los elementos. A diferencia de la modelación no lineal que una representación más realista del desempeño de los materiales ya que incluye parámetros de degradación, fatiga, cambios de rigidez, etc. El uso de OpenSeesPy se consolida como una herramienta robusta para simular estos efectos, como detallan Mazzoni et al. (2006) y McKenna (2011).

2.1.5 Reducción de resistencia en el diseño estructural

El término de la reducción de resistencia se refiere a la inducción intencional de factores que disminuyen la capacidad de una estructura, esto es con el objetivo de tener las incertidumbres de los materiales y cargas que actúen, estudios como el de Lignos & Krawinkler (2011) hablan de que la reducción controlada de resistencia puede ser útil para diseñar elementos más flexibles, que se deformen de manera dúctil sin comprometer la estabilidad global.

Si se realiza modificaciones de factores de reducción en el diseño estructural, es posible evaluar los diferentes niveles de desempeño llevando la estructura a condiciones extremas. El trabajo de Vamvatsikos & Cornell (2002) sobre análisis dinámico incremental (IDA) muestra que la manipulación de estos factores permite identificar los umbrales de colapso y la capacidad residual de los sistemas estructurales

En nuestro país la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015) define diferentes valores de reducción de resistencia, R, que va a depender del sistema estructural y va hasta el valor de 8.

Estos valores de R se usan esperando que la estructura ingrese en el rango inelástico por lo cual los desplazamientos deben estar revisados para que no lleguen a la falla, los valores de reducción se pueden asociar con la razón de ductilidad, a pesar de que dependen de otros factores como la sobre resistencia.

La razón de ductilidad se define como la división entre el desplazamiento máximo que vaya a tener la estructura ante un sismo para el desplazamiento cuando ingrese en fluencia, ver ecuación 1.1.

$$\mu = \frac{\mu\, max}{\mu\, flu} \qquad (1.1)$$

$\mu =$ razon de ductilidad de la estructura.

$\mu \max =$ Desplazamiento maximo de estructura ante sismo.

μ flu = Desplazamiento maximo en fluencia ante sismo.

2.1.6 Sistema de aislación

Los aisladores se pueden modelar con un sistema bilineal de acuerdo con los parámetros indicados **FIGURA 4**

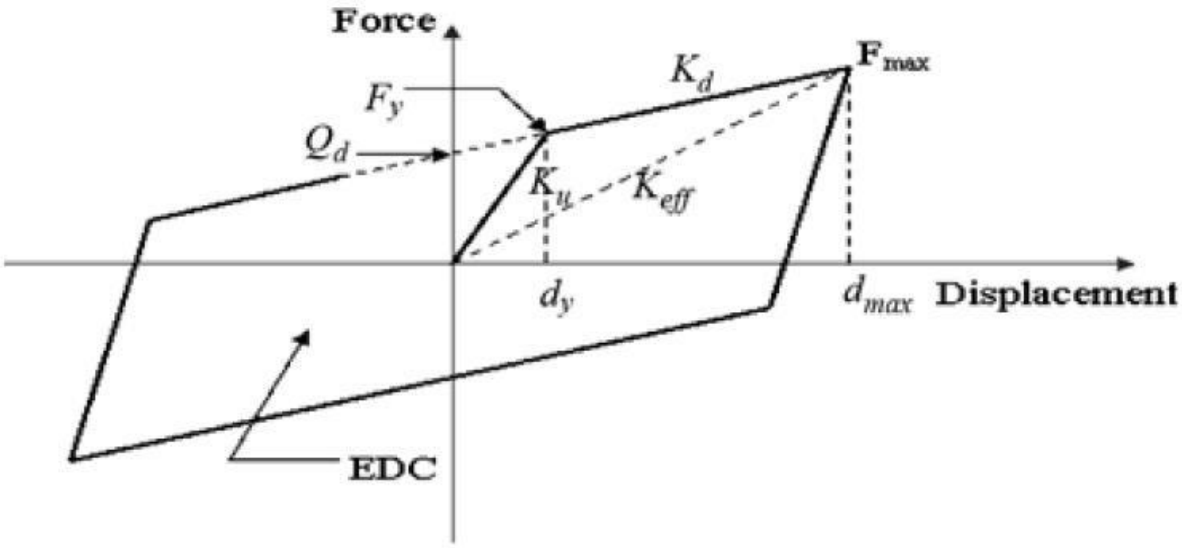


FIGURA 4. Modelo bilineal de sistema de aislación sísmica. Saleem (2013).

A continuación, se describen las variables clave del modelo bilineal utilizadas para representar el comportamiento del sistema de aislación sísmica:

- **Fy (Fuerza de fluencia):** Es la fuerza que permite que el sistema de aislación pase de la fase elástica a la post-elástica.
- **Ku (Rigidez inicial elástica):** Corresponde a la rigidez del sistema en la etapa previa a la fluencia, donde la respuesta es lineal.
- **Kd (Rigidez post-elástica):** Es la rigidez del sistema una vez que entra en la etapa post-elástica, generalmente inferior a la rigidez inicial.

- **Keff (Rigidez efectiva):** Se define como la relación entre la fuerza y el desplazamiento totales, siendo un parámetro útil para evaluar el desempeño global del sistema.
- **dy (Desplazamiento de fluencia):** Es el desplazamiento que marca el inicio de la etapa post-elástica del sistema.
- **dmax (Desplazamiento máximo):** Representa el valor máximo de desplazamiento que alcanza el sistema bajo las condiciones de carga aplicadas.
- **Qd (Resistencia característica):** Es la fuerza que activa el sistema de aislación, también conocida como la fuerza de activación del aislador.

2.2 Marco metodológico

Este estudio se basa en el análisis del desempeño sísmico de un pórtico de acero equipado con aisladores sísmicos en su base. La metodología empleada comprende la modelación numérica no lineal de la estructura, utilizando el software OpenSeesPy, para simular su respuesta bajo diversas condiciones sísmicas. El análisis se llevó a cabo mediante un enfoque tiempo-historia, evaluando los desplazamientos, demandas de ductilidad y fuerzas internas en función de variaciones en el factor de reducción de resistencia.

2.2.1 Diagrama de proceso

El procedimiento propuesto se enfoca en el análisis estructural comparativo entre pórticos con y sin aislamiento sísmico, mediante diferentes enfoques de análisis. Este esquema tipo cascada incluye las siguientes etapas:

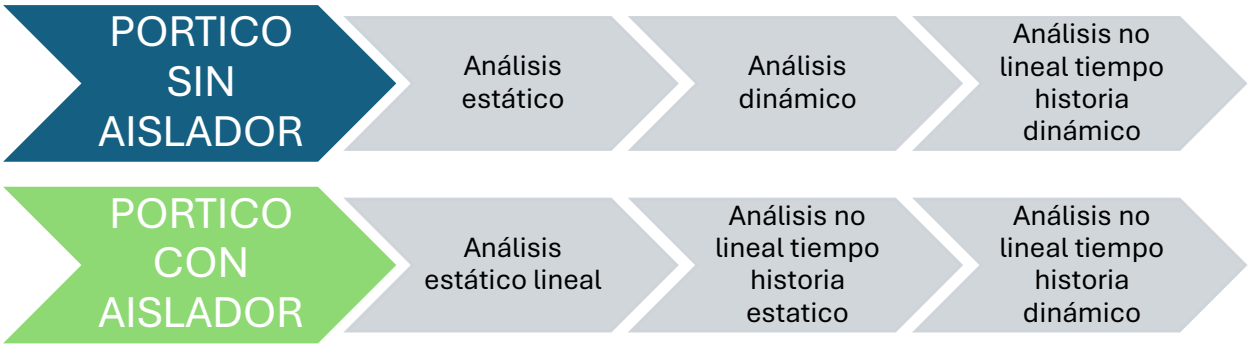


FIGURA 5 diagrama de proceso siguiendo metodología cascada

2.2.2 Modelo no lineal del pórtico 2D

2.2.3 Introducción a la modelación no lineal

El análisis lineal de una estructura permite hacer capturas de su comportamiento más real, en este caso se consideran o linealidades de materiales y de los elementos que componen las vigas y columnas. A diferencia del análisis líneas, que se asume que los desplazamiento y esfuerzos mantienen una relación lineal, la rigidez de una estructura analizada con no linealidad experimentara cambios a medida que se ira desformando, esto es fundamental ya que el tener deformaciones grandes en este régimen se asocia con daños estructurales y no estructurales ante los eventos sísmicos que se evalúan.

2.2.4 Procedimiento de la modelación

El modelo de la estructura de base fija y aislada se desarrolla empleando Openseespy, una herramienta de código abierto que nos permite simular estructuras ante los registros símicos.

2.2.5 Definición de la geometría del pórtico:

El pórtico modelado tiene tres columnas y dos niveles, con aisladores sísmicos elastomericos en la base, las longitudes son de acuerdo con la proyección arquitectónica ya establecida.

2.2.6 Propiedades del material:

Se utilizó un modelo de acero a572 gr.50 inelástico con endurecimiento cinemático y degradación de resistencia para poder representar adecuadamente la respuesta en la no linealidad. Se optó por el material Steel01 de OpenSeesPy para el acero.

2.2.7 Definición de los aisladores sísmicos:

Se utilizaron aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (Lead Rubber Bearings, LRB), que se modelaron como elementos no lineales capaces de disipar energía durante un sismo. Para definir su comportamiento, se empleó el elemento ElasticPerfectlyPlasticGap en OpenSeesPy, el cual permite representar tanto la rigidez inicial de los aisladores como su respuesta después de alcanzar el punto de deslizamiento.

2.2.8 Cargas aplicadas:

Las cargas gravitacionales vivas y muestras se aplican inicialmente, estos datos alimentan el peso sísmico de la estructura para realizar el análisis estático y dinámico lineal y no lineal, los datos van de acuerdo con las cargas vivas establecidas en la NEC 15.

2.2.9 Análisis no lineal estático:

Antes de realizar el análisis dinámico, se realizó un análisis estático no lineal (pushover) para verificar el desempeño de la estructura y el comportamiento progresivo bajo un patrón de cargas laterales. Este análisis permite saber la rigidez inicial de la estructura y su capacidad de disipación de energía en el rango plástico.

2.2.10 Análisis dinámico tiempo-historia:

El análisis tiempo historia no lineal para estudiar el pórtico incluye la integración numérica de las ecuaciones de movimiento, utilizando el método de Newmark con el factor de amortiguamiento siguiendo el modelo de Rayleigh.

2.2.11 Ajuste del factor de reducción de resistencia (R):

En la modelación se varían los factores de resistencia para verificar la respuesta de la estructura, la simulación se realiza con valores de 1,4,6,8,10,20 y 30, comparando los resultados de desplazamiento en fluencia y máximos, las variables de R se llamarán de la siguiente forma:

$\mathrm{Rbf} = \text{Factor de reduccion para estructura base empotrada sin aislacion.}$
$\mathrm{Rba} = \text{Factor de reduccion para estructura base empotrada con aislacion .}$

Al variar los valores de Rbf y Rba obtendremos razones expresados de la siguiente manera:
$\mu.\,\mathrm{bf} = \text{Razon de ductilidad de la estructura con base fija.}$
$\mu.\,\mathrm{ba} = \text{Razon de ductilidad de la estructura con base aislada.}$

2.2.12 Parámetros del modelo

Se obtuvieron los parámetros y elementos de un proyecto real destinado para uso de clínica, el sistema estructural se conforma por pórticos especiales a momento (SMF)

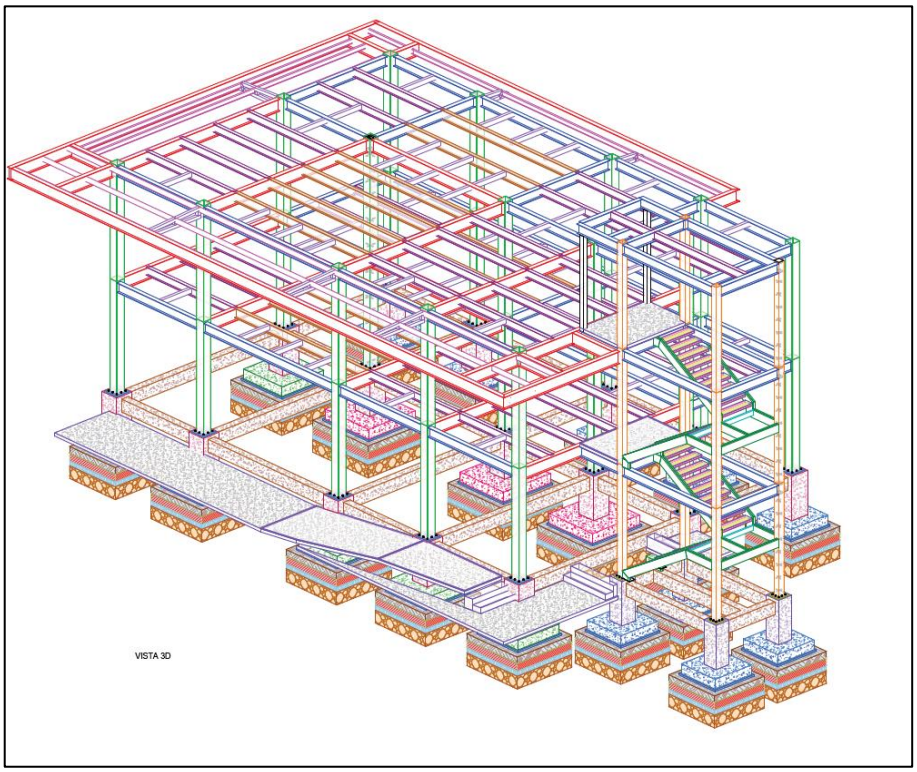


FIGURA 6 Modelo 3d de proyecto final (Flores J.,2024)

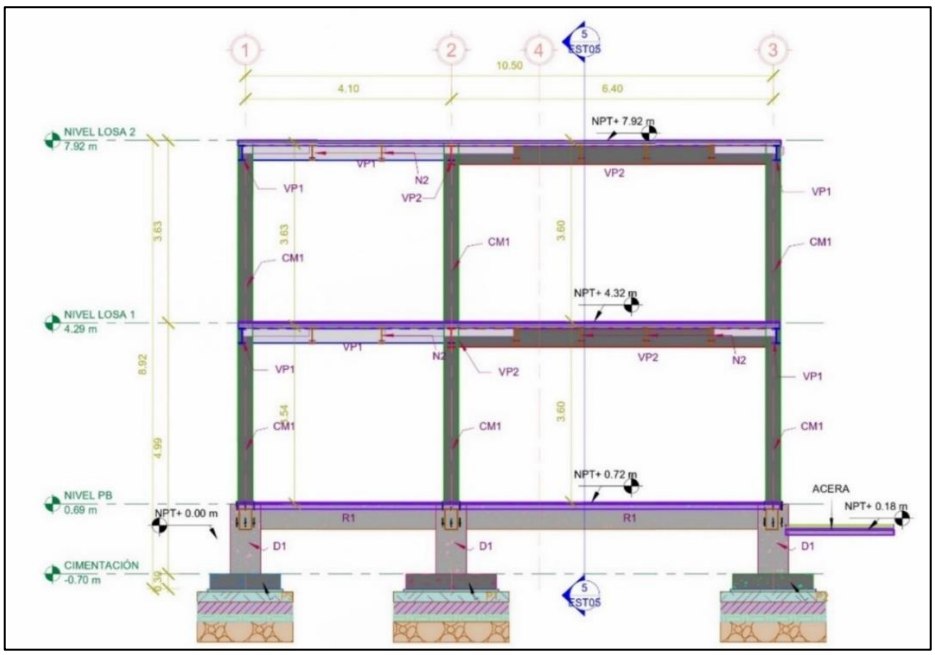


FIGURA 7 Pórtico de diseño estructural propio (Flores J.,2024)

El pórtico seleccionado del proyecto es en la dirección más corta tal como se indica en la **FIGURA 7**

2.2.12.1 Propiedades de la estructura

Características:

- Número de pisos sobre el suelo: 2
- Número de pisos bajo el suelo: 0
- Área típica de pisos:
    - 1er Piso alto:508 m2
    - Nivel de cubierta:610 m2

- Tipo de edificio: Uso de Centro de salud NEC-15-4.1 tabla 6
- Geometría de los elementos estructurales: Mostrados en los planos
- Factor de Importancia: 1.5
- Tipo de suelo: D

2.2.12.2 Propiedades de materiales

Los materiales para las secciones de columnas y vigas utilizados en el modelo fueron acero A572 Gr50 con un fy=4500 kg/cm2

2.2.12.3 Secciones utilizadas

2.2.12.3.1 Secciones de Vigas

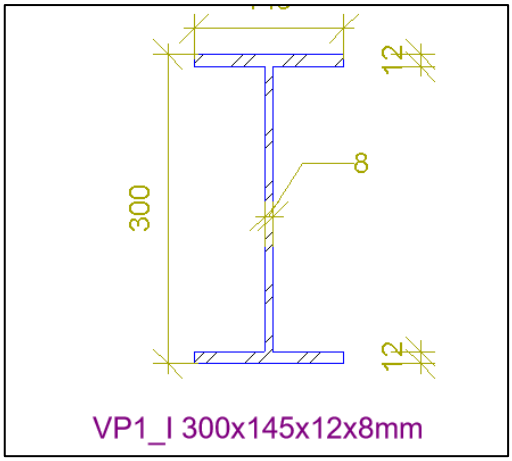


FIGURA 8. Sección de viga VP1 (Flores J.,2024)

A : Área de la sección transversal

Ix: Momento de inercia respecto al eje X

Iy: Momento de inercia respecto al eje Y

Sx: Módulo de sección respecto al eje X

Sy: Módulo de sección respecto al eje Y

Zx: Módulo plástico respecto al eje X

Zy: Módulo plástico respecto al eje Y

rx: Radio de giro respecto al eje X

ry: Radio de giro respecto al eje Y

Tabla 1.Propiedades geométricas viga VP1

A	56.88	cm2
Ix	8621.9	cm4
Iy	610.9	cm4
Sx	574.8	cm3
Sy	84.3	cm3
Zx	653.5	cm3
Zy	130.6	cm3
rx	12.3	cm
ry	3.3	cm

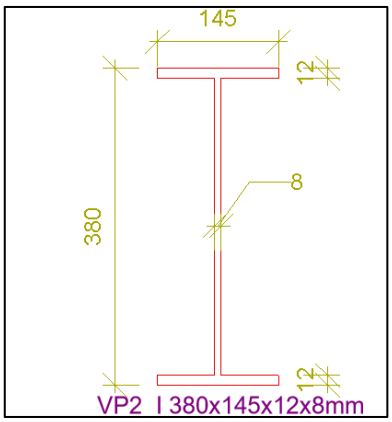


FIGURA 9.Sección viga VP2 (Flores J.,2024)

Tabla 2.Propiedades geométricas viga VP2

A	63.28	cm2
Ix	14793.9	cm4
Iy	611.2	cm4
Sx	778.6	cm3
Sy	84.3	cm3
Zx	893.8	cm3
Zy	131.8	cm3
rx	15.3	cm
ry	3.1	cm

2.2.12.3.2 Secciones de columna

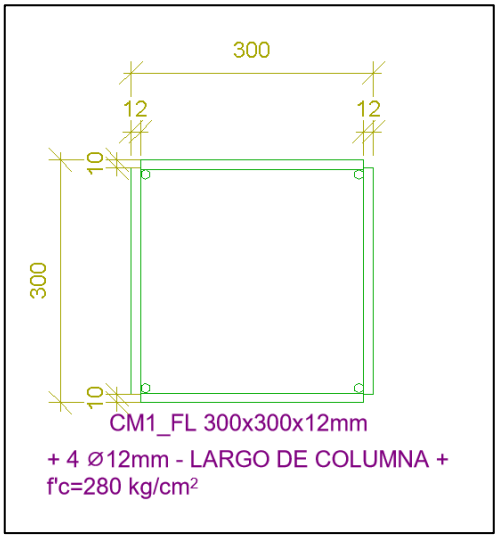


FIGURA 10.Sección de columna (Flores J.,2024)

Tabla 3.Propiedades geométrica de columna

A	176.64	cm2
Ix	21866.3	cm4
Iy	21866.3	cm4
Sx	1457.8	cm3
Sy	1457.8	cm3
Zx	1493.9	cm4
Zy	1493.9	cm4
rx	11.1	cm
ry	11.1	cm

2.2.12.4 Cargas de servicio

2.2.12.4.1 Carga muerta

Se consideró como cargas muertas las que actúan permanentemente, tales como el peso propio de la estructura, revoques, instalaciones diversas

Cargas consideradas:

- Enchape, Inst. Eléctricas, Sanitarias,SCI: 20 kg/m²
- Tumbado: 10 kg/m²
- Mampostería: 150 kg/m2
- Ceramica,porcelanato etc.: 30 kg/m2

2.2.12.4.2 Carga viva

De acuerdo con lo estipulado en el NEC-15, NEC-SE-CG-Cargas No Sísmicas, se tiene la siguiente carga a considerar:

- Carga de oficina: 240 kg/m²

De acuerdo con la participación de masa que incluye carga muerta más un 50 % de carga viva la masa sísmica que se utiliza por cada nivel es:

$$masa\ sismica\ por\ nivel = 48.18\ \frac{kg - s^2}{cm}$$

2.2.13 Definición del modelo sin aisladores con base fija en openseespy

El pórtico se modelo en base al plano indicado en figura 5 y consta de tres columnas y dos vigas por nivel de acero estructural, esta es una estructura simple que permite evaluar su comportamiento, recordando que partimos de información de un proyecto real que se simula en 2D.

Nodos y elementos: Se asignaron coordenadas a cada nodo y se establecieron las conexiones entre columnas y vigas utilizando elementos del tipo elasticBeamColumn, los cuales permiten representar el comportamiento elástico inicial de las secciones de acero.

Propiedades del material: El acero fue modelado con un módulo de elasticidad de 2.1e6 kg/cm² y un área y momento de inercia de acuerdo con las características de cada perfile.

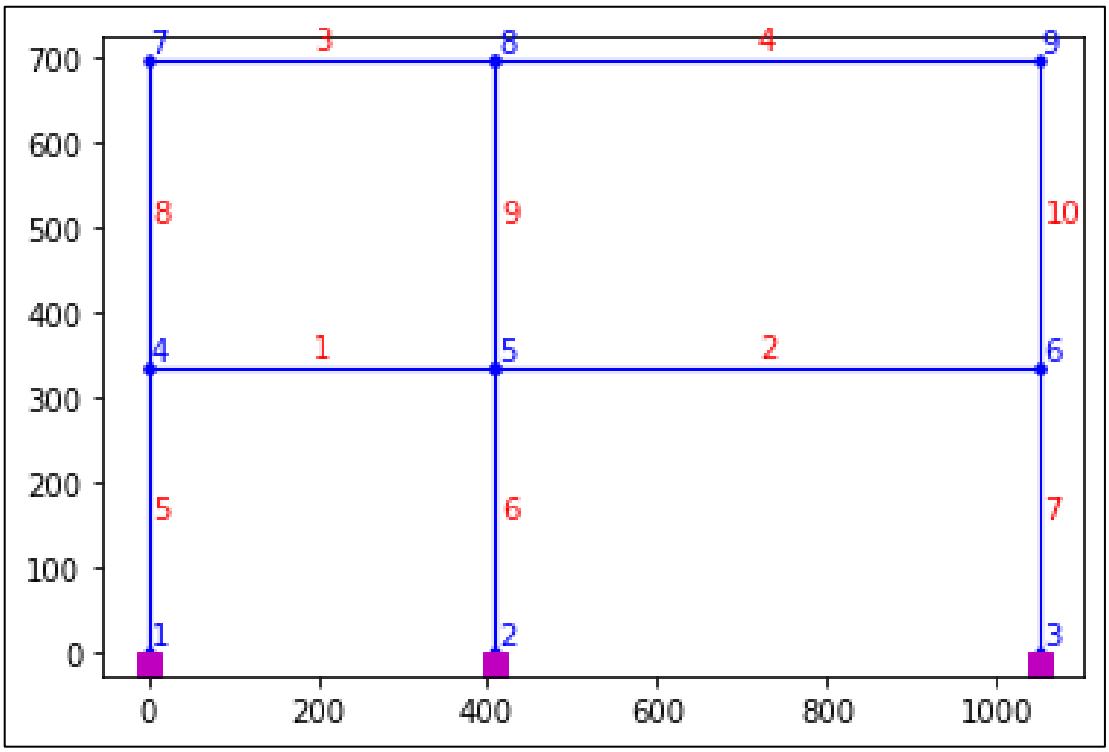


FIGURA 11.Modelo de pórtico en openseespy (Flores J.,2024)

2.2.13.1 Aplicación de cargas

Para analizar el comportamiento del pórtico bajo diferentes combinaciones de carga, se consideraron las cargas gravitacionales (muertas y vivas) como las cargas sísmicas, las cuales se aplicaron de la siguiente manera:

Cargas gravitacionales: Se asignaron como cargas uniformemente distribuidas a las vigas, calculando la carga total correspondiente para cada elemento estructural.

Cargas sísmicas: Se distribuyeron fuerzas sísmicas equivalentes en los nodos maestros de cada nivel, tomando en cuenta un coeficiente sísmico basado en los parámetros de la NEC 15. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis dinámico aplicando un espectro de respuesta y utilizando acelerogramas del sismo de pedernales del 2016 para el análisis tiempo-historia.

2.2.13.2 Modos de vibración en openseepy

Se analizaron los modos de vibración de la estructura para identificar sus frecuencias naturales y las formas modales de deformación especialmente del primer modo:

Frecuencias naturales: Se determinaron a partir de un análisis modal, utilizando los valores propios del sistema para identificar los modos dominantes.

Factores de participación modal: Se evaluó la contribución de cada modo a la respuesta global de la estructura, permitiendo identificar cuáles son los más relevantes.

Modos de vibración: Se visualizaron las deformaciones correspondientes a los modos principales, lo que facilitó la comprensión de cómo la estructura responde ante excitaciones dinámicas.

2.2.13.2.1 Número de modos a calcular

```
num_modos = 2  # Se seleccionan los dos primeros modos de vibración
```

2.2.13.2.2 Cálculo de valores propios para obtener frecuencias naturales

```
OmegaSq = ops.eigen('-fullGenLapack', num_modos)  # Devuelve los valores propios (frecuencia angular al cuadrado)
```

```
Omega = np.sqrt(OmegaSq)  # Se obtienen las frecuencias angulares a partir de los valores propios
Periodo = 2 * np.pi / Omega  # Cálculo de los periodos de vibración (T = 2π / ω)
```

2.2.13.2.3 Mostrar los periodos de los modos de vibración

```
for i in range(num_modos):
    print(f'Modo {i+1}: Periodo = {Periodo[i]:.4f}s')  # Se imprime el periodo de cada modo
```

2.2.13.2.4 Visualización del primer modo de vibración

```
plt.figure()  # Crear nueva figura para el modo 1
opsv.plot_mode_shape(1)  # Visualizar el primer modo de vibración
plt.title('Modo 1')  # Título para el gráfico del modo 1
plt.show()  # Mostrar el gráfico del modo 1
```

2.2.13.2.5 Visualización del segundo modo de vibración

```
plt.figure()  # Crear nueva figura para el modo 2
opsv.plot_mode_shape(2)  # Visualizar el segundo modo de vibración
plt.title('Modo 2')  # Título para el gráfico del modo 2
plt.show()  # Mostrar el gráfico del modo 2
```

2.2.13.3 Análisis estático en openseespy

El análisis estático se realiza para evaluar el comportamiento de la estructura bajo las cargas gravitacionales y sísmicas. Este análisis permitió obtener los desplazamientos nodales, calcular distorsiones de entre-piso y determinar la rigidez de la estructura.

2.2.13.3.1 Configuración del análisis estático

```
ops.system('BandGeneral')  # Se selecciona el sistema de ecuaciones a resolver
ops.numberer('Plain')  # Numeración simple de los grados de libertad
ops.constraints('Plain')  # Aplicación de restricciones sin transformaciones adicionales
ops.integrator('LoadControl', 1.0)  # Controla el incremento de carga en el análisis (proporción 1.0)
ops.algorithm('Newton')  # Se utiliza el método de Newton-Raphson para resolver el sistema no lineal
ops.analysis('Static')  # Define el análisis como estático
```

2.2.13.3.2 Ejecución del análisis estático

```
ops.analyze(1)  # Realiza un paso de análisis estático
```

2.2.13.3.3 Obtener los desplazamientos en los nodos maestros

```
disp_nivel_1 = ops.nodeDisp(5)  # Desplazamiento del nodo maestro en el nivel 1
disp_nivel_2 = ops.nodeDisp(8)  # Desplazamiento del nodo maestro en el nivel 2
```

2.2.13.3.4 Cálculo de derivas inter-piso

```
drift_level_1 = disp_nivel_1[0] / y1  # Deriva del nivel 1 (desplazamiento en X entre altura del nivel)
drift_level_2 = (disp_nivel_2[0] - disp_nivel_1[0]) / y2  # Deriva del nivel 2 (diferencia de desplazamientos entre alturas)
```

2.2.13.4 Análisis dinámico en openseespy

El análisis dinámico evalúa el comportamiento de la estructura bajo excitaciones sísmicas utilizando espectros de respuesta. Para este análisis se usó los parámetros de la NEC 15 de acuerdo con el tipo de estructura y características del suelo. Este análisis

permite calcular los desplazamientos modales máximos, combinarlos mediante SRSS y determinar las derivas inter-piso .

2.2.13.4.1 Espectro de respuesta (tiempo en segundos y aceleraciones en g)

```
tiempos = np.array([0.000, 0.139, 0.763, 1.000, 1.250, 1.500, 1.750, 2.000, 2.250, 2.500, 2.750, 3.000])
aceleraciones = np.array([0.140, 0.252, 0.252, 0.192, 0.154, 0.128, 0.110, 0.096, 0.085, 0.077, 0.070, 0.064])
```

2.2.13.4.2 Graficar el espectro de respuesta para visualización

```
plt.figure()
plt.plot(tiempos, aceleraciones)
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Aceleración (g)')
plt.title('Espectro de respuesta')
plt.grid(True)
plt.show()
```

2.2.13.4.3 Interpolación del espectro de respuesta

```
from scipy.interpolate import interp1d
g = 980.665  # Conversión de g a cm/s²
aceleraciones_cm = aceleraciones * g  # Aceleraciones en cm/s²

func_espectro = interp1d(tiempos, aceleraciones_cm, kind='linear', fill_value="extrapolate")  # Función interpolada
Sa = func_espectro(Periodo)  # Obtener aceleraciones espectrales para los periodos calculado
```

2.2.13.4.4 Mostrar las aceleraciones espectrales calculadas para cada modo

```
for i in range(len(Sa)):
    print(f"Modo {i+1}: Periodo = {Periodo[i]:.4f} s, Sa = {Sa[i]:.2f} cm/s²")
```

2.2.13.4.5 Cálculo de desplazamientos modales

```
U_modal = np.zeros((len(Sa), 2))  # Matriz para desplazamientos modales (modos x niveles)
for i in range(len(Sa)):
    Gamma_i = 1.0  # Factor de participación modal (ajustable según diseño)
    omega_i = Omega[i]  # Frecuencia angular
    escala_modal = Gamma_i * Sa[i] / omega_i**2  # Factor de escala modal
```

2.2.13.4.6 Desplazamientos modales en nodos maestros

```
    U_modal[i, 0] = escala_modal  # Nivel 1
    U_modal[i, 1] = escala_modal * (y1 + y2) / y2  # Nivel 2, proporcional a la altura
```

2.2.13.4.7 Combinación modal (SRSS)

```
U_total = np.sqrt(np.sum(U_modal**2, axis=0))  # Desplazamiento total por SRSS
```

2.2.13.4.8 Derivas inter-piso dinámicas

```
drift_dynamic_1 = U_total[0] / y1  # Deriva nivel 1
drift_dynamic_2 = (U_total[1] - U_total[0]) / y2  # Deriva nivel 2
```

2.2.14 Análisis dinámico tiempo-historia

Se realizó un análisis tiempo-historia mediante la integración numérica de las ecuaciones de movimiento, empleando el método de Newmark en OpenSeesPy. Para este análisis,

se utilizaron acelerogramas de sismos registrados en el país, los cuales fueron escalados de acuerdo con los parámetros establecidos en el diseño. Esto permitió estudiar el comportamiento no lineal de la estructura frente a diferentes niveles de intensidad sísmica.

2.2.15 Registros sísmicos utilizados

Los registros utilizados provienen del terremoto de Pedernales ocurrido el 16 de abril de 2016, un evento importante de actividad sísmica en la región en los últimos años. Estos datos fueron seleccionados debido a su relevancia para analizar el comportamiento de estructuras bajo condiciones sísmicas reales, brindando una base sólida para evaluar el desempeño dinámico del modelo estructural.

2.2.15.1 Registro sísmico Pedernales, APED

La siguiente grafica es un registro de un acelerograma en el cual se muestran valores de aceleración corregida en su línea base en función del tiempo.

El punto de mayor amplitud se encuentra cerca de los 5.87 segundos, con un valor máximo de aproximadamente 770.18 cm/s².

.

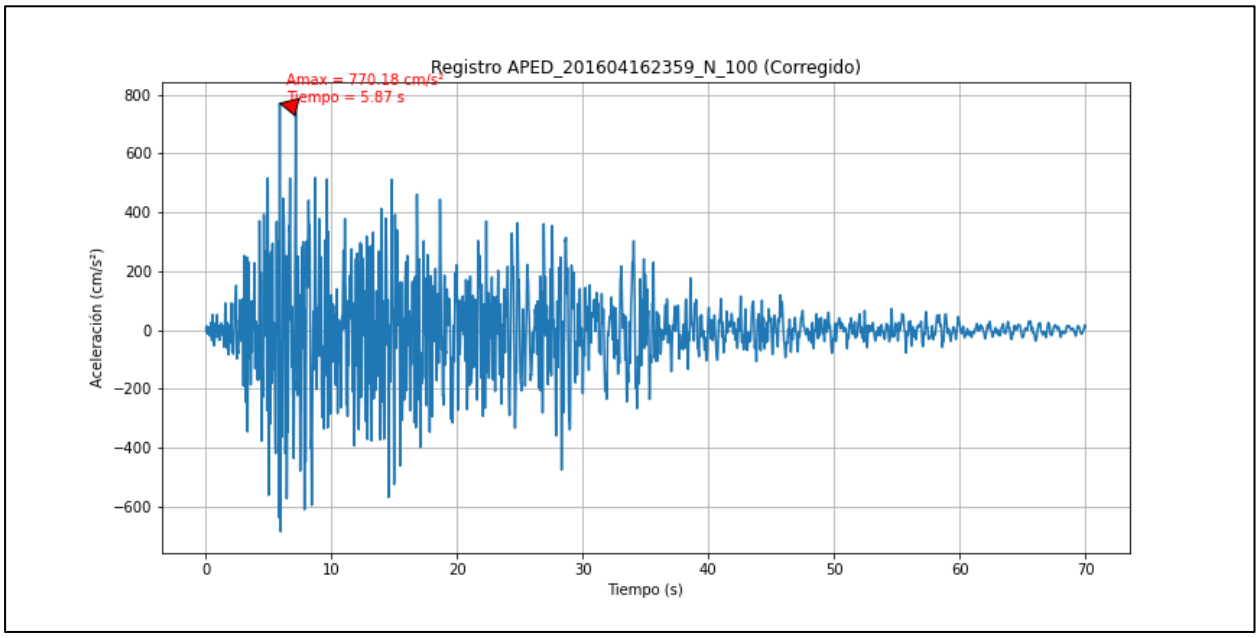


FIGURA 12.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024)

2.2.15.2 Registro sísmico Esmeraldas AES2

El punto de mayor amplitud se encuentra cerca de los 56.12 segundos, con un valor máximo de aproximadamente 90.76 cm/s².

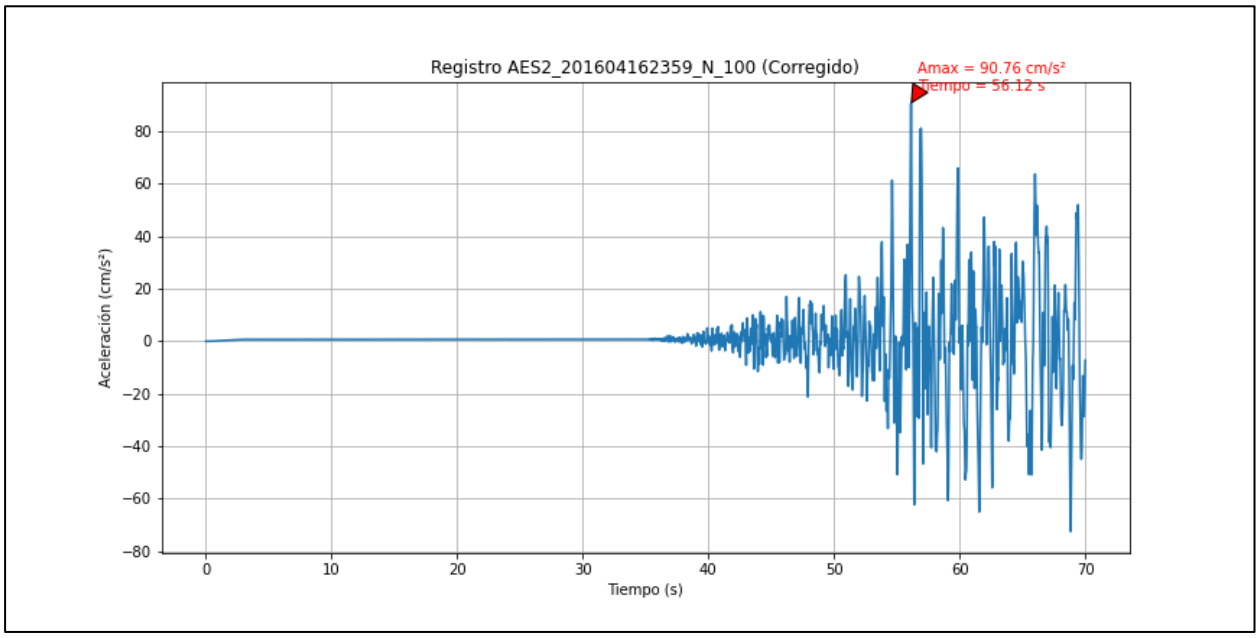


FIGURA 13.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024)

2.2.15.3 Registro sísmico Santo Domingo ASDO

El punto de mayor amplitud se encuentra cerca de los 34.01 segundos, con un valor máximo de aproximadamente 107.12 cm/s².

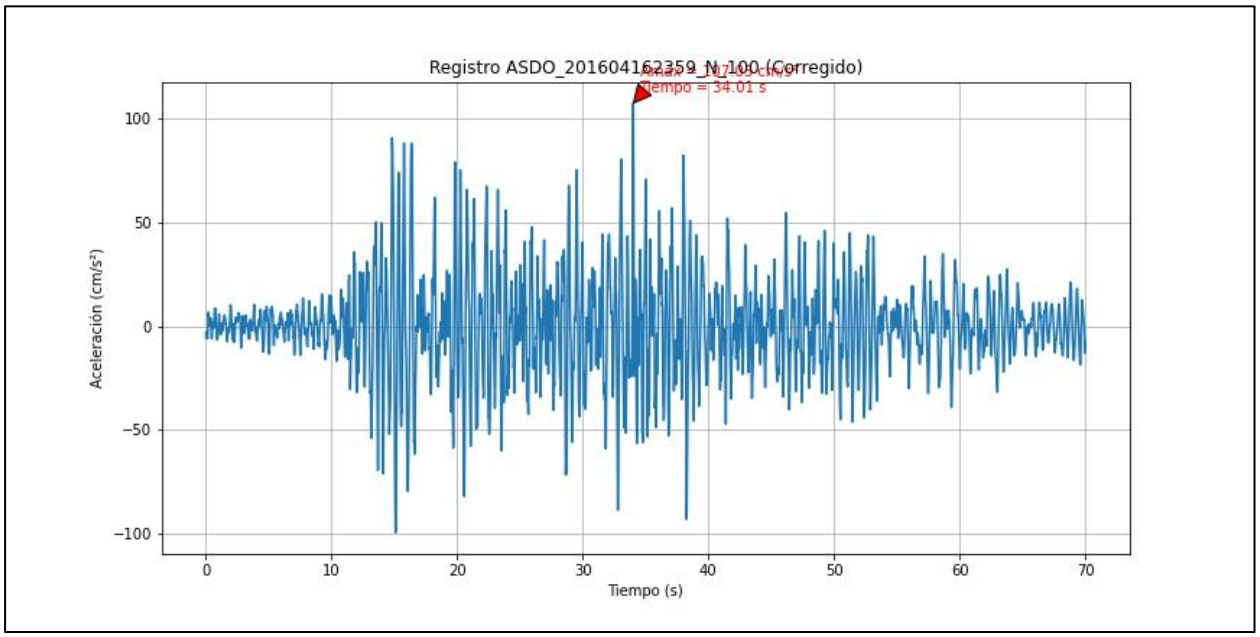


FIGURA 14.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024)

2.2.15.4 Registro sísmico Chone ACHN

El punto de mayor amplitud se encuentra cerca de los 17.5 segundos, con un valor máximo de aproximadamente 347.25 cm/s².

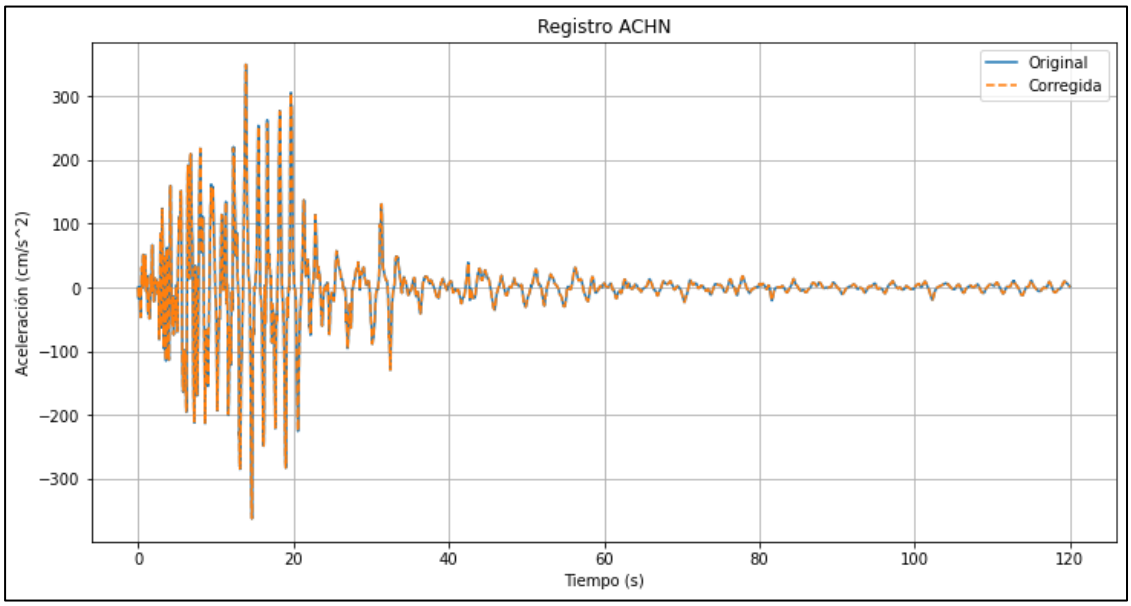


FIGURA 15.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024)

2.2.15.5 Registro sísmico Portoviejo APO1

El punto de mayor amplitud se encuentra cerca de los 10.98 segundos, con un valor máximo de aproximadamente 370.33 cm/s².

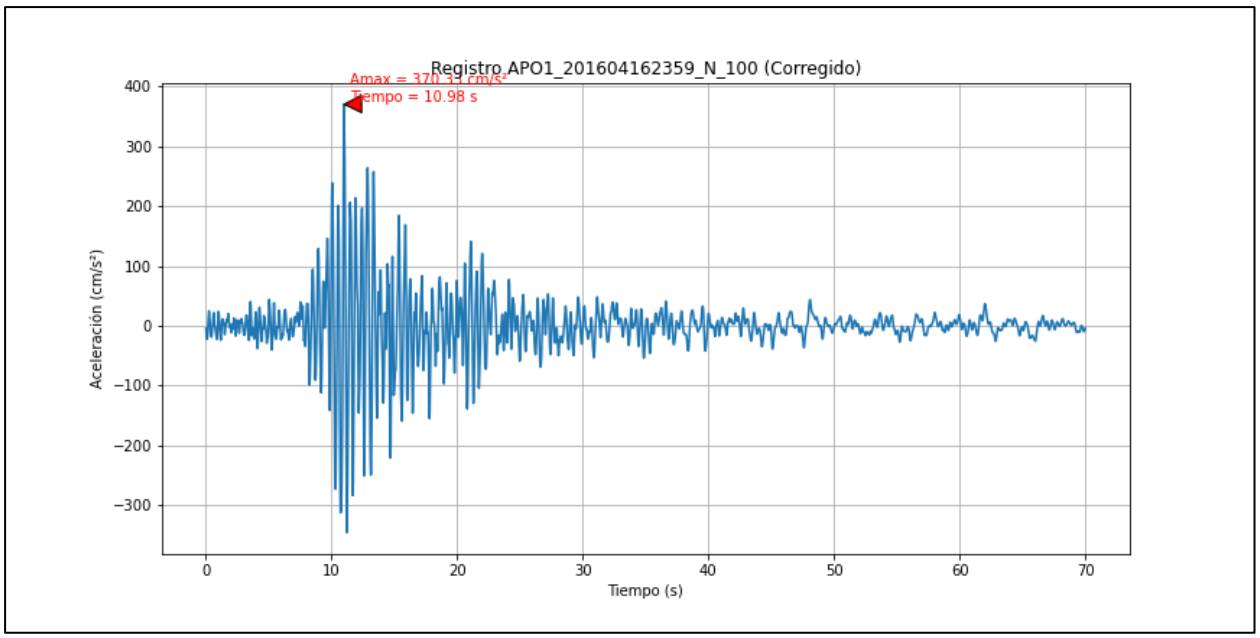


FIGURA 16.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024)

2.2.15.6 Registro sísmico Manta AMNT

El punto de mayor amplitud se encuentra cerca de los 11.47 segundos, con un valor máximo de aproximadamente 504.87 cm/s².

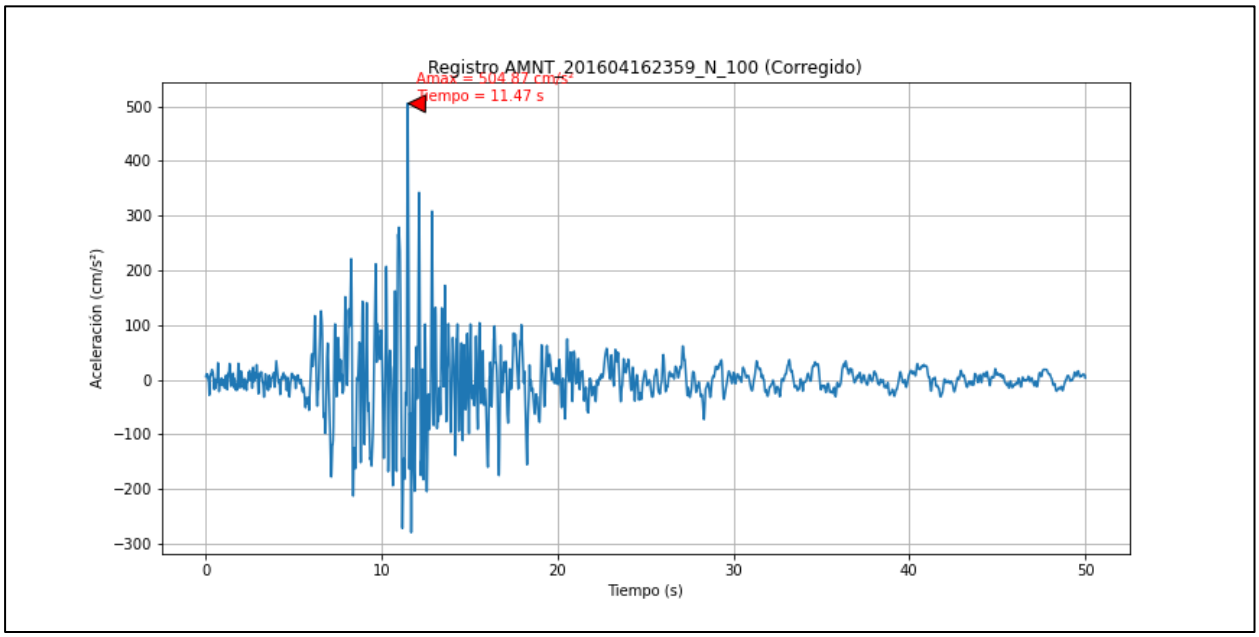


FIGURA 17.Registros sísmicos del IGM corregido (Flores J.,2024)

2.2.15.7 Match de Registros sísmicos

Se realizo un espectro compatibilidad entre el espectro elástico del sitio y el registro sísmico AP01, ACHN, APED, AMNT entre 0.02s a 1.05s

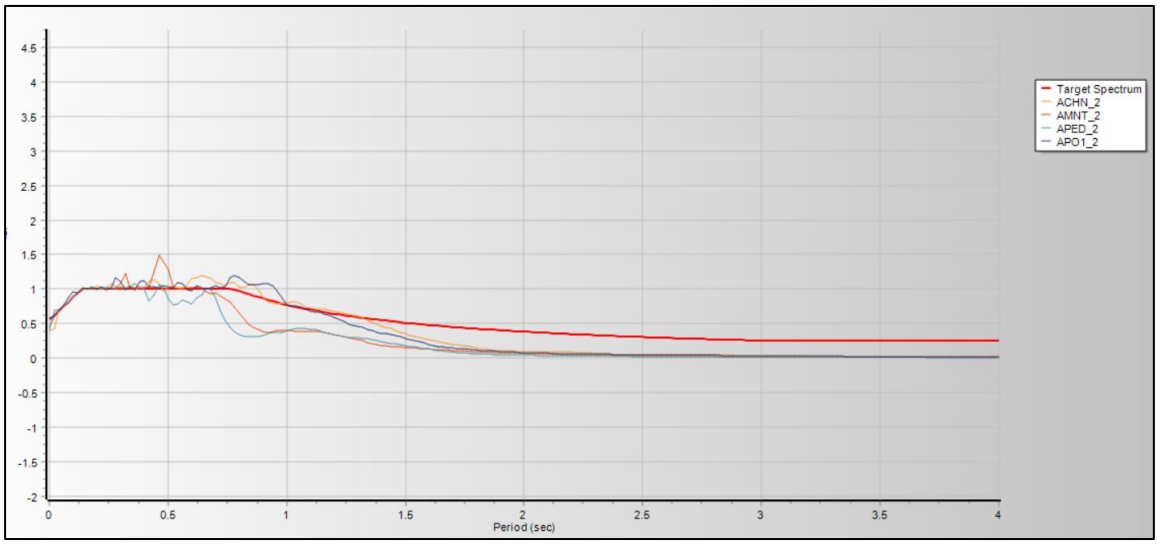


FIGURA 18.Espectro compatible obtenido (Seismomatch)

2.2.16 Parámetros de evaluación

Los parámetros clave que se evaluaron en el estudio fueron:

- Desplazamientos máximos en base fija y aislada: Se midieron los desplazamientos de cada nivel del pórtico, comparando las respuestas con y sin aisladores sísmicos.
- razón de ductilidad: Se evaluó el cambio de la razón de ductilidad al variar los factores de reducción
- Derivas entre piso: Se calcularon las derivas para determinar el grado de deformación relativa entre niveles, un indicador esencial de la demanda sísmica en estructuras de varios pisos.

2.2.17 Inclusión de los aisladores sísmicos

Para representar el efecto de la aislación sísmica, se incorporaron aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) en la base de la estructura. Estos dispositivos se modelaron como elementos no lineales capaces de disipar energía, lo que permite reducir la transferencia de movimiento del terreno hacia la superestructura, desacoplando así su respuesta frente a la acción sísmica.

- Modelo del aislador: Los aisladores fueron representados mediante el elemento ElasticPerfectlyPlasticGap en OpenSeesPy, que captura el comportamiento no lineal de rigidez inicial y el comportamiento post-deslizamiento.

- Ubicación: Los aisladores se colocaron entre los nodos de la base y los cimientos (nodos 1, 2 y 3), permitiendo que la estructura superior responda de manera desacoplada respecto al terreno durante un sismo.

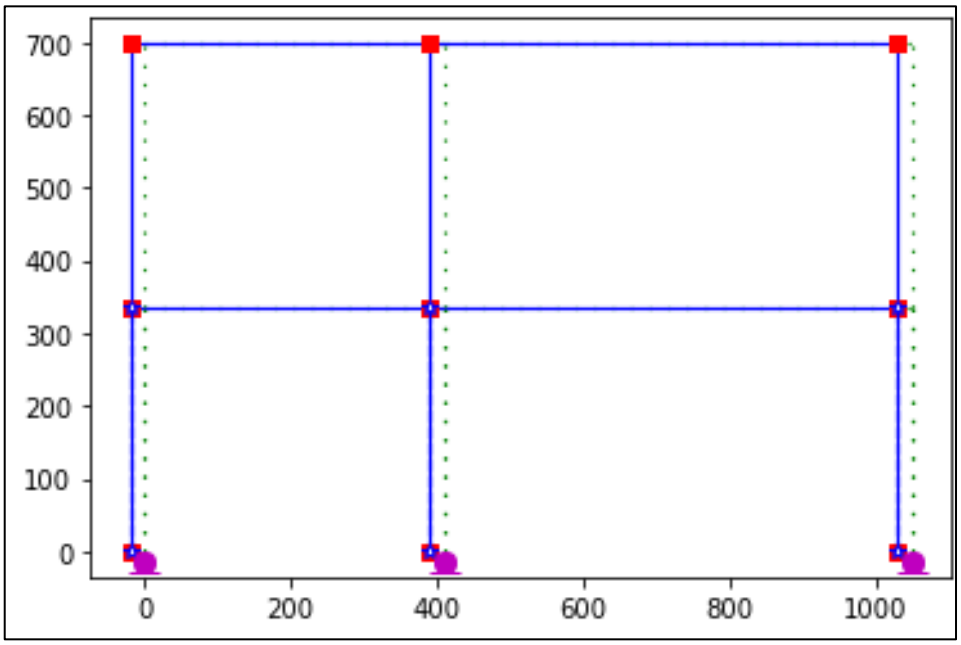


FIGURA 19.Modelo con aisladores en openseepy (Flores J.,2024)

El sistema de aislación sísmica se modeló mediante un esquema bilineal, el cual refleja de manera precisa el comportamiento típico de los aisladores sísmicos cuando están sometidos a cargas dinámicas. Este enfoque permite representar la transición entre una rigidez inicial, correspondiente al rango elástico, y una rigidez reducida en el rango post-elástico. Los parámetros empleados en el modelo fueron seleccionados cuidadosamente para garantizar una descripción fiel del comportamiento mecánico del sistema, como se ilustra en la **FIGURA 19**.

2.2.18 Tabulación de datos

De acuerdo con la característica del pórtico se seleccionó un aislador adecuado a las cargas y secciones establecidas previamente:

Tabla 4.Parámetros del aislador.

DATOS DE AISLADOR	
Rigidez inicial elástica:	26.8 KN/m
Fuerza de fluencia:	0.26KN
Rigidez post-elástica:	2.65 KN/m
Rigidez efectiva:	3.67 KN/m
Relación entre la fuerza de activación del aislador y el peso:	0.03

.

Se analizo el pórtico inicialmente con base fija variando sus factores de reducción de 1,4,6,8,10,20 y 30

Posteriormente se analiza la estructura sobre su aislador y se obtiene respuestas elásticas e inelástica para cada registro sísmico

2.2.18.1 Sismo ACHN

Se obtiene el desplazamiento máximo elástico ***de*** y la fuerza máxima elástica ***fy_e*** , se obtiene el desplazamiento máximo ***dmax*** con incursión en el rango inelástico y finalmente se obtiene la razón de ductilidad para cara valor de reducción ***Rbf.***
Para la variación de los factores de reducción ***Rbf*** se afectaron los parámetros de no linealidad como son materiales y rotulas plásticas del sistema

- Rbf: Razon de ductilidad base fija
- de: desplazamiento elastico maximo
- fy_e: fuerza maxima en rango elastico
- dmax: desplazamiento maximo en rango no lineal
- Razon ductilidad $\text{Ubf} = \frac{\text{dmax}}{\text{de}}$
- dmax. ea: deformaxion maxima de estructura aislada
- Razon ductilidad $\text{Uba} = \frac{\text{dmax.ea}}{\text{dmax}}$
- Factor de reduccion $\text{Rba} = \frac{\text{Fye aislado}}{\text{Fye no aislado}}$

Tabla 5.Parámetros y resultados sismo ACHN

SISMO ACHN							
ESTRUCTURA BASE FIJA							
Rbf	**1.000**	**4.000**	**6.000**	**8.000**	**10.000**	**20.000**	**30.000**
de (m)	0.101	0.025	0.017	0.013	0.010	0.005	0.003
fy_e (tonf)	62.600	15.650	10.433	7.825	6.260	3.130	2.087
dmax (m)	0.171	0.134	0.132	0.130	0.139	0.153	0.161
Razon ductilidad Ubf		5.287	7.836	10.289	13.733	30.297	47.881
ESTRUCTURA BASE AISLADA							
Rba	**1.000**	**4.000**	**6.000**	**8.000**	**10.000**	**20.000**	**30.000**
de (m)	0.280	0.070	0.047	0.035	0.028	0.014	0.002
fy_e (tonf)	52.300	13.075	8.717	6.538	5.230	2.615	0.436
dmax-ea (m)	0.090	0.088	0.064	0.057	0.089	0.040	0.052
dmax-aisl (m)	0.280	0.273	0.265	0.254	0.220	0.150	0.102
Factor reduccion Rba		3.342	5.013	6.684	8.355	16.709	25.064
Razon ductilidad Uba		3.500	3.815	4.530	8.810	7.840	15.400

2.2.18.2 Sismo AES2

Tabla 6.Parámetros y resultados sismo AES2

SISMO AES2							
ESTRUCTURA BASE FIJA							
Rbf	**1.000**	**4.000**	**6.000**	**8.000**	**10.000**	**20.000**	**30.000**
de (m)	0.059	0.015	0.010	0.007	0.006	0.003	0.002
fy_e (tonf)	36.558	9.140	6.093	4.570	3.656	1.828	1.219
dmax (m)		0.050	0.043	0.023	0.042	0.039	0.025
Razon ductilidad Ubf		3.391	4.394	3.133	7.138	13.054	12.715
ESTRUCTURA BASE AISLADA							
Rba	**1.000**	**4.000**	**6.000**	**8.000**	**10.000**	**20.000**	**30.000**
de (m)	0.164	0.041	0.027	0.020	0.016	0.008	0.001
fy_e (tonf)	30.543	7.636	5.091	3.818	3.054	1.527	0.255
dmax-ea (m)	0.054	0.041	0.028	0.022	0.027	0.017	0.017
dmax-aisl (m)	0.154	0.145	0.132	0.105	0.084	0.050	0.046
Factor reduccion Rba		5.722	8.584	11.445	14.306	28.612	42.918
Razon ductilidad Uba		2.750	2.856	2.986	4.568	5.654	8.480

2.2.18.3 Sismo ASDO

Tabla 7.Parámetros y resultados sismo ASDO

SISMO ASDO							
ESTRUCTURA BASE FIJA							
Rbf	**1.000**	**4.000**	**6.000**	**8.000**	**10.000**	**20.000**	**30.000**
de (m)	0.041	0.010	0.007	0.005	0.004	0.002	0.001
fy_e (tonf)	25.666	6.417	4.278	3.208	2.567	1.283	0.856
dmax (m)		0.046	0.041	0.036	0.031	0.020	0.012
Razon ductilidad Ubf		4.424	5.941	6.916	7.534	9.660	8.694
ESTRUCTURA BASE AISLADA							
Rba	**1.000**	**4.000**	**6.000**	**8.000**	**10.000**	**20.000**	**30.000**
de (m)	0.115	0.029	0.019	0.014	0.011	0.006	0.001
fy_e (tonf)	21.443	5.361	3.574	2.680	2.144	1.072	0.179
dmax-ea (m)	0.033	0.030	0.017	0.013	0.015	0.009	0.010
dmax-aisl (m)	0.145	0.138	0.125	0.114	0.105	0.054	0.045
Factor reduccion Rba		8.151	12.226	16.302	20.377	40.754	61.131
Razon ductilidad Uba		2.850	2.457	2.564	3.564	4.545	7.545

2.2.18.4 Sismo APED

Tabla 8.Parámetros y resultados sismo APED

SISMO APED							
ESTRUCTURA BASE FIJA							
Rbf	**1.000**	**4.000**	**6.000**	**8.000**	**10.000**	**20.000**	**30.000**
de (m)	0.223	0.056	0.037	0.028	0.022	0.011	0.007
fy_e (tonf)	138.346	34.587	23.058	17.293	13.835	6.917	4.612
dmax (m)		0.050	0.043	0.023	0.042	0.039	0.025
Razon ductilidad Ubf		0.896	1.161	0.828	1.886	3.450	3.360
ESTRUCTURA BASE AISLADA							
Rba	**1.000**	**4.000**	**6.000**	**8.000**	**10.000**	**20.000**	**30.000**
de (m)	0.619	0.155	0.103	0.077	0.062	0.031	0.005
fy_e (tonf)	115.583	28.896	19.264	14.448	11.558	5.779	0.963
dmax-ea (m)	0.186	0.254	0.208	0.167	0.178	0.207	0.153
dmax-aisl (m)	0.354	0.245	0.235	0.248	0.215	0.182	0.154
Factor reduccion Rba		1.512	2.268	3.024	3.780	7.561	11.341
Razon ductilidad Uba		4.548	5.584	5.985	7.980	18.540	20.540

2.2.18.5 Sismo AP01

Tabla 9.Parámetros y resultados sismo APO1

SISMO AP01							
ESTRUCTURA BASE FIJA							
Rbf	1.000	4.000	6.000	8.000	10.000	20.000	30.000
de (m)	0.111	0.028	0.019	0.014	0.011	0.006	0.004
fy_e (tonf)	69.173	17.293	11.529	8.647	6.917	3.459	2.306
dmax (m)		0.150	0.153	0.165	0.155	0.189	0.195
Razon ductilidad Ubf		5.401	8.284	11.903	13.906	34.023	52.763
ESTRUCTURA BASE AISLADA							
Rba	1.000	4.000	6.000	8.000	10.000	20.000	30.000
de (m)	0.323	0.081	0.054	0.040	0.032	0.016	0.003
fy_e (tonf)	60.354	15.089	10.059	7.544	6.035	3.018	0.503
dmax-ea (m)	0.104	0.107	0.065	0.065	0.109	0.059	0.069
dmax-aisl (m)	0.315	0.254	0.234	0.215	0.214	0.156	0.125
Factor reduccion Rba		3.024	4.536	6.049	7.561	15.122	22.682
Razon ductilidad Uba		3.854	3.485	4.650	9.780	10.548	18.654

2.2.18.6 Sismo AMNT

Tabla 10.Parámetros y resultados sismo AMNT

SISMO AMNT							
ESTRUCTURA BASE FIJA							
Rbf	1.000	4.000	6.000	8.000	10.000	20.000	30.000
de (m)	0.182	0.045	0.030	0.023	0.018	0.009	0.006
fy_e (tonf)	112.680	28.170	18.780	14.085	11.268	5.634	3.756
dmax (m)		0.150	0.153	0.165	0.155	0.189	0.195
Razon ductilidad Ubf		3.300	5.063	7.274	8.498	20.792	32.244
ESTRUCTURA BASE AISLADA							
Rba	1.000	4.000	6.000	8.000	10.000	20.000	30.000
de (m)	0.504	0.126	0.084	0.063	0.050	0.025	0.004
fy_e (tonf)	94.140	23.535	15.690	11.768	9.414	4.707	0.785
dmax-ea (m)	0.162	0.297	0.230	0.197	0.174	0.141	0.137
dmax-aisl (m)	0.504	0.405	0.354	0.325	0.315	0.204	0.154
Factor reduccion Rba		1.857	2.785	3.713	4.641	9.283	13.924
Razon ductilidad Uba		6.540	7.580	8.650	9.545	15.545	22.545

A continuación de muestra los valores de deformación máximo obtenidos con R=1 para el pórtico de base fija en rango lineal para el sismo ACHN.
Desplazamiento máximo 17.07cm.

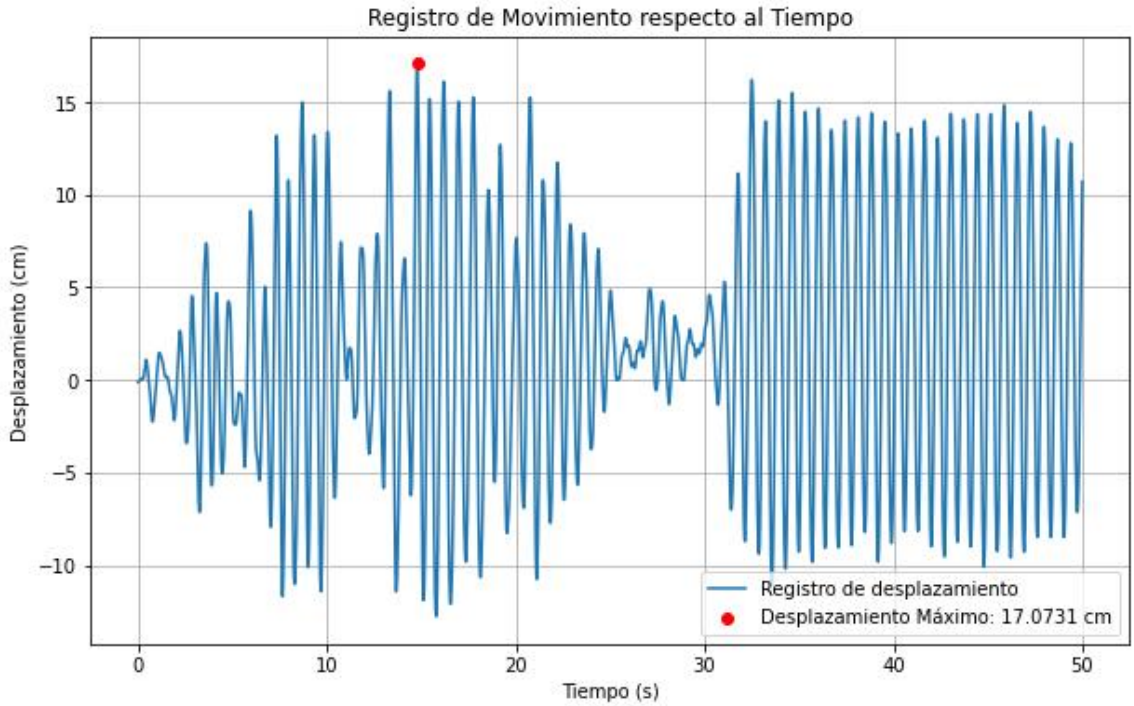


FIGURA 20.Deformación máxima pórtico base fija openseepy (Flores J.,2024).

A continuación de muestra los valores de deformación máximo obtenidos con R=1 para el pórtico de base fija en rango no lineal para el sismo ACHN.
Desplazamiento máximo de 10cm.

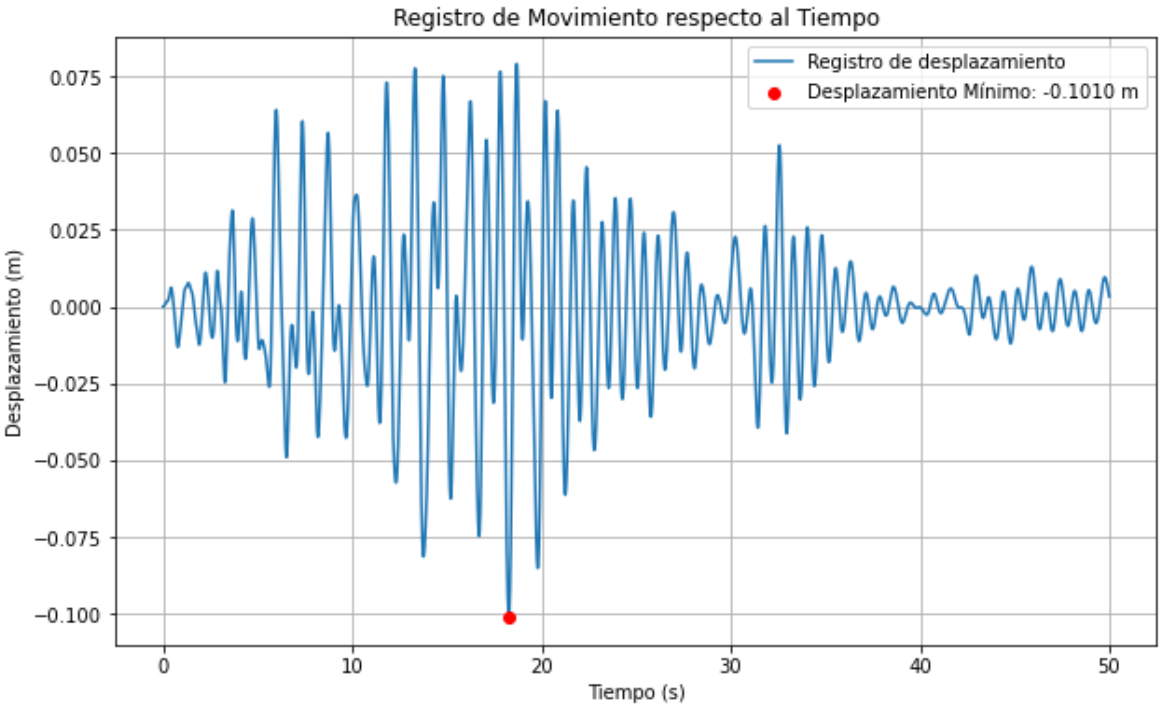


FIGURA 21. Deformación máxima pórtico base fija no lineal (Flores J.,2024).

A continuación de muestra los valores de deformación máximo obtenidos con R=1 para el pórtico de base aislada en rango no lineal para el sismo ACHN

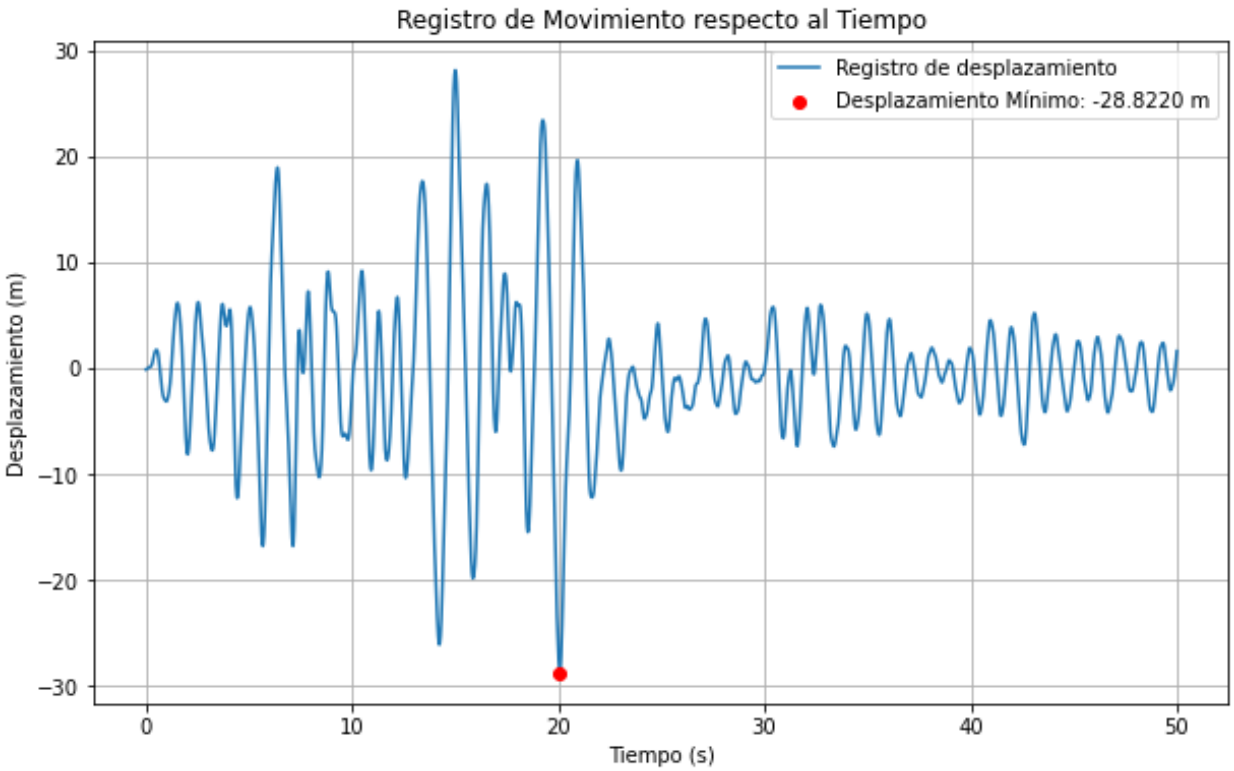


FIGURA 22. Deformación máxima pórtico base aislada (Flores J.,2024).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de los análisis estáticos y dinámicos no lineales realizados sobre el pórtico de acero con y sin aisladores sísmicos. Los resultados se enfocan en los desplazamientos máximos, las derivas entre -piso, la demanda de ductilidad, y el efecto de la variación en el factor de reducción de resistencia (R) sobre el desempeño sísmico de la estructura.

3.2 Análisis estático lineal

3.2.1 Modos de Vibración pórtico sin aislador

- Modo 1 T = 0.701 s
- Modo 2 T = 0.0897

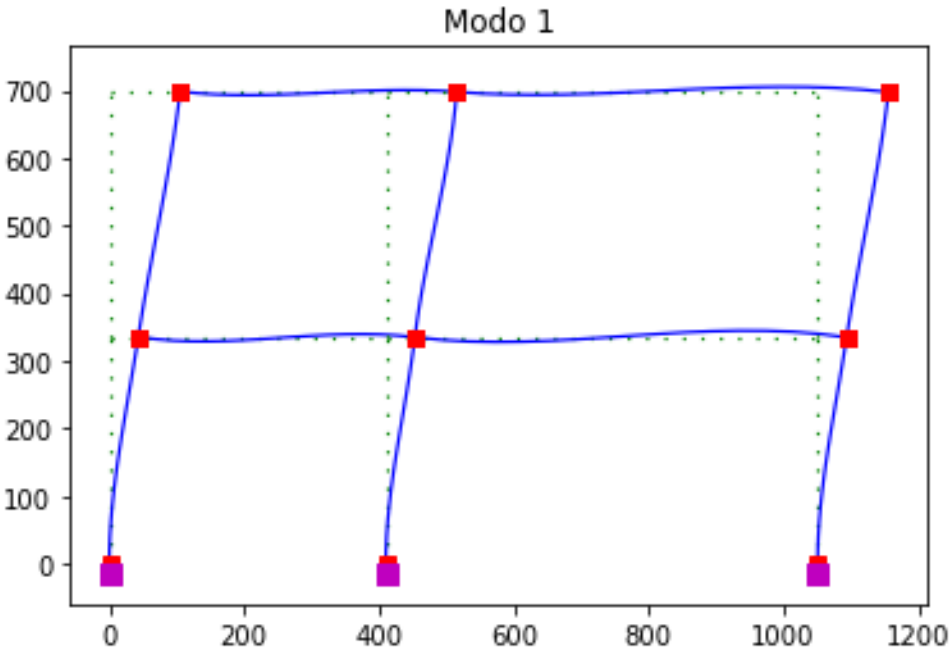


FIGURA 23.Modo 1 openseepy (Flores J.,2024).

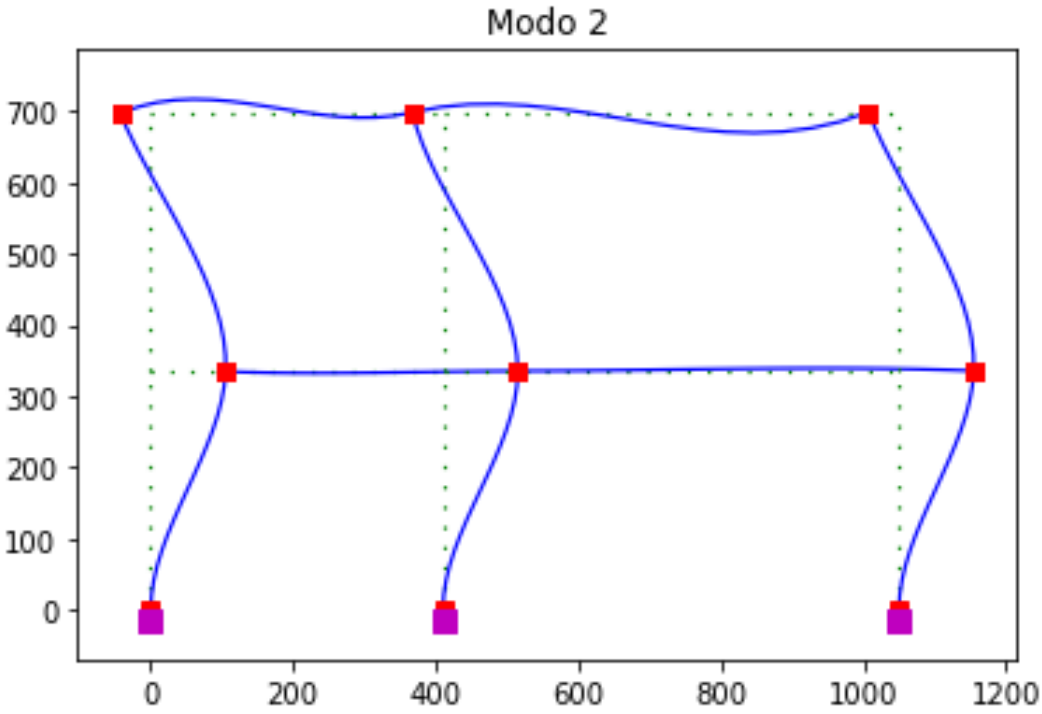


FIGURA 24.Modo 2 openseepy (Flores J.,2024).

3.3 Análisis Estático modelo sin aisladores con R=8

Se desarrolló un modelo estático con base fija, sin incluir aisladores, utilizando los parámetros sísmicos correspondientes al sistema estructural analizado y cumpliendo con las disposiciones de la norma NEC-15. Este enfoque permitió obtener resultados clave relacionados con las deformaciones y derivas, los cuales se presentan a continuación**.**

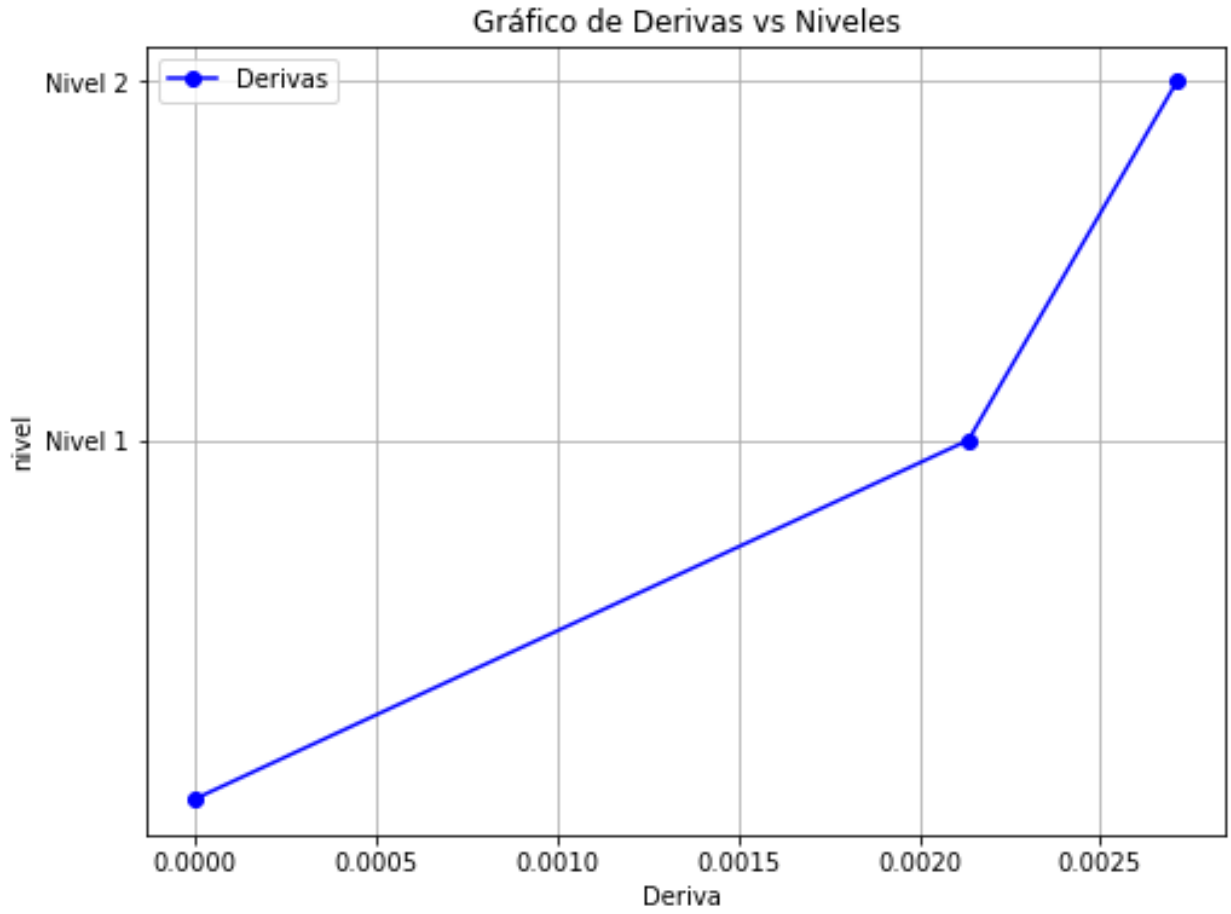


FIGURA 25. Derivas análisis estático sin aisladores (Flores J.,2024).

Se obtuvo una deriva máxima del 0.0025%

3.4 Análisis dinámico lineal modelo sin aisladores con sismo match

Después de completar el análisis estático, se llevó a cabo un análisis dinámico utilizando el espectro de respuesta definido por los parámetros establecidos en la NEC-15. Este procedimiento permitió obtener datos detallados sobre las deformaciones y derivas, proporcionando una visión más precisa del comportamiento estructural bajo solicitaciones dinámicas.

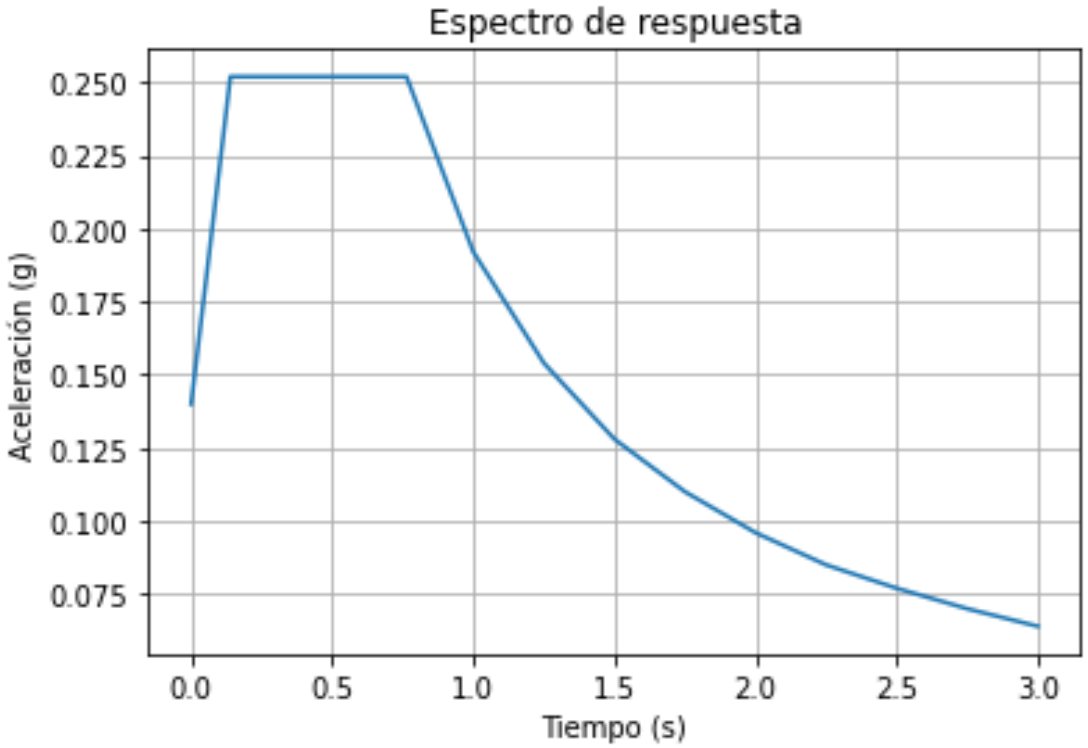


FIGURA 26.Espectro de respuesta utilizado.

Características del Suelo:

- Tipo de Suelo: D (Suelo muy blando)

Parámetros del Suelo:

- Fa: 1.12 (Factor de amplificación para aceleraciones cortas)
- Fd: 1.11 (Factor de amplificación para desplazamientos)
- Fs: 1.4 (Factor de amplificación para aceleraciones largas)

Factores de Diseño:

- Factor de Importancia (III): 1.5 (Categoría de estructura crítica o esencial)
- Coeficiente de Reducción (R): 8 (Sistema estructural dúctil)

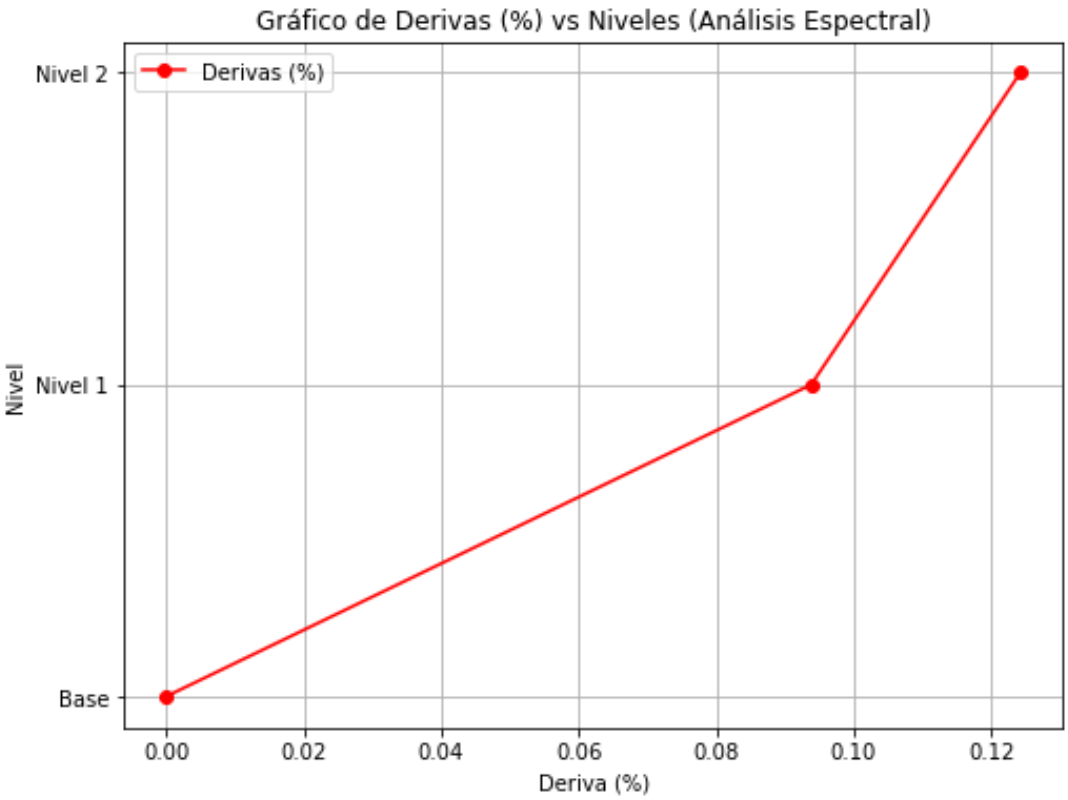


FIGURA 27.Grafico de derivas análisis dinámico sin aisladores.

- Las deformaciones obtenidas dan como deriva máxima 1.2%

3.5 Análisis no lineal estático modelo sin aisladores

En este apartado se presenta el análisis no lineal estático realizado sobre el modelo estructural que no cuenta con aisladores sísmicos.

Se utilizó un método estático incremental conocido como Pushover, el cual permite estudiar la capacidad de la estructura para soportar desplazamientos laterales crecientes hasta alcanzar un punto de colapso. En este proceso, se aplicó una distribución de cargas sísmicas proporcionales a los modos de vibración fundamentales de la estructura.

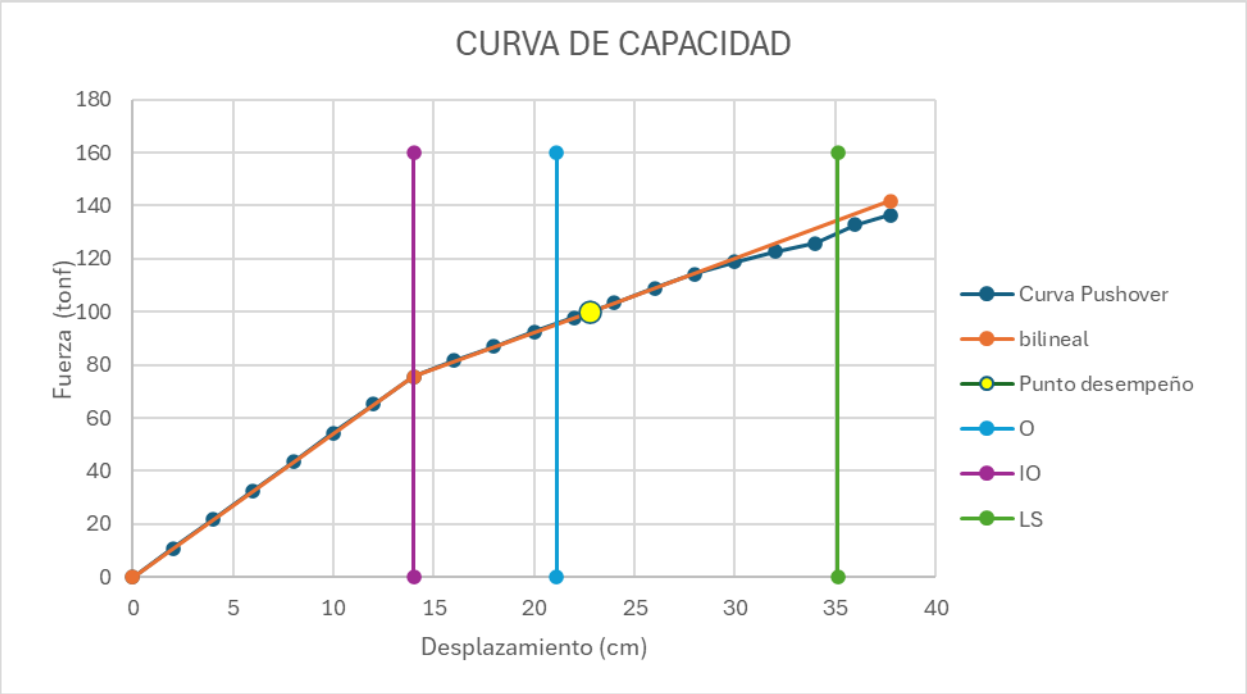


FIGURA 28.Curva de capacidad modelo sin aisladores en openseespy

De acuerdo con la metodología del ASCE41-13 NSP la estructura tiene un punto de desempeño que se encuentra en la zona de prevención al colapso.

3.6 Análisis no lineal estático modelo con aisladores

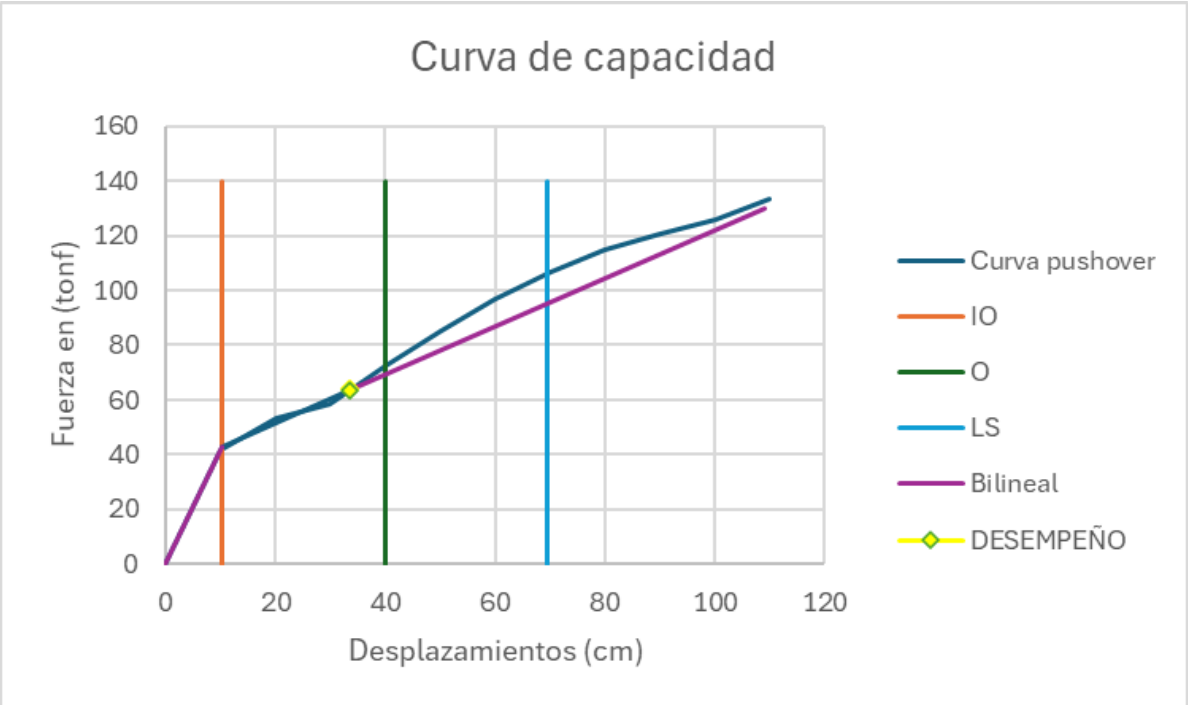


FIGURA 29.Curva de capacidad modelo con aisladores en openseespy

De acuerdo con la metodología del ASCE41-13 NSP la estructura tiene un punto de desempeño que se encuentra en la zona de operación.

Se obtuvo el desempeño sísmico de la estructura sin aislador identificando que la estructura se encontraba en el rango inelástico con un desempeño de prevención al colapso por lo que el uso de un sistema de aislación permitiría que alcance el desempeño más optimo de operación.

A partir del análisis sin aislación , se procedió a seleccionar el aislador para el pórtico indicado y se obtuvo un nivel de desempeño de la estructura con R=8 que se encuentra en operación , a pesar de no haberse respetado los factores de reducción indicados en la norma de 1.5 o máximo 2, la estructura de dos niveles presento un desempeño final optimo, esto sugiere que las estructuras de periodos cortos en ciertos casos no tienen un mejor comportamiento en el rango inelástico por la fuerza sísmica a la que estarían sometidos, en este caso se debería ampliar la investigación para estructuras de periodos largos ya que estarían sometidos a mayor daños.

Las variaciones para incursionar en el rango elástico con una fuerza menor permitieron que la razón ductilidad aumente tanto como en estructuras aisladas y no aisladas, teniendo un patrón de aumento mayor en estructuras no aisladas.

En esta investigación al ser una estructura real se usó un solo periodo de estructura y un solo tipo de aislador, con lo que se pudo demostrar que las deformaciones máximas con aislador fueron menor al pórtico sin aislador con lo que se comprueba el beneficio de usar sistemas de aislación de base, además las razones de ductilidad de sistema aislado fue menos que las razones de ductilidad del sistema de base fija.

CAPÍTULO 6

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se obtuvo la respuesta no lineal del pórtico sin aisladores sometido a diferente registro sísmico, se evidencio que la estructura incursiona en rango no lineales al afectar su factor de reducción a pesar de ser una estructura de 2 niveles, su desempeño sobre aisladores está en el rango seguridad de vida.

En base a los resultados del pórtico sobre aisladores, este alcanza factores de ductilidad mayores a los esperados por lo que se concluye que la estructura incursionara en el rango no lineal.

Las razones de ductilidades obtenidas en las estructuras aisladas fueron menores a los valores obtenido en la de base fija, esto se debe a que en gran parte la no linealidad es repartida entre el sistema de aislación y la estructura

Los resultados obtenidos han permitido validar la efectividad de la aislación sísmica para reducir los desplazamientos máximos y las derivas entre-piso, lo que contribuye a mejorar la seguridad y resiliencia de las estructuras ante sismos severos.

Al disminuir el rango elástico de las estructuras de forma teórica permite que las razones de ductilidad aumenten a pesar de que las deformaciones de la estructura aislada disminuyen, esto indica que las estructuras aisladas mientras más rápido incursionen en rangos no lineales estarían más propensas al daño.

La implementación de factores R entre 1.5 y 2 que se detalla en las normas termina siendo un valor necesario ya que es probable que ciertas estructuras incursionen en rango no lineales a pesar de haber sido diseñadas con estos valores recomendados.

5. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

Ampliación del estudio a estructuras más complejas: Si bien este trabajo se centró en un pórtico de acero de dos niveles, sería de gran interés aplicar el mismo enfoque metodológico a estructuras más grandes y complejas, como edificios de múltiples pisos o puentes. Esto permitiría evaluar el impacto de los aisladores sísmicos en diferentes tipos de estructuras y bajo diversas configuraciones arquitectónicas.

Validación experimental de los resultados: Aunque los resultados numéricos obtenidos son consistentes con las expectativas teóricas, se recomienda realizar estudios experimentales en modelos a escala o estructuras reales para validar los hallazgos de manera más precisa. Los ensayos en mesas vibratorias pueden proporcionar información adicional sobre el comportamiento in situ de los sistemas con aislación sísmica.

Exploración de otros tipos de aisladores sísmicos: Este trabajo utilizó aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB), pero se podría usar otros tipos de aisladores, como los sistemas de fricción (FPS), afectan el desempeño de la estructura.

Simulación bajo diferentes registros sísmicos: Este estudio utilizó un conjunto de acelerogramas específicos, pero se sugiere realizar simulaciones utilizando un mayor rango de registros sísmicos, provenientes de diferentes regiones y con diversas intensidades. Esto permitiría una evaluación más completa del comportamiento de las estructuras con aisladores bajo una variedad de escenarios sísmicos.

Se debería seguir la metodología de la investigación para estructuras de grandes periodos o de más niveles ya que estos están propensos a desarrollar rotulas plásticas por la esbeltes que puede tener el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering. CRC Press.

Chopra, A. K. (2001). Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (2nd ed.). Prentice Hall.

Clough, R. W., & Penzien, J. (1993). Dynamics of structures (2nd ed.). McGraw-Hill.

Jangid, R. S. (2007). Optimum friction pendulum system for near-fault motions. Engineering Structures, 29(10), 2503-2513. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.023

Kelly, J. M. (1997). Earthquake-resistant design with rubber. Springer-Verlag.

Lignos, D. G., & Krawinkler, H. (2011). Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. Journal of Structural Engineering, 137(11), 1291-1302. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000376

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). OpenSees command language manual. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Mosqueda, G., Whittaker, A. S., & Fenves, G. L. (2004). Characterization and modeling of friction pendulum bearings subjected to multiple components of excitation. Journal of Structural Engineering, 130(3), 433-442. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(433)

Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). Design of seismic isolated structures: From theory to practice. Wiley.

Robinson, W. H., & Tucker, A. G. (1977). A lead-rubber shear damper. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 10(3), 151-153.

Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31(3), 491-514. https://doi.org/10.1002/eqe.141

Zayas, V. A., Low, S. S., & Mahin, S. A. (1990). The FPS earthquake resisting system. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

NEC-SE-CG (2015). Cargas No Sísmicas. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

NEC-SE-DS (2015). Peligro Sísmico - Diseño Sismo Resistente. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

Electrocenter Colombia. (s.f.). *Tipos de amortiguadores sísmicos: Mecanismos de actuación y componentes*. Recuperado el 17 de diciembre de 2024, de https://electrocentercol.com/blog/tipos-de-amortiguadores-sismicos-mecanismos-de-actuacion-y-componentes/

Cámara Chilena de la Construcción (CChC). (2022). *Aisladores sísmicos: Comportamiento, tipos y aplicaciones*. Recuperado de https://catalogo.extension.cchc.cl/documentos/documentos/35625-2.pdf.

Toro Castillo, D. A. (2024). Efectos en la demanda de ductilidad debido al uso de reducción de resistencia en el diseño de estructuras sísmicamente aisladas (Tesis de Maestría, Universidad de Guayaquil). Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas.

PLANOS Y ANEXOS

ANEXO A – CODIGO DE MODELO NO LINEAL EN OPENSEESPY

```
#%% Modelo
import openseespy.opensees as ops
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import opsvis as opsv
import pandas as pd
ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)

#%% Nodos-Diafragmas-masas
x1 = 410
x2=640
y1 = 335
y2=363

ops.node(1, 0,0)
ops.node(2, x1,0)
ops.node(3, x1+x2,0)


ops.node(4, 0,y1)
ops.node(5, x1,y1)
ops.node(6, x1+x2,y1)




ops.node(7, 0,y1+y2)
ops.node(8, x1,y1+y2)
ops.node(9, x1+x2,y1+y2)
```

```
ops.fixY(0.0, 1,1,1)

# Diafragmas
# equalDOF(Node primario, Nodo secundario, DGL)
ops.equalDOF(5, 4, 1)
ops.equalDOF(5, 6, 1)

ops.equalDOF(8, 7, 1)
ops.equalDOF(8, 9, 1)




# Propiedades de la columna
A_steel = 138.2  # Área de la sección de acero (cm²)
E_steel = 2.1e6  # Módulo de elasticidad del acero (kg/cm²)
Iz_steel = 19143.5  # Momento de inercia del acero (cm⁴)



# Área total de la sección
A_total = A_steel

# Módulo de elasticidad equivalente (ponderado por el área)
E_total = E_steel


# Momento de inercia total
Iz_total = Iz_steel
```

```
# Propiedades del perfil I380x145x12x8
A_w = 63.28  # Área de la sección W (cm²)
E_w = 2.1e6  # Módulo de elasticidad del acero (kg/cm²)
Iz_w = 14793  # Momento de inercia del perfil W (cm⁴)

# Propiedades del perfil I300x145x12x8
A_w2 = 56.88  # Área de la sección W (cm²)
Iz_w2 = 8621  # Momento de inercia del perfil W (cm⁴)

transfTag = 1  # Transformación geométrica (Linear en este caso)
# Definir una transformación geométrica para los elementos
ops.geomTransf('Linear', transfTag)



# Vigas
ops.element('elasticBeamColumn', 1, 4, 5, A_w2, E_w, Iz_w2, transfTag)  # Viga entre nodos 4 y 5
ops.element('elasticBeamColumn', 2, 5, 6, A_w, E_w, Iz_w, transfTag)  # Viga entre nodos 5 y 6

ops.element('elasticBeamColumn', 3, 7, 8,  A_w2, E_w, Iz_w2, transfTag)  # Viga entre nodos 7 y 8
ops.element('elasticBeamColumn', 4, 8, 9, A_w, E_w, Iz_w, transfTag)  # Viga entre nodos 8 y 9



# Columnas
ops.element('elasticBeamColumn', 5, 1, 4, A_total, E_total, Iz_total, transfTag)  # Columna entre nodos 1 y 4
```

```
ops.element('elasticBeamColumn', 6, 2, 5, A_total, E_total, Iz_total, transfTag)  # Columna entre nodos 2 y 5
ops.element('elasticBeamColumn', 7, 3, 6, A_total, E_total, Iz_total, transfTag)  # Columna entre nodos 3 y 6

ops.element('elasticBeamColumn', 8, 4, 7, A_total, E_total, Iz_total, transfTag)  # Columna entre nodos 4 y 7
ops.element('elasticBeamColumn', 9, 5, 8, A_total, E_total, Iz_total, transfTag)  # Columna entre nodos 5 y 8
ops.element('elasticBeamColumn', 10, 6, 9, A_total, E_total, Iz_total, transfTag)  # Columna entre nodos 6 y 9

# Primero debes definir el patrón de carga
ops.timeSeries('Linear', 1)  # Define una serie de tiempo lineal
ops.pattern('Plain', 1, 1)   # Define un patrón de carga simple

# Carga muerta y carga viva en kg/m
w_l = 4.32   # Carga viva (kg/cm)
w_d = 10.80  # Carga muerta (kg/cm)

# Suma de las cargas
w_total = w_l + w_d  # Carga total

# Aplicar la carga distribuida a las vigas
# Formato: eleLoad('-ele', elementTag, '-type', 'beamUniform', Wy, Wx)
ops.eleLoad('-ele', 1, '-type', 'beamUniform', -w_total, 0)  # Viga entre nodos 4 y 5
ops.eleLoad('-ele', 2, '-type', 'beamUniform', -w_total, 0)  # Viga entre nodos 5 y 6
ops.eleLoad('-ele', 3, '-type', 'beamUniform', -w_total, 0)  # Viga entre nodos 7 y 8
ops.eleLoad('-ele', 4, '-type', 'beamUniform', -w_total, 0)  # Viga entre nodos 8 y 9

# Definir el análisis
ops.system('BandGeneral')  # Define el sistema de ecuaciones a resolver
```

```
ops.numberer('Plain')      # Define el numerador de ecuaciones
ops.constraints('Plain')   # Define las restricciones
ops.integrator('LoadControl', 0.09)  # Define el control de la carga
ops.algorithm('Newton')    # Define el algoritmo de análisis
ops.analysis('Static')     # Define el análisis estático

# Ejecutar el análisis
ops.analyze(1)             # Analiza el modelo para un paso de carga



# Datos para el cálculo de la masa sísmica

fraccion_carga_viva = 0.25  # Fracción de la carga viva considerada en el análisis sísmico

# Cálculo de la masa sísmica por piso
g = 981  # Aceleración gravitacional en m/s²
L=x1+x2
masa_sismica1 = (w_d*L+w_l*0.25*L)/g
masa_sismica2 =(w_d*L+w_l*0.25*L)/g
# Asignar la masa sísmica al nodo maestro del diafragma en cada piso
ops.mass(5, masa_sismica1, 1e-12, 1e-12)  # Nodo maestro del primer nivel (diafragma)
ops.mass(8, masa_sismica2, 1e-12, 1e-12)  # Nodo maestro del segundo nivel (diafragma)

# Primero debes definir el coeficiente sísmico y la aceleración gravitacional
Cs = 0.252  # Ejemplo de coeficiente sísmico (puedes ajustar según el código de diseño)



# Calcular las fuerzas sísmicas equivalentes en cada nivel
```

```
F1 = (masa_sismica1*g*y1 / (masa_sismica1*g*y1+masa_sismica2*g*(y1+y2)))*Cs*(masa_sismica1*g+masa_sismica2*g)
F2 = (masa_sismica2*g*(y1+y2) / (masa_sismica1*g*y1+masa_sismica2*g*(y1+y2)))*Cs*(masa_sismica1*g+masa_sismica2*g)
# Definir el patrón de carga para el sismo
ops.timeSeries('Linear', 2)  # Definir una serie de tiempo lineal
ops.pattern('Plain', 2, 2)   # Definir un patrón de carga sísmica

# Aplicar las fuerzas sísmicas a los nodos maestros (diafragmas)
ops.load(5, F1, 0.0, 0.0)  # Fuerza sísmica en el nodo maestro del primer nivel
ops.load(8, F2, 0.0, 0.0)  # Fuerza sísmica en el nodo maestro del segundo nivel

# Definir el sistema de ecuaciones, algoritmo, y tipo de análisis
ops.system('BandGeneral')  # Sistema de ecuaciones
ops.numberer('Plain')      # Numerador
ops.constraints('Plain')   # Restricciones
ops.integrator('LoadControl', 1.0)  # Control de la carga
ops.algorithm('Linear')    # Algoritmo de análisis
ops.analysis('Static')     # Análisis estático




# Ejecutar el análisis
ops.analyze(1)

# Visualizar el modelo estructural después del análisis
plt.figure()
opsv.plot_model('nodes', 'elements')
plt.show()
```

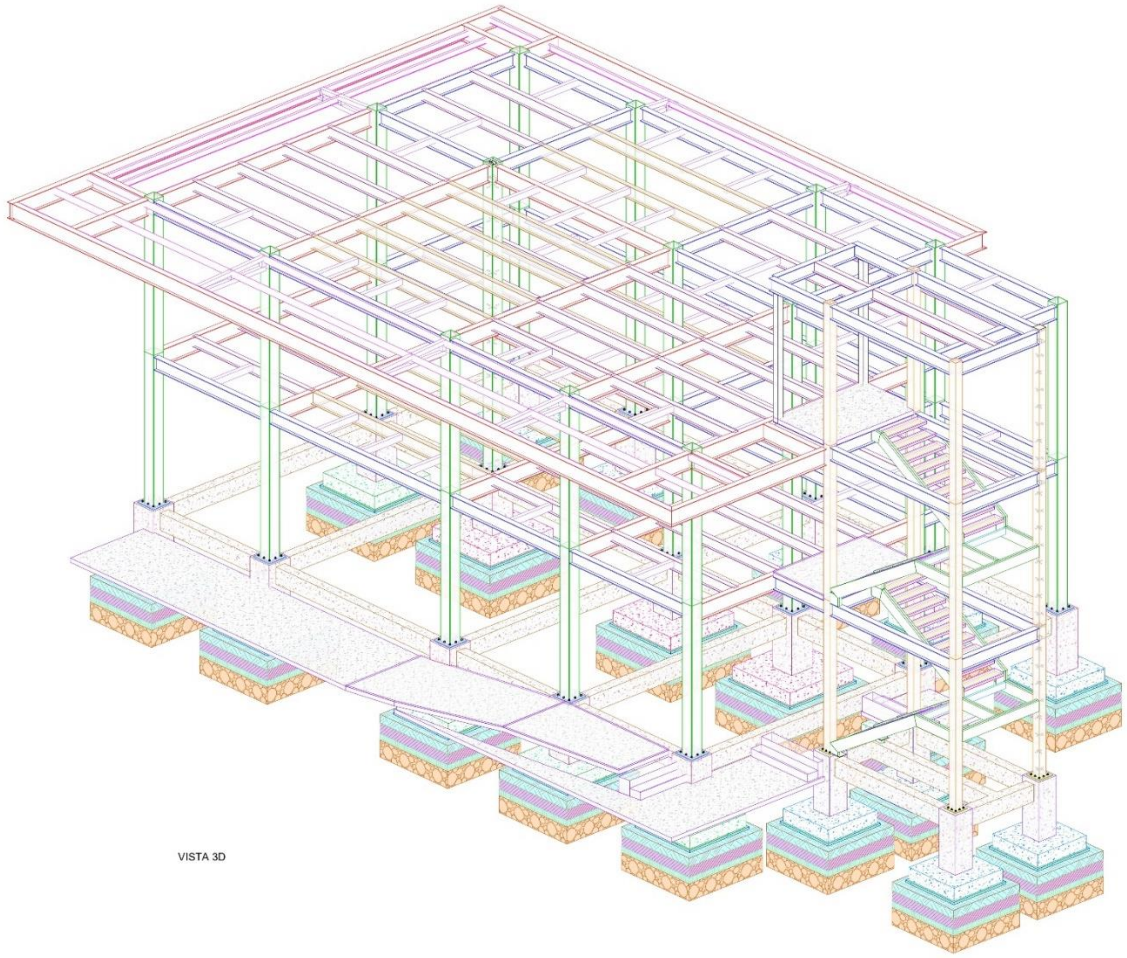
```
# Obtener desplazamientos nodales para evaluar el comportamiento de la estructura
disp_nivel_1 = ops.nodeDisp(5)  # Desplazamiento del nodo maestro en el primer nivel
disp_nivel_2 = ops.nodeDisp(8)  # Desplazamiento del nodo maestro en el segundo nivel

# Mostrar los resultados
print("Desplazamiento en el nivel 1:", disp_nivel_1)
print("Desplazamiento en el nivel 2:", disp_nivel_2)
print("masa simica piso 1:",masa_sismica1)

# Extract the X-direction displacements
disp_nivel_1_X = disp_nivel_1[0]  # Displacement in X at level 1
disp_nivel_2_X = disp_nivel_2[0]  # Displacement in X at level 2

# Compute the drifts (inter-story drift ratios)
# Drift at level 1 is the displacement at level 1 divided by the height of level 1
drift_level_1 = disp_nivel_1_X / y1  # y1 is the height of level 1

# Drift at level 2 is the difference in displacement between level 2 and level 1, divided by the height of level 2
drift_level_2 = (disp_nivel_2_X - disp_nivel_1_X) / y2  # y2 is the height between level 1 and 2


data = {
    'Nivel': [1, 2],
    'Fuerza Sísmica (kgf)': [F1, F2],
    'Desplazamiento X (cm)': [disp_nivel_1_X, disp_nivel_2_X],
    'Deriva (%)': [drift_level_1 * 100, drift_level_2 * 100]
}

df = pd.DataFrame(data)
```

```
# Set display options for better readability
pd.set_option('display.float_format', '{:.4f}'.format)

# Display the table
print(df)



#%% Análisis Modal
num_modos = 2  # Número de modos a calcular
OmegaSq = ops.eigen('-fullGenLapack', num_modos)  # Cálculo de los valores propios
OmegaSq = np.array(OmegaSq)
Omega = OmegaSq**0.5  # Frecuencias angulares
Periodo = 2 * np.pi / Omega  # Periodos de vibración

# Mostrar los periodos de los modos de vibración
for i in range(num_modos):
    print('Modo ', i + 1, 'T = ', Periodo[i], 's')

# Visualización de los modos
plt.figure()
opsv.plot_mode_shape(1)  # Visualizar modo 1
plt.title('Modo 1')

plt.figure()
opsv.plot_mode_shape(2)  # Visualizar modo 2
plt.title('Modo 2')




# Datos del espectro (segundos, aceleraciones en función de g)
```

```
tiempos = np.array([0.000, 0.139, 0.763, 1.000, 1.250, 1.500, 1.750, 2.000, 2.250, 2.500, 2.750, 3.000])
aceleraciones = np.array([0.140, 0.252, 0.252, 0.192, 0.154, 0.128, 0.110, 0.096, 0.085, 0.077, 0.070, 0.064])

# Graficar el espectro para visualizarlo
plt.figure()
plt.plot(tiempos, aceleraciones)
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Aceleración (g)')
plt.title('Espectro de respuesta')
plt.grid(True)
plt.show()

#%% Definir el análisis dinámico con el espectro

# Definir una serie de tiempo para el análisis dinámico (con un tag único)
ops.timeSeries('Path', 100, '-time', *tiempos, '-values', *aceleraciones)

# Crear el patrón de carga dinámico (con un tag único)
# La excitación se aplica en la dirección horizontal (por ejemplo, X), que es dirección 1
ops.pattern('UniformExcitation', 200, 1, '-accel', 100)

#%% Definir el análisis dinámico
ops.wipeAnalysis()  # Limpiar configuraciones previas de análisis
ops.system('BandGeneral')  # Sistema de ecuaciones
ops.numberer('Plain')  # Numerador
ops.constraints('Plain')  # Restricciones
ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25)  # Integrador de Newmark para el análisis dinámico
ops.algorithm('Linear')  # Algoritmo de análisis
ops.analysis('Transient')  # Análisis transitorio (dinámico)
```

```
#%% Ejecutar el análisis dinámico
dt = 0.01  # Paso de tiempo
num_steps = int(tiempos[-1] / dt)  # Número de pasos de análisis dinámico
ops.analyze(num_steps, dt)  # Ejecutar el análisis dinámico

#%% Obtener resultados dinámicos
disp_nivel_1_dyn = ops.nodeDisp(5)  # Desplazamiento en el nodo 5 (primer nivel)
disp_nivel_2_dyn = ops.nodeDisp(8)  # Desplazamiento en el nodo 8 (segundo nivel)

# Mostrar desplazamientos dinámicos
print("Desplazamiento dinámico en el nivel 1:", disp_nivel_1_dyn)
print("Desplazamiento dinámico en el nivel 2:", disp_nivel_2_dyn)
```

ANEXO B – PLANOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL ORIGINAL SIN AISLADOR



VISTA 3D

jamezflores@gmail.com
cel:+593979206899

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

CÓDIGO QR

N.º	Descripción	Fecha
1	REVISIÓN REV_00	11/09/2024
2	REVISIÓN REV_01	26/09/2024

Cliente: --

Proyecto: **NOVOHOSPITAL**

Contiene: VISTA EN 3D

Revisión: REV_01

Fecha: 26/09/2024

Diseñado por:

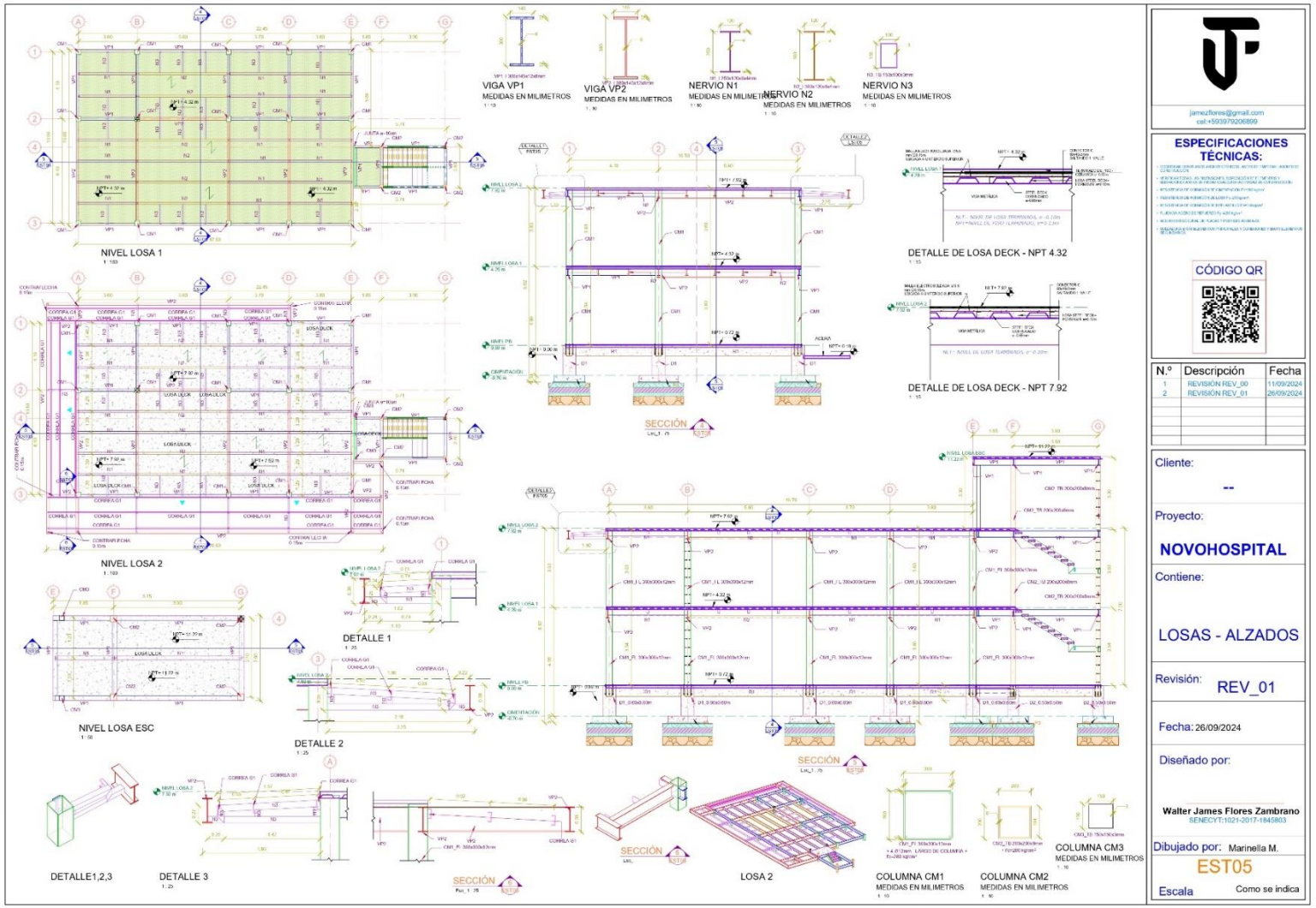
Walter James Flores Zambrano
SENECYT:1021-2017-1845803

Dibujado por: Marinella M.

EST02

Escala

30/9/2024 11:21:55



jamezflores@gmail.com
cel:+593979206899

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

CÓDIGO QR

N.º	Descripción	Fecha
1	REVISIÓN REV_00	11/09/2024
2	REVISIÓN REV_01	26/09/2024

Cliente: --

Proyecto: **NOVOHOSPITAL**

Contiene: LOSAS - ALZADOS

Revisión: REV_01

Fecha: 26/09/2024

Diseñado por:

Walter James Flores Zambrano
SENECYT:1021-2017-1845803

Dibujado por: Marinella M.

EST05

Escala: Como se indica

30/9/2024 11:22:15