

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DINÁMICO ANTE SISMOS NO IMPULSIVOS
DE UNA EDIFICACIÓN DE CONCRETO ARMADO DE 6
NIVELES CON SISTEMA DE MUROS MEDIANTE
OPENSEESPY TACNA 2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. Mileydi Lizbeth Mamani Apaza

Bach. Wendy Vanessa Alania Leon

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

TACNA - PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

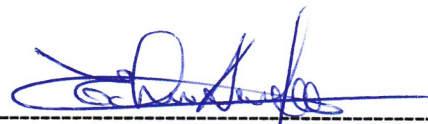
Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia


Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**“ANÁLISIS DINÁMICO ANTE SISMOS NO IMPULSIVOS DE UNA EDIFICACIÓN DE
CONCRETO ARMADO DE 6 NIVELES CON SISTEMA DE MUROS MEDIANTE
OPENSEESPY TACNA 2025”**


Tesis examinada y aprobada el día 24 de setiembre de 2025 estando integrado el Jurado
Calificador por:


PRESIDENTE:




MSc. Ing. Edgar Chura Arocutipa 


SECRETARIO:



Dr. Ing. Carlos Andrés Aguilar Maron 

VOCAL:



Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramirez 

ASESOR:



Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramirez 

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, WILBER PERCY MENDOZA RAMIREZ, en mi condición de ASESOR (A) acreditado con Resolución de Facultad y/o Postgrado N° 061-2025-FIAG/UNJBG del 30 de enero del 2025, de la tesis denominada: **“ANÁLISIS DINÁMICO ANTE SISMOS NO IMPULSIVOS DE UNA EDIFICACIÓN DE CONCRETO ARMADO DE 6 NIVELES CON SISTEMA DE MUROS MEDIANTE OPENSEESPY TACNA 2025”**. Presentado por Bach. **WENDY VANESSA ALANIA LEON** y Bach. **MILEYDI LIZBETH MAMANI APAZA**. Para optar el grado académico y/o título profesional de INGENIERO CIVIL.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 13 %. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis y/o trabajo enunciado líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional de INGENIERO CIVIL, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

Tacna, 23 de setiembre del 2025.



FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos: Wilber Percy Mendoza Ramirez
DNI: 00520705



Huella dactilar



FIRMA AUTOR

Nombres y apellidos: Wendy Vanessa Alania Leon
DNI: 72793762



Huella dactilar



FIRMA AUTOR

Nombres y apellidos: Mileydi Lizbeth Mamani Apaza
DNI: 75565386



Huella dactilar

Dedicatoria

A mis padres, Lidia y Ricardo, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor inspiración en cada paso de mi camino. A mis hermanos, Leticia y Diego, por cuidar siempre de mí y ser mis cómplices de aventuras y travesuras. Asimismo, a mis queridas mascotas, Tony y Mocka, cuya compañía ha llenado mi vida de felicidad y tranquilidad.

Con mucho cariño, *Mileydi Mamani Apaza.*

Esta tesis está dedicada con mucho cariño a mis amados padres, Hugo Venancio Alania Arce y Estela Leon Chambilla, quienes me guiaron con amor desde mi infancia, inculcándome valores y disciplina que han sido fundamentales en mi formación personal y profesional.

Con mucho cariño, *Wendy Alania Leon.*

Agradecimiento

Agradecemos a Dios por darnos salud y fortaleza para culminar esta etapa tan importante de nuestra formación como ingenieras civiles. Su guía y protección nos han acompañado en cada paso del camino.

Reconocemos con gratitud a nuestros docentes de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann por su dedicación y compromiso en nuestra formación. De manera especial, al Mtro. Ing. Wilber Mendoza, quien, con su apoyo y valiosas enseñanzas, nos inspiró a superar cada desafío y a realizar este trabajo con excelencia.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su amor, paciencia y constante aliento. Ellos han sido nuestro mayor soporte y motivación para alcanzar esta meta, que marca el inicio de nuestra trayectoria profesional.

Índice General

Portada.....	i
Aprobación.....	ii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Índice General.....	vi
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Figuras.....	x
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
Introducción.....	1
Capítulo I Planteamiento del Problema.....	3
1.1. Descripción y Fundamentación del Problema.....	3
1.2. Formulación del Problema.....	5
1.2.1. Problema General.....	5
1.2.2. Problemas Específicos.....	6
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo General.....	6
1.3.2. Objetivos Específicos.....	6
1.4. Justificación e Importancia.....	7
1.5. Limitaciones y Alcances.....	9
1.6. Hipótesis.....	10

1.6.1. Hipótesis General.....	10
1.6.2. Hipótesis Específicas	11
1.7. Sistema de Variables, Dimensiones e Indicadores	11
1.7.1. Variable Independiente	12
1.7.2. Variable Dependiente.....	12
Capítulo II Marco Teórico	15
2.1. Antecedentes.....	15
2.2. Bases Teóricas	21
2.2.1. Sismicidad en Perú.....	21
2.2.2. Sismos no Impulsivos	26
2.2.3. Análisis Dinámico.....	31
2.3. Definición de Términos Básicos.....	45
Capítulo III Metodología de la Investigación	48
3.1. Metodología y Técnicas Utilizadas	48
3.1.1. Tipo y Nivel de Investigación.....	48
3.1.2. Nivel de Investigación	48
3.1.3. Diseño de Investigación.....	49
3.2. Población y Muestra	50
3.2.1. Población.....	50
3.2.2. Muestra	50
Capítulo IV Resultados	51
4.1. Modelamiento Estructural	51
4.1.1. Descripción de la Edificación	53
4.1.2. Propiedades de los Materiales.....	57

4.1.3. Cargas.....	57
4.1.4. Modelado en ETABS	58
4.1.5. Modelado en OpenSeesPy.....	61
4.1.6. Sistema estructural de Muros Estructurales	66
4.2. Análisis Modal	68
4.2.1. Modos de Vibración de la Edificación.....	70
4.3. Determinación de Registros No Impulsivos	74
4.4. Selección de Sismos Filtrados por Escalado.....	75
4.4.1. Espectro de Diseño de la Norma E.030.....	76
4.4.2. Espectro de Dirección Máxima.....	78
4.4.3. Escalamiento de Sismos.....	85
4.5. Análisis Tiempo-Historia.....	89
4.5.1. Desplazamientos.....	90
4.5.2. Derivas de Piso.....	95
Capítulo V Discusión de Resultados.....	101
5.1. Hipótesis General.....	101
5.2. Hipótesis Específicas	102
5.2.1. Primera Hipótesis	102
5.2.2. Segunda Hipótesis	104
5.2.3. Tercera Hipótesis.....	106
Conclusiones	109
Recomendaciones o Sugerencias	112
Referencias Bibliográficas	114
Anexos.....	125

Índice de Tablas

Tabla 1. Variables, dimensiones e indicadores.....	14
Tabla 2. Clasificación del índice de impulsividad.....	29
Tabla 3. Resumen de masas por nivel obtenido en ETABS	60
Tabla 4. Inercia de masa rotacional de cada nivel	60
Tabla 5. Cortante en la base.....	68
Tabla 6. Modos de vibración con su periodo de vibración y frecuencia	69
Tabla 7. Periodo de vibración fundamental T_1	69
Tabla 8. Modos de vibración y masa participativa modal de la edificación.....	71
Tabla 9. Registro de sismos no impulsivos.....	75
Tabla 10. Ángulos que dan el registro de aceleración máxima	79
Tabla 11. Sismos filtrados según factor de escala	88
Tabla 12. Desplazamientos máximos registrados por niveles (mm) – sismo 30: Ica (2024_11_05)	92
Tabla 13. Desplazamientos máximos por nivel en los sismos 2, 4, 5, 6, 8 y 11 en OpenSeesPy.....	93
Tabla 14. Desplazamientos máximos por nivel en los sismos 12, 15, 16, 21 y 30 en OpenSeesPy.....	93
Tabla 15. Derivas de piso en OpenSeesPy y ETABS – sismo 30: Ica (2024_11_05).....	95
Tabla 16. Derivas de piso de los sismos 2, 4 y 5 en OpenSeesPy	97
Tabla 17. Derivas de piso de los sismos 6, 8, 11 y 12 en OpenSeesPy	98
Tabla 18. Derivas de piso de los sismos 15, 16, 21 y 30 en OpenSeesPy	99

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa sísmico del Perú (1960 -2024).....	23
Figura 2. <i>Forma de calcular la longitud de una curva</i>	27
Figura 3. Modos de Vibración.....	32
Figura 4. Valores del factor reducción de fuerzas sísmicas	33
Figura 5. Espectro promedio srss de 3 registros espectro compatibles	35
Figura 6. Límites para la distorsión del entrepiso	37
Figura 7. Representación gráfica de desplazamientos y derivas de entrepiso	39
figura 8. Clasificación de los sistemas estructurales en concreto	40
Figura 9. Ejemplo de un código en OpenSeesPy	41
Figura 10. Visualización en 3D de una estructura con columnas realizado en OpeenSeesPy	42
Figura 11. Plano en planta de la edificación multifamiliar a evaluar.....	54
Figura 12. Plano de elevación de la edificación multifamiliar a evaluar	55
Figura 13. Plano de estructuras de la edificación multifamiliar a evaluar	56
Figura 14. Visualización 3D del modelo estructural de la edificación	59
Figura 15. Librería utilizada para modelar vigas y columnas en OpensSeesPy	63
Figura 16. Librería utilizada para modelar muros estructurales en OpensSeesPy	64
Figura 17. Visualización 3D de la edificación multifamiliar a evaluar en OpenSeesPy	65
Figura 18. Corte en ETABS para hallar la cortante basal en X.	67
Figura 19. Corte en ETABS para hallar la cortante basal en Y.	67
Figura 20. Primer modo de vibración - dirección Y	72
Figura 21. Segundo modo de vibración - dirección X	72
Figura 22. Tercer modo de vibración - rotacional.....	73

Figura 23. Espectro de diseño sísmico de acuerdo a la norma E.030.....	77
Figura 24. Registros de dirección máxima – 1 al 10.....	81
Figura 25. Registros de dirección máxima – 11 al 20.....	82
Figura 26. Registros de dirección máxima – 21 al 30.....	83
Figura 27. Espectro de dirección máxima del sismo 30: Ica (2024_11_05).....	85
Figura 28. Rango de periodo para escalamiento.....	86
Figura 29. Espectro de respuesta promedio de los 11 sismos no impulsivos seleccionados.....	88
Figura 30. Desplazamiento del nodo 165 en OpenSeesPy y ETABS – sismo 30: Ica (2024_11_05).....	91
Figura 31. Desplazamientos máximos por niveles en OpenSeesPy y ETABS – sismo 30: Ica (2024_11_05).....	92
Figura 32. Desplazamientos máximos por nivel en los 11 sismos no impulsivos seleccionados en OpenSeesPy.....	94
Figura 33. Derivas de piso OpenSessPy y ETABS – sismo 30: Ica (2024_11_05).....	96
Figura 34. Derivas de piso de los sismos 11 sismos seleccionados en OpenSeesPy.....	100

Resumen

Esta investigación se llevó a cabo con el objetivo de realizar el análisis dinámico ante sismos no impulsivos de una edificación de concreto armado de seis niveles con sistema de muros mediante OpenSeesPy Tacna 2025. La investigación fue de tipo aplicada, con un diseño de nivel descriptivo. La muestra en estudio consistió en una edificación de concreto armado de seis niveles con sistema de muros estructurales, evaluada mediante registros de sismos no impulsivos seleccionados para analizar su comportamiento dinámico frente a este tipo de eventos. En el marco de esta investigación, se utilizó la biblioteca de OpenSeesPy para llevar a cabo los cálculos y el análisis correspondiente. Este proceso se realizó siguiendo las directrices establecidas en la Norma Técnica Peruana E.030 y el capítulo 16 de la ASCE-7-22. Los resultados obtenidos fueron comparados con los generados mediante el software ETABS, mostrando una alta concordancia tanto en el análisis modal, donde se determinaron los modos de vibración y sus respectivos períodos, como en el análisis tiempo-historia, que permitió obtener los desplazamientos y derivas de piso. Se concluye que OpenSeesPy es una herramienta precisa y confiable para realizar análisis dinámicos ante sismos no impulsivos en edificaciones de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros estructurales.

Palabras clave: OpenSeesPy, Análisis Dinámico, Muros Estructurales, Sismos no impulsivos.

Abstract

This research was carried out with the objective of “performing the dynamic analysis of a 6-story reinforced concrete building with a wall system using OpenSeesPy Tacna 2025”. The research was applied, with a descriptive level design. The sample under study consisted of a 6-story reinforced concrete building with a structural wall system, evaluated by means of non-impulsive earthquake records selected to analyze its dynamic behavior in the face of this type of event. Within the framework of this research, the OpenSeesPy library was used to carry out the calculations and the corresponding analysis. This process was carried out following the guidelines established in the Peruvian Technical Standard E.030 and Chapter 16 of ASCE-7-22. The results obtained were compared with those generated by the ETABS software, showing a high agreement both in the modal analysis, where the vibration modes and their respective periods were determined, and in the time-history analysis, which allowed obtaining the displacements and floor drifts. It is concluded that OpenSeesPy is an accurate and reliable tool for dynamic analysis of non-impulsive earthquakes in 6-story reinforced concrete buildings with a structural wall system.

Keywords: OpenSeesPy, Dynamic Analysis, Shear Wall Systems, Non-impulsive Earthquakes.

Introducción

Con el paso del tiempo, la ciencia ha avanzado de manera acelerada, lo que exige que los futuros profesionales nos adaptemos a estos progresos. Uno de los sectores que ha experimentado una mayor transformación gracias a la ciencia y la tecnología es la construcción, donde los ingenieros civiles recurren a diversos software para llevar a cabo distintos tipos de análisis, entre ellos el análisis dinámico. Este análisis, que tuvo como propósito evaluar la respuesta de una estructura ante la fuerza sísmica considerando cómo esta varía en el tiempo, resulta esencial para comprender la manera en que la edificación absorbe, distribuye y resiste dichas cargas durante un evento sísmico.

En los últimos años, dentro del campo de la ingeniería estructural, ha surgido una herramienta computacional avanzada llamada OpenSeesPy, una interfaz de Python de código abierto que ha demostrado ser altamente efectiva para llevar a cabo análisis estructurales en edificaciones de concreto armado sometidas a cargas sísmicas. Esta herramienta no solo ha simplificado la simulación de comportamientos estructurales complejos, sino que también ha abierto la posibilidad para que investigadores de diversas partes del mundo aporten a su mejora continua, promoviendo el avance del conocimiento y fortaleciendo las bases para futuras investigaciones.

Tras destacar la relevancia de esta investigación, se definió como objetivo general “realizar el análisis dinámico ante sismos no impulsivos de una edificación de concreto armado de seis niveles con sistema de muros mediante OpenSeesPy” y, para alcanzarlo, la presente investigación se estructuró en los capítulos que se detallan a continuación.

En el capítulo I, Planteamiento del Problema, se aborda la descripción y fundamentación del problema, seguido de su identificación y formulación, junto con la justificación y la relevancia de la investigación. Asimismo, se definen los objetivos, la hipótesis, las limitaciones y las características de la investigación, y finalmente, se describen las variables.

En el capítulo II, se desarrollan las bases teóricas de cada variable de la investigación, junto con la definición de los términos utilizados.

En el capítulo III, se establece la metodología de la investigación, se describe el tipo y diseño de la investigación, así como la población y la muestra.

En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos de la clasificación de los registros sísmicos no impulsivos, así como del análisis dinámico realizado en la edificación a base de muros estructurales.

En el capítulo V, se realiza la discusión de los resultados alcanzados.

Por último, se exponen las conclusiones, recomendaciones y las referencias bibliográficas utilizadas. Adicionalmente, en los anexos, se presentan los planos y el código implementado en OpenSeesPy.

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1. Descripción y Fundamentación del Problema

A nivel global, los sismos representan eventos impredecibles que pueden impactar de manera severa a las estructuras, debido a la variabilidad en su respuesta ante factores como las características del sitio, la intensidad, la duración y las aceleraciones máximas; por ello, en países con alto riesgo sísmico, se exige un mayor rigor en el diseño y la construcción de edificaciones, considerando la incorporación de dispositivos de control, como los disipadores sísmicos, como una estrategia para mejorar su desempeño (Chininín et al., 2022).

Sumado a ello, Frau y Saragoni (2012) destacan que los pulsos severos son característicos de registros en zonas cercanas a la falla; sin embargo, han identificado casos de terremotos de profundidad intermedia donde estos pulsos se han registrado lejos de la fuente sísmica, como ocurrió con el acelerograma de Bucarest, ubicado a 150 km del epicentro del terremoto de Vrancea, en Rumania, en 1977, el cual generó daños severos en edificios modernos de la ciudad.

Además, comprender las características del movimiento del suelo provocado por terremotos resulta crucial; debido al impacto directo que tiene en la integridad estructural y en la protección de la vida humana, especialmente en zonas cercanas a la fuente sismogénica, donde los movimientos del terreno suelen estar dominados por pulsos de ondas que concentran grandes niveles de energía. Estos pulsos pueden presentarse en forma simple o doble, con amplitudes significativas en una o ambas direcciones, dependiendo de factores como el tipo de asperidades,

su longitud, distribución y la complejidad de la ruptura sísmica, lo que agrava el daño potencial en las construcciones expuestas (Frau et al., 2016).

A nivel nacional, el Instituto Geofísico del Perú (2023) señala que en nuestro país se registran sismos diariamente, debido a que el Perú se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, en el extremo suroccidental de América del Sur, una región conocida por su alta actividad sísmica a nivel mundial. Por ello, el especialista destaca la importancia de estar preparados ante eventos sísmicos y de participar activamente en los simulacros.

Sumado a ello, la Universidad de Piura (2021) señala que el Perú no está preparado para enfrentar un terremoto de gran magnitud, debido a la economía informal, lo que genera construcciones sin regularizar, donde las personas edifican sin diseños profesionales en geotecnia, estructura y arquitectura.

En el Perú, la implementación de software como OpenSeesPy, una plataforma basada en Python diseñada para facilitar la simulación de elementos finitos y el análisis en ingeniería estructural, está empezando a ser adoptada por especialistas para el análisis sísmico. Según Méndez y Olivares (2024), este programa se utiliza para modelar y examinar grandes estructuras, analizando su respuesta ante sismos y resulta valioso en estudios de estructuras de concreto armado y acero, garantizando su resistencia a terremotos de gran magnitud.

Durante el workshop y la campaña "Juntos por la Prevención en Sismos," organizada por RIMAC en 2024, el Dr. Hernando Tavera, especialista en sismología y presidente ejecutivo del Instituto Geofísico del Perú (IGP), señaló que se prevé un sismo de 8,8 Mw, donde la interacción

entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana resulta en la acumulación de energía que podría desencadenar este fenómeno. Según información recolectada a través de GPS ubicados entre Lima y Antofagasta, las áreas con mayor riesgo comprenden Lima, Nazca-Chala, Moquegua-Tacna y el norte de Chile, regiones conocidas por su alta actividad sísmica.

Esto destaca la necesidad de realizar análisis dinámicos en el diseño de edificaciones, especialmente en un país sísmico como el Perú. Herramientas como OpenSeesPy permiten evaluar el comportamiento estructural ante sismos no impulsivos, optimizando diseños para que sean seguros, resistentes y eficientes en costo y tiempo.

De acuerdo con McKenna et al. (2010), OpenSees es una plataforma eficaz para modelar y analizar sistemas estructurales bajo cargas sísmicas, pero su implementación en contextos locales ha sido escasa. Esta falta de aplicación dificulta el estudio del comportamiento estructural ante sismos, especialmente en regiones con características sísmicas particulares como Tacna, donde es crucial optimizar el diseño y evaluación de edificaciones.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cómo realizar el análisis dinámico ante sismos no impulsivos de edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros mediante OpenSeesPy Tacna 2025?

1.2.2. Problemas Específicos

- a) ¿Cómo identificar sismos no impulsivos para aplicar en análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles?
- b) ¿Cómo implementar OpenSeesPy para realizar un análisis dinámico ante sismos no impulsivos en una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros?
- c) ¿Cómo es la respuesta dinámica ante sismos no impulsivos de una edificación de concreto armado de 6 niveles en Tacna?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar el análisis dinámico ante sismos no Impulsivos de una edificación de concreto armado de 6 Niveles con Sistema de Muros Mediante OpenSeesPy Tacna 2025.

1.3.2. Objetivos Específicos

- a) Identificar los sismos no impulsivos para su aplicación en el análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros.
- b) Implementar el OpenSeesPy para realizar el análisis dinámico ante sismos no Impulsivos de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros
- c) Determinar la respuesta dinámica ante sismos no impulsivos de una edificación de concreto armado de 6 niveles en Tacna.

1.4. Justificación e Importancia

Relevancia Tecnológica

A pesar de la alta actividad sísmica en Tacna, muchas edificaciones presentan diseños estructurales que no garantizan una seguridad adecuada. OpenSeesPy permite realizar análisis dinámicos lineales frente a diferentes tipos de movimientos sísmicos, contribuyendo al diseño eficiente y a la optimización de la resistencia en estructuras de concreto armado mediante tecnología de vanguardia. Esta investigación desarrollará un modelo dinámico utilizando OpenSeesPy, un software que permite simular el comportamiento estructural ante sismos, proporcionando un estándar técnico para futuros proyectos en zonas con alta actividad sísmica y fomentando la adopción de técnicas avanzadas.

Relevancia Social

Muchas edificaciones actuales no cumplen con un diseño adecuado para resistir sismos severos, lo que aumenta la probabilidad de colapso estructural; por ello, la implementación de edificaciones con sistemas de muros estructurales en Tacna contribuirá a garantizar construcciones más seguras, preparadas frente a futuros eventos sísmicos y capaces de proteger vidas humanas. La presente investigación servirá como referencia técnica para arquitectos e ingenieros, mostrando los beneficios de utilizar sistemas de muros estructurales y ayudando a minimizar las pérdidas humanas y materiales en eventos sísmicos futuros.

Relevancia Económica

El desarrollo de diseños estructurales optimizados con enfoque sismorresistente representa una inversión económica eficiente, ya que disminuyen significativamente los costos asociados a

reparaciones y reconstrucciones posteriores a un sismo. Esta investigación, mediante el uso del OpenSeesPy, permitirá identificar puntos críticos en el diseño estructural, reduciendo las probabilidades de daños significativos y, por ende, disminuyendo costos para el propietario.

Relevancia Sísmica

Localizado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, Perú experimenta alta actividad sísmica como consecuencia de la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana. En Tacna, el prolongado período sin sismos evidencia la importancia de garantizar que las edificaciones cumplan con las normativas actuales y se sometan a un análisis dinámico preciso. Esto es esencial para garantizar estructuras más resistentes y seguras frente a posibles eventos sísmicos. Esta investigación abordará en profundidad el desempeño de edificaciones de concreto armado ante sismos no impulsivos, promoviendo diseños más seguros y eficaces, además de reforzar la importancia de adoptar normas sismorresistentes y fomentar la actualización de prácticas constructivas basadas en resultados de simulaciones avanzadas como las realizadas con OpenSeesPy.

Importancia de la Investigación

Esta investigación es crucial, pues busca evaluar cómo responde dinámicamente una estructura de concreto armado de seis niveles, equipada con un sistema de muros, ante movimientos sísmicos no impulsivos propios de la región de Tacna, tomando en cuenta también registros de otras zonas del Perú para robustecer el análisis. Esta aproximación amplia permite obtener resultados más representativos y confiables ante la diversidad sísmica del país. Actualmente, muchas estructuras poseen diseños deficientes que no aseguran un desempeño adecuado durante movimientos sísmicos prolongados, aumentando el riesgo de colapso, así como

pérdidas humanas y económicas. A través del uso de OpenSeesPy, esta investigación permitirá evaluar y mejorar el diseño estructural, promoviendo edificaciones más seguras.

1.5. Limitaciones y Alcances

Limitaciones

En esta investigación, las propiedades mecánicas del acero y del concreto, como la resistencia del concreto a compresión (f'_c), el módulo de elasticidad (E), entre otras, no serán determinadas mediante ensayos experimentales. En su lugar, se asumirán valores basados en literatura técnica, investigaciones y normativa vigente, lo cual puede introducir aproximaciones en los resultados del análisis dinámico.

Con relación al tipo de suelo, no se realizarán ensayos de mecánica de suelos específicos en el área de estudio. Por consiguiente, las propiedades del suelo se asumirán basándose en datos provenientes de investigaciones previas realizadas en áreas cercanas, lo cual podría generar ciertas discrepancias en la representación precisa de la interacción suelo-estructura.

Asimismo, en cuanto a los registros sísmicos empleados, la selección no se limita exclusivamente a eventos registrados en Tacna debido a la limitada disponibilidad y calidad de datos sísmicos en la región. Por esta razón, se recurrirá a registros sísmicos provenientes de otras regiones con características similares, lo cual podría afectar parcialmente la representatividad local de los resultados alcanzados.

Alcances

Esta investigación se centra principalmente en el alcance de desarrollar un análisis dinámico detallado de una edificación de seis niveles de concreto armado, con un sistema estructural basado en muros estructurales, sometida a sismos no impulsivos mediante la implementación del software OpenSeesPy. Los resultados generados del análisis permitirán evaluar el desempeño sísmico de la estructura y validar la efectividad del software utilizado en este tipo de análisis.

Además, esta investigación se enfoca en identificar y caracterizar los sismos no impulsivos del Perú, con el fin de seleccionar los registros sísmicos adecuados para el análisis dinámico. Los alcances de esta investigación contribuyen al progreso del conocimiento en el ámbito de la ingeniería sísmica y ofrecen una herramienta crucial para el diseño sismorresistente de estructuras.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

Mediante un adecuado análisis dinámico en OpenSeesPy, se podrá predecir con precisión la respuesta ante sismos no impulsivos de edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros en Tacna 2025.

1.6.2. Hipótesis Específicas

- a) Mediante el cálculo del índice de impulsividad, se identificarán los sismos no impulsivos, permitiendo así realizar un análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros.
- b) Mediante el uso del lenguaje de programación Python, se podrá implementar un código en OpenSeesPy para realizar un análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros ante sismos no impulsivos.
- c) La respuesta dinámica en términos de desplazamientos y derivas, cumple con los límites establecidos en el reglamento vigente de la Norma Peruana E.030, para una edificación de concreto armado de 6 niveles en Tacna.

1.7. Sistema de Variables, Dimensiones e Indicadores

Las variables de la presente investigación son:

- a. Variable independiente: Sismos no impulsivos

Dimensiones:

- Parámetros sísmicos
- Impulsividad

- b. Variable dependiente: Análisis dinámico

Dimensiones:

- Propiedades dinámicas del edificio
- Respuesta dinámica

1.7.1. Variable Independiente

Variable independiente: Sismos no impulsivos

En contraste con los sismos impulsivos, Panella et al. (2020) describen a los sismos no impulsivos como aquellos que se caracterizan por la ausencia de pulsos intensos de velocidad y desplazamiento, asociados a movimientos cercanos a fallas, presentando comportamientos más uniformes y similares a los movimientos típicos de campo lejano. Asimismo, es preciso mencionar que para dicha variable se considerarán las dimensiones de parámetros sísmicos e impulsividad.

A continuación, se precisan los indicadores que constituyen dichas dimensiones:

- Parámetros sísmicos: Magnitud, Intensidad, PGV
- Impulsividad: Índice de impulsividad, Longitud del registro de velocidad

1.7.2. Variable Dependiente

Variable dependiente: Análisis dinámico

El análisis dinámico estudia la respuesta de las estructuras ante cargas que varían a lo largo del tiempo (CYPE Perú, 2023).

Asimismo, es preciso mencionar que para dicha variable se considerarán las dimensiones de las propiedades dinámicas y la respuesta dinámica.

Sobre dichas dimensiones a continuación, se precisa los indicadores que las constituyen:

- Propiedades dinámicas: Modos de vibración y períodos de vibración
- Respuesta dinámica: Desplazamiento y derivas

Las variables, dimensiones e indicadores de la presente investigación se detallan en la Tabla 1, que se presenta a continuación.

Tabla 1*Variables, dimensiones e indicadores*

Variables	Definición	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Sismos no impulsivos	Se caracterizan por la ausencia de pulsos intensos de velocidad y desplazamiento asociados a movimientos cercanos a fallas.	Se miden mediante la impulsividad, el cual se halla mediante la fórmula de índice de impulsividad; y los parámetros sísmicos, siendo el valor del PGV el más relevante.	- Parámetros sísmicos - Impulsividad	- Magnitud - PGV - Índice de impulsividad
Análisis dinámico	Estudia la respuesta de las estructuras ante cargas que varían a lo largo del tiempo	Se mide mediante el análisis de las propiedades dinámicas de la estructura y su respuesta ante excitaciones sísmicas, evaluando las frecuencias naturales, desplazamientos y derivas, que reflejan las deformaciones y el comportamiento estructural frente al sismo.	- Propiedades dinámicas - Respuesta dinámica	- Modos de vibración - Periodos de vibración - Desplazamiento - Derivas

Nota. La tabla muestra las definiciones, dimensiones e indicadores de las variables relacionadas con los sismos no impulsivos y el análisis dinámico.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes

A partir de la revisión documental realizada, se han detallado los antecedentes a nivel internacional, nacional y local que respaldan el presente trabajo.

Antecedentes Internacionales

- a) Para comenzar, Li y Chen (2023), en su artículo de investigación titulado “An improved model order reduction method for dynamic analysis of large-scale structures with local nonlinearities”, publicado en ScienceDirect, tuvieron como objetivo plantear un método optimizado para la reducción del orden del modelo, enfocado en el análisis dinámico de estructuras de gran escala con no linealidades locales en sus materiales. La metodología aplicada se basa en la integración de un método de preconditionamiento simplificado y un enfoque de iteración de Newton, optimizando así la solución del sistema reducido. Según los resultados de la investigación numérica, el enfoque renovado de iteración de Newton incrementa la eficiencia en el análisis dinámico de estructuras a gran escala con no linealidades locales. Asimismo, el estudio concluye que la reconstrucción del sistema reducido, basada en la deformación generalizada de los elementos, genera condiciones óptimas para implementar un preconditionamiento simplificado. En definitiva, la investigación propone un enfoque innovador para este

tipo de análisis, integrando técnicas de reducción de sistemas y soluciones iterativas avanzadas.

- b) Por su parte, Mendoza (2022), en su investigación titulada *Influencia de la rigidez post-elástica en la distribución de energía plástica entre plantas en estructuras con disipadores histeréticos*, realizada para obtener el título de Máster en Ingeniería Sísmica de Dinámica de Suelos y Estructuras en la Universidad Politécnica de Madrid, tuvo como objetivo analizar cómo la rigidez post-elástica afecta la distribución de energía plástica entre los niveles de los prototipos N3, N6 y N9, los cuales incorporan disipadores histeréticos. La metodología se basó en el uso de modelos prototipo de 3, 6 y 9 plantas de estructuras porticadas, sometidas a dos grupos de terremotos (impulsivos y no impulsivos), con el fin de determinar la distribución de energía disipada total entre plantas, tanto por la estructura principal como por los disipadores. Los resultados muestran que la fórmula de distribución de energía de deformación plástica propuesta por Akiyama proporciona estimaciones muy cercanas a los porcentajes observados en los sismos analizados. El estudio concluye que la rigidez postelástica afecta inversamente la distribución de energía plástica entre las plantas de estructuras con disipadores histeréticos en los escenarios 2 y 3 analizados, abarcando tanto terremotos impulsivos como no impulsivos.
- c) Seguidamente, Riofrio (2024), en su investigación titulada *Análisis dinámico lineal en una estructura aporticada en OpenSeesPy*, realizada para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil en la Universidad Técnica Particular de Loja, tuvo como objetivo analizar el desempeño sísmico de una estructura aporticada frente a distintos escenarios

de carga y contrastar dichos resultados con los obtenidos mediante un software comercial. La metodología contempló el procesamiento y análisis de datos tanto en el software comercial como en OpenSeesPy. Los resultados evidenciaron que los obtenidos con OpenSeesPy y los del software comercial presentan una alta similitud, con diferencias mínimas que pueden considerarse despreciables para los fines del estudio. La investigación concluye que el software de código abierto constituye una alternativa confiable y precisa para realizar el análisis dinámico de estructuras aporticadas. Además, el estudio revela que OpenSeesPy permite llevar a cabo análisis más avanzados gracias a su integración con Python, ya que ofrece la posibilidad de utilizar comandos personalizados, una funcionalidad que suele estar limitada en los programas comerciales.

Antecedentes Nacionales

- a) Para Méndez y Olivares (2024), en su investigación titulada *Análisis dinámico de una estructura de concreto armado de 4 niveles de sistema aporticado con la aplicación del software OpenSees*", elaborada para optar por el grado profesional de Ingeniero Civil en la Universidad César Vallejo, el propósito fue realizar un análisis dinámico de una estructura de concreto armado de 4 niveles con sistema aporticado mediante el software OpenSees. Este estudio, de enfoque cuantitativo, aplicado y con diseño no experimental, demostró que esta herramienta digital permite simular el comportamiento estructural frente a fuerzas externas, proporcionando resultados precisos y confiables. Los hallazgos revelaron que los resultados obtenidos con OpenSees presentan diferencias mínimas en desplazamientos, fuerzas cortantes y distorsiones al

compararlos con los del software ETABS, validando su precisión. La investigación destaca la relevancia de OpenSees para los ingenieros, ya que facilita el modelado de diversos tipos de estructuras y la ejecución de múltiples análisis, garantizando que los diseños cumplan con las normativas del Reglamento Nacional de Edificaciones y promoviendo tanto la seguridad como la eficiencia estructural.

- b) Por su parte, Cohaila y Gómez (2023), en su investigación titulada *Implementación de un asistente virtual estructural para automatizar el análisis sísmico de un edificio multifamiliar utilizando inteligencia artificial*, realizada para obtener el título profesional de Ingeniero Civil en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, propusieron desarrollar un sistema de análisis sísmico automatizado para edificaciones mediante un Asistente Virtual Estructural creado en entornos de programación, evaluando además el tiempo requerido para diseñar una estructura multifamiliar. El estudio, de enfoque explicativo y diseño experimental, demostró que mediante Python y OpenAI se logró automatizar el análisis sísmico con un asistente virtual estructural funcional, accesible incluso para usuarios con conocimientos básicos en programación. Los resultados mostraron que esta solución reduce en un 70 % el tiempo de análisis requerido por un especialista, evidenciando que el asistente virtual representa una alternativa eficaz para realizar análisis sísmicos. Asimismo, la investigación destaca el potencial de la inteligencia artificial como herramienta clave para optimizar la automatización de otros procesos estructurales.
- c) Seguidamente, Inga (2020), en su investigación *Análisis de la Vulnerabilidad Sísmica frente a los Sismos ocurridos en Perú – Yungay 1970 y Perú – Ica 2007*, de dos edificios

de 06 pisos en Urbanización San Isidro, Trujillo", realizada para obtener el título profesional de Ingeniero Civil en la Universidad Privada del Norte, tuvo como objetivo evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de más de cinco pisos en la Urbanización San Isidro (Trujillo), construidas con sistema aporticado, verificando su cumplimiento con el RNE y su desempeño ante sismos históricos como los de Ica (2007) y Yungay (1970). Este estudio de tipo aplicado con diseño no experimental empleó el software ETABS 2019 para el análisis estructural, en cumplimiento con el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). Los resultados revelaron que ambas edificaciones presentan alta vulnerabilidad ante estos eventos sísmicos, determinada mediante visitas técnicas y modelamiento estructural basado en los planos originales. El análisis dinámico y tiempo-historia demostró que las estructuras exceden los límites de deriva y desplazamiento permitidos por la Norma RNE E.030. Como conclusión, la investigación recomienda a constructores e ingenieros considerar análisis detallados de sismos históricos en el diseño de edificaciones de gran magnitud, con el fin de garantizar estructuras seguras y minimizar riesgos futuros.

Antecedentes Locales

- a) Para Yanqui y Panniagua (2020), en su investigación titulada *Evaluación Estructural Sísmico del Pabellón "C" del C.E.I. 225 Niños Héroes, Tacna 2020*, realizada para obtener el título profesional de Ingeniero Civil en la Universidad Privada de Tacna, analizaron el desempeño sísmico de dicho pabellón, el cual fue el más afectado estructuralmente durante el sismo de 2001. Este estudio, de tipo aplicado, demostró que, mediante herramientas digitales, es posible simular con precisión el comportamiento

estructural frente a fuerzas externas. Los resultados revelaron que el Pabellón "C" presenta un desempeño sísmico insuficiente según los estándares de la Norma E.030, principalmente debido a materiales y elementos estructurales que no cumplen con los parámetros requeridos. La investigación resalta la importancia crítica de garantizar la seguridad estructural en Tacna, región caracterizada por su alta actividad sísmica.

- b) Por su parte, Mendoza et al. (2020), en su artículo de investigación titulado "Frecuencias y Periodos predominantes de sismos registrados en la ciudad de Tacna, mediante Análisis y Espectro de Fourier" - publicado por la Universidad Privada de Tacna - tuvo como objetivo identificar las frecuencias y períodos predominantes de los sismos registrados en Tacna mediante análisis de Fourier, transformando acelerogramas del dominio temporal al frecuencial para generar espectros e identificar valores pico. La metodología, de enfoque deductivo con orientación básica y carácter cualitativo, empleó: (1) recolección retrolectiva de datos, (2) selección de acelerogramas, (3) aplicación de herramientas matemáticas, y (4) procesamiento digital de señales. Los resultados demostraron que los sismos del sur de Perú presentan frecuencias predominantemente altas (1,05-11,43 Hz), con excepción de un evento de 0,43 Hz. El estudio concluye que: (i) la mayoría de los sismos afectaron principalmente edificaciones bajas (exceptuando los eventos del 23/06/2001 y 07/07/2001); y (ii) los periodos sísmicos identificados fueron mayormente cortos. Esta investigación proporciona valiosos insumos para el diseño sísmico en la región tacneña.
- c) Seguidamente, Medina y Ayma (2023), en su investigación titulada *Evaluación del Desempeño Sísmico de una Edificación de Salud de Primer Nivel en la ciudad de Tacna* (realizada para obtener el título profesional de Ingeniero Civil en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann), analizaron el comportamiento sísmico del primer

nivel del Centro de Salud Metropolitano mediante modelos de análisis no lineales bajo diversos niveles de intensidad sísmica. Este estudio aplicativo y descriptivo demostró que, si bien el análisis no lineal mostró un buen comportamiento sísmico general de la edificación, destacándose el desempeño de los muros del primer nivel, los muros PY3 y PY4 en la dirección Y-Y presentaron riesgo de precolapso durante sismos fuertes. Asimismo, se determinó que la edificación alcanza un desempeño adecuado tanto en elementos estructurales como no estructurales para un sismo de diseño con periodo de retorno de 475 años. La investigación subraya la importancia de evaluar sistemáticamente edificaciones (nuevas y existentes) para identificar vulnerabilidades sísmicas, particularmente en infraestructuras críticas como centros de salud, donde el análisis no lineal resulta fundamental para predecir el comportamiento real ante eventos extremos.

2.2. Bases Teóricas

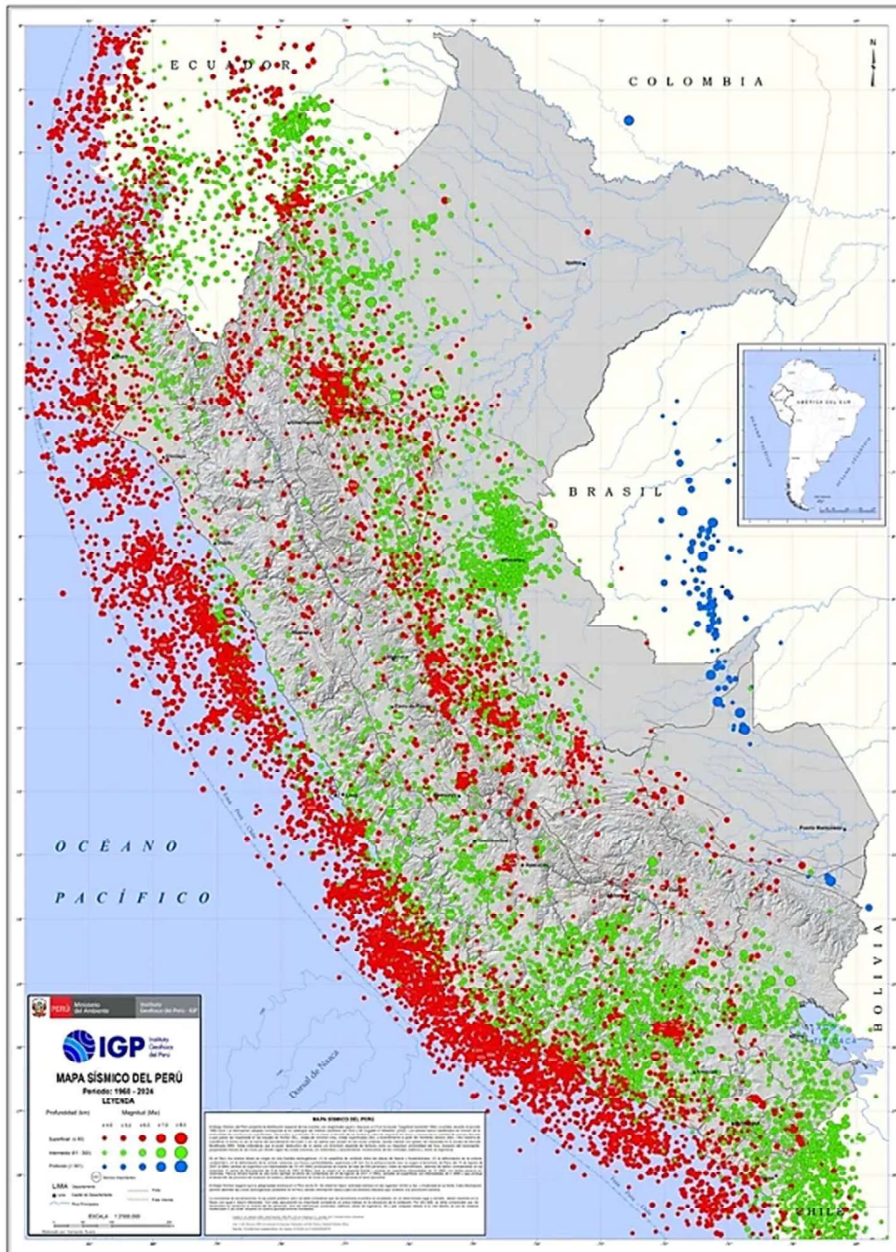
2.2.1. Sismicidad en Perú

El territorio peruano está expuesto a una alta amenaza sísmica debido a su localización en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una zona de intensa actividad tectónica donde la placa de Nazca se introduce por debajo de la placa Sudamericana. Esta interacción genera una notable frecuencia de movimientos sísmicos y procesos volcánicos. Con base a los años de observación, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha establecido una clasificación de los sismos según su profundidad en tres grupos: poco profundos, intermedios y profundos.

Como se aprecia en el Mapa de Sismicidad del Perú (figura 1), que reúne información sísmica entre los años 1960 y 2024, los sismos superficiales (en rojo) predominan en la franja costera y en la sierra, y suelen ser los más destructivos. Los de foco intermedio (en verde) se localizan principalmente en el sur del país y en áreas como Pucallpa, mientras que los profundos (en azul) se presentan en la región amazónica, cerca de las fronteras con Brasil y Bolivia. Tal como advierte el Dr. Hernando Tavera: “no existe una sola ciudad en el país que no haya sido afectada por un sismo a lo largo de su historia”, lo que resalta la importancia de adoptar medidas de prevención y diseño sismorresistente en las zonas vulnerables (Sociedad Geológica del Perú, 2024).

Figura 1

Mapa sísmico del Perú (1960 -2024)



Nota. La figura muestra el Mapa Sísmico del Perú (1960–2024), el cual representa la distribución geográfica de los sismos registrados en el país durante ese período, clasificados según su profundidad (superficial, intermedia y profunda). Tomado de Instituto Geofísico del Perú (2024), *Mapas sísmicos*, <https://ultimosismo.igp.gob.pe/mapas-sismicos>

A lo largo de la historia sísmica del Perú, diversos terremotos de gran magnitud han tenido un impacto profundo en las personas y las infraestructuras. Algunos de los más significativos fueron el terremoto de Áncash en 1970, el del sur del Perú en 2001 y el de Ica en 2007, cuyos datos respectivos se presentan en la tabla 9. Estos eventos destacan la necesidad de una planificación adecuada para el diseño de edificaciones sismorresistentes que permita reducir los efectos devastadores de los sismos y garantizar la seguridad estructural de viviendas y edificios en las zonas más vulnerables a estos desastres.

Terremoto de Áncash de 1970. El 31 de mayo de 1970, un terremoto de magnitud 7,0 Mw afectó gravemente la costa y sierra del departamento de Áncash, así como otras regiones del norte y centro del país. Este evento desencadenó un alud generado por el desprendimiento de una parte del nevado Huascarán, que arrasó con la ciudad de Yungay y provocó la muerte de más de 70 000 personas. Aunque no fue el sismo de mayor magnitud en la historia del Perú, es considerado el más trágico por la cantidad de víctimas mortales. Como consecuencia, en 1972, se creó el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) para fortalecer las acciones ante emergencias, y desde entonces cada 31 de mayo se realiza un simulacro nacional como medida de prevención (El Peruano, 2024).

Terremoto del Sur del Perú de 2001. El 23 de junio de 2001, un fuerte sismo de magnitud 8,4 Mw sacudió el sur del Perú, con epicentro cerca de Ocoña, en la provincia de Camaná. El evento causó serios daños en Arequipa, Moquegua y Tacna, y fue percibido también en regiones vecinas de Chile y Bolivia. Su propagación superficial generó un notable ondulamiento del terreno, y su compleja ruptura fue registrada por estaciones sísmicas nacionales e internacionales. Además,

el evento generó 134 réplicas que prolongaron el estado de emergencia en la zona afectada (Instituto Geofísico del Perú, 2001).

Este sismo dejó 83 fallecidos, incluidos 26 por un tsunami que también causó la desaparición de 70 personas. Se estimaron 320 000 personas afectadas, con cerca de 17 500 viviendas colapsadas y más de 35 000 dañadas en regiones como Arequipa, Camaná, Moquegua y Tacna, debido a la pobreza estructural y precariedad de sus construcciones. Además, 237 centros de salud fueron dañados por su antigüedad y por estar contruidos sin conocimientos de ingeniería sismorresistente actuales, lo que motivó la declaración de emergencia del sector salud por 30 días (Ministerio de Salud, 2001).

Terremoto de Pisco de 2007. El 15 de agosto de 2007, un terremoto de magnitud 8,0 Mw afectó fuertemente la zona centro-sur del Perú durante más de tres minutos. El epicentro se ubicó frente a las costas de Pisco, a unos 40 km al oeste de la ciudad y aproximadamente 150 km al suroeste de Lima, con una profundidad de 39 km. De acuerdo con los reportes del INDECI, el sismo dejó alrededor de 600 fallecidos, 1300 heridos y más de 450 000 personas damnificadas, además de causar la destrucción de cerca de 48 000 viviendas. Las provincias más afectadas fueron Pisco, Ica, Chincha y Cañete, donde el colapso de viviendas mal construidas y de infraestructura esencial (centros educativos, redes de agua y servicios de salud) agravó las consecuencias del desastre. Asimismo, el Dr. Hernando Tavera, presidente ejecutivo del IGP, señaló que la magnitud del daño se debió principalmente a la deficiente calidad constructiva de las edificaciones en la zona (Instituto Geofísico del Perú, 2020).

2.2.2. *Sismos no Impulsivos*

2.2.2.1. Definición. En contraste con los sismos impulsivos, los sismos no impulsivos, según Paz (2012), se caracterizan por la ausencia de pulsos de elevada amplitud y breve duración en su registro acelerográfico, presentando una liberación de energía más distribuida a lo largo del tiempo. Estos eventos sísmicos carecen de impulsos dominantes, los cuales suelen generar mayores demandas en las estructuras durante un sismo.

Además, de acuerdo con López et al. (2016), un sismo no impulsivo es un movimiento de la corteza terrestre generado por fuerzas geológicas provenientes del interior del planeta, cuya liberación de energía ocurre de manera más uniforme y sin presentar pulsos dominantes de alta amplitud.

2.2.2.2. Determinación de Registros No Impulsivos. Panella et al. (2013) proponen una metodología eficiente y sencilla para identificar si un registro sísmico presenta carácter impulsivo o no impulsivo. Este método, que es original y de bajo costo computacional, se fundamenta en una variable que relaciona el valor máximo de la velocidad pico con la longitud de la historia de tiempo de velocidades del suelo.

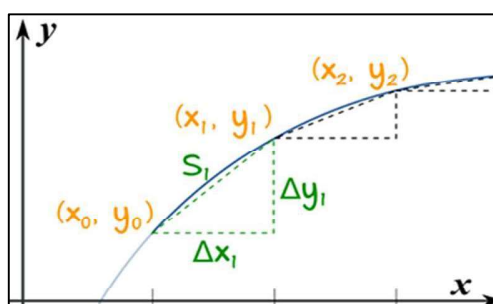
Longitud de una curva. Según MathsisFun (s. f.), la distancia recorrida a lo largo de una curva puede aproximarse dividiendo el arco en pequeñas secciones y empleando la fórmula de la distancia entre dos puntos para cada segmento. Este método consiste en representar la curva como una serie de triángulos rectángulos, donde las hipotenusas de estos triángulos se concatenan para cubrir el arco. Las bases de esos triángulos son Δx , de modo que para cada uno habrá un cateto Δy

asociado como se muestra en la Figura 2. Cada hipotenusa se calcula $\Delta S = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$ y la longitud aproximada del arco, S, se obtiene sumando todas las hipotenusas:

$$S = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$$

Figura 2

Forma de calcular la longitud de una curva



Nota. Este procedimiento permite determinar la longitud de una curva de forma eficiente, precisa y sencilla.

Longitud desarrollada de la historia de tiempo de velocidades. Con base en el criterio para hallar la longitud de una curva, se establece a la longitud desarrollada del registro de velocidades como:

$$Ld_v = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta t_i^2 + \Delta v_i^2}$$

Donde:

Δt_i representa el incremento de tiempo entre dos instantes consecutivos del registro en $(t_{i+1} - t_i)$ segundos

Δv_i corresponde a los aumentos de velocidades entre $(t_{i+1} - t_i)$ en cm/s y n se refiere al número total de muestras del registro.

El parámetro Ld_v describe la longitud total que resultaría al trazar el registro de velocidades y medir su desarrollo completo.

Índice de Impulsividad. Según la propuesta metodológica planteada por Panella et al. (2013) para clasificar los sismos como impulsivos o no impulsivos, dicha clasificación depende del índice de impulsividad, el cual se muestra en la tabla 2 y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$Ip = \frac{Ld_v}{PGV}$$

Donde:

El valor PGV, que representa el máximo valor absoluto que se tiene del registro de velocidad en cm/s, permite capturar de forma simple y efectiva el carácter impulsivo que puede identificarse visualmente en un registro sísmico.

Tabla 2*Clasificación del índice de impulsividad*

Ip	Clasificación
$I_p < 12$	Fuertemente Impulsivo
$12 < I_p < 20$	Impulsivo
$20 < I_p < 30$	Moderadamente Impulsivo
$I_p > 30$	No impulsivo

Nota. Se observa cómo se determinan los registros sísmicos impulsivos y no impulsivos para aplicación en ingeniería estructural, de acuerdo a Panella et al. (2013)

2.2.2.3. Principales Parámetros que Describen un Sismo. Mena (2002) señala que existe una considerable incertidumbre en la evaluación del movimiento del terreno generado por un terremoto en un sitio específico, lo que a menudo afecta la estimación de la peligrosidad sísmica del lugar. Además, los terremotos presentan una gran variabilidad en términos de tamaño y liberación de energía, abarcando desde pequeñas fracturas hasta deslizamientos significativos que pueden extenderse a lo largo de varios kilómetros en una falla.

Por esta razón, Somerville (2000) menciona que el tamaño de un terremoto puede describirse a través de la intensidad, la magnitud o el momento sísmico, siendo este último posiblemente la forma más precisa de caracterización, ya que se vincula directamente con el producto entre el desplazamiento promedio y el área de ruptura de la falla.

El Instituto Nacional de Prevención Sísmica (s. f.) señala que la magnitud de un sismo es un valor instrumental utilizado para cuantificar la energía liberada durante un evento sísmico. A

diferencia de la intensidad, que evalúa los efectos y daños en un lugar específico, la magnitud proporciona un valor único obtenido a partir del análisis de las características registradas en los sismogramas. Una de las escalas más conocidas para medirla es la escala de Richter, desarrollada en 1935 por Charles F. Richter del Instituto Tecnológico de California. Esta escala tiene un carácter logarítmico con base 10, lo que implica que cada aumento de una unidad representa un incremento de diez veces y en la amplitud de las ondas sísmicas registradas y aproximadamente 32 veces más energía liberada.

Por otro lado, el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (2017) indica que la intensidad sísmica es una medida cualitativa que evalúa los efectos del sismo sobre las personas, las edificaciones, la infraestructura y el entorno natural. A diferencia de la magnitud, la intensidad puede variar en función del lugar donde se registre, siendo mayor en áreas más cercanas al epicentro. Además, la escala más utilizada para medir la intensidad sísmica es la Escala de Mercalli Modificada, que está compuesta por doce grados representados con números romanos.

Según Álvarez (2024), la magnitud de un sismo también puede medirse mediante la magnitud de momento, ya que esta se relaciona directamente con las propiedades físicas de la falla, lo que la hace altamente efectiva para describir grandes terremotos cuya energía supera los límites de otras escalas. Además, se determina en función de tres factores principales: el área desplazada de la falla durante el terremoto, la distancia recorrida por la falla y la resistencia del material ante el desplazamiento.

El Instituto de Resiliencia (2014) indica que, durante un terremoto, el suelo experimenta movimientos y aceleraciones debido a la llegada de ondas sísmicas con diferentes velocidades. El tamaño de un sismo también puede describirse en términos de la aceleración del suelo. En el diseño de edificaciones en zonas sísmicas, los ingenieros deben considerar la aceleración máxima que podría alcanzar el suelo, ya que muchas fallas estructurales en las edificaciones son causadas por estas aceleraciones.

2.2.3. *Análisis Dinámico*

2.2.3.1. Análisis Dinámico Modal Espectral. El análisis dinámico modal espectral es un método avanzado que permite evaluar cómo responden las estructuras a cargas dinámicas, siendo especialmente relevante para construcciones sometidas a sismos.

Para Cohaila y Gomez (2023), el análisis dinámico de un edificio consiste en evaluar las vibraciones que ocurren en una estructura alrededor de su punto de equilibrio.

Del mismo modo, este análisis considera no solo las fuerzas actuantes en cada nivel, sino también las variaciones en aceleración y velocidad provocadas por las deformaciones que la estructura experimenta durante un sismo (Mendez y Diaz, 2019).

2.2.3.1.1. Modos de Vibración. Según Riofrío (2024), los modos de vibración son fundamentales para analizar cómo una estructura reacciona a distintas frecuencias, especialmente frente a cargas sísmicas, ya que representan los movimientos relativos de sus partes ante dichas fuerzas. Cada modo de vibración, está asociado a una frecuencia natural y se caracteriza por un esquema particular de movimientos dentro de la estructura (ver figura 3). El análisis de los modos de vibración permite identificar las posibles deformaciones y tensiones en los elementos estructurales, así como optimizar el diseño para mejorar la resistencia y la seguridad de la edificación frente a sismos.

Figura 3

Modos de vibración



Nota. Se muestran tres modos de vibración de una estructura. Tomado de Ingeniería sísmica y construcción civil (2013).

2.2.3.1.2. Aceleración Espectral. Se presenta el espectro de pseudo aceleraciones, el cual es un parámetro fundamental para determinar el espectro de sismo según la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente (Perú). Se determina mediante la siguiente ecuación:

Fórmula (Norma E.030)

$$S_a = \frac{Z * U * C * S}{R} * g$$

Donde:

Sa: Aceleración espectral

Z: Factor de zona

U: Factor de uso

C: Factor de amplificación sísmica

S: Factor de suelo

R: Coeficiente de reducción de fuerza sísmica

g: Aceleración de la gravedad

El valor del coeficiente R, será obtenido de acuerdo al sistema estructural, como se observa en la figura 4.

Figura 4

Valores del factor reducción de fuerzas sísmicas

SISTEMAS ESTRUCTURALES	
Sistema Estructural	Coficiente Básico de Reducción R_0 (*)
Acero:	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	7
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	6
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	8
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	6
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
Concreto Armado:	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería Armada o Confinada.	3
Madera (Por esfuerzos admisibles)	7

Nota. Se observa los valores del factor de reducción de fuerzas sísmicas de acuerdo al sistema estructural. Tomado de Norma Técnica E.030: Diseño sismorresistente (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018). Recuperado de

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686410/E.030%20Dise%C3%B1o%20Sismo%20Resistente.pdf>

2.2.3.2. Análisis Dinámico Tiempo-Historia. El análisis dinámico del tipo Tiempo-Historia se enfoca en determinar cómo responde una estructura durante intervalos de tiempo definidos, empleando como referencia acelerogramas reales o simulados.

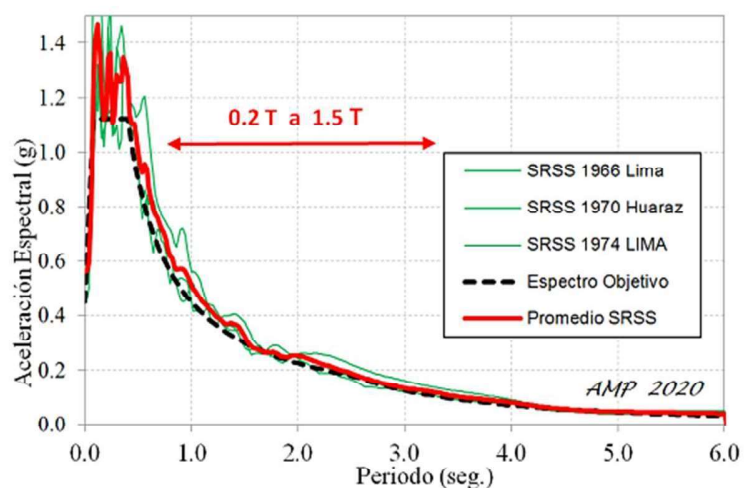
Según Núñez (2017), el análisis tiempo-historia lineal permite estimar la resistencia y duración en estado de fluencia de una estructura, aunque no considera los cambios en sus propiedades a lo largo del tiempo, lo que puede llevar a resultados imprecisos. Por otro lado, el análisis tiempo-historia no lineal incorpora las características inelásticas de los materiales, permitiendo una evaluación detallada y progresiva de la respuesta estructural, lo que conduce a resultados más precisos en la simulación de un evento sísmico.

Por su parte, la Norma Técnica E.030 (2018) establece que el análisis dinámico del tipo tiempo-historia tiene un propósito principalmente de verificación estructural, más que de diseño.

2.2.3.2.1. Registro de Aceleraciones. Según la Norma Técnica E.030 (2018), se requiere el uso de al menos tres conjuntos de acelerogramas para llevar a cabo el análisis (figura 5), con dos componentes ortogonales, seleccionados y escalados en función de eventos sísmicos consistentes con el sismo máximo esperado. En caso de no contar con registros reales, se podrán emplear acelerogramas simulados. Posteriormente, se calcularán espectros de pseudoaceleraciones mediante el método SRSS (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados), considerando un 5 % de amortiguamiento. Las componentes se escalarán uniformemente de modo que el promedio espectral, en el rango de $0,2 T$ a $1,5 T$ (donde T es el período fundamental de la estructura), sea igual al valor determinado en el espectro de diseño correspondiente, considerando un factor de reducción de respuesta $R = 1$.

Figura 5

Espectro promedio SRSS de 3 registros espectro compatibles



Nota. Se observan el espectro promedio SRSS (línea roja) de 3 registros sísmicos compatibles, ajustados al espectro de diseño en el rango $0,2T-1,5T$, siendo T el periodo del edificio, de acuerdo a Muñoz (2020).

2.2.3.2.2. Modelo para el Análisis. La idealización estructural debe representar con precisión la distribución de masas y el comportamiento de la estructura, considerando factores como la fluencia, la degradación de los materiales y la disipación de energía a través de ciclos histeréticos. Se asumirá un comportamiento lineal en los elementos elásticos y un amortiguamiento viscoso máximo del 5 %. La base puede modelarse fija o incluir flexibilidad según sea necesario (Norma E.030, 2018).

2.2.3.2.3. Tratamiento de Resultados. Para el tratamiento de resultados, la Norma E.030 (2018) señala:

- Si se usan al menos 7 registros sísmicos, las fuerzas, deformaciones y distorsiones se calculan como el promedio de los máximos; con menos de siete, se toman los valores máximos.
- Las distorsiones de entrepiso no deben superar 1,25 veces los valores especificados por la Norma E.030 o los establecidos en la figura 6.
- Las deformaciones no deben exceder $2/3$ del valor que cause pérdida de capacidad portante o más del 30 % de resistencia.
- Para verificar la resistencia, los resultados se dividen por $R=2$, siguiendo las normas de cada material.

Figura 6

Límites para la distorsión del entrepiso

Tabla N° 11	
LÍMITES PARA LA DISTORSIÓN DEL ENTREPISO	
Material Predominante	(Δ_i / h_{ei})
Concreto Armado	0,007
Acero	0,010
Albañilería	0,005
Madera	0,010
Edificios de concreto armado con muros de ductilidad limitada	0,005

Nota. Se observan los valores máximos permitidos según el material predominante en la estructura. Tomado de *Norma técnica E.030: Diseño sismorresistente* (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018). Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686410/E.030%20Dise%C3%B1o%20Sismo%20Resistente.pdf>

2.2.3.2.4. Respuesta de Desplazamientos y Derivas. La evaluación de los desplazamientos sísmicos es clave para medir la capacidad de una estructura para resistir movimientos sísmicos, lo que permite diseñar edificaciones más seguras y reducir el riesgo de daños significativos (Riofrio, 2024). Según la Norma Técnica E.030 (2018), el cálculo de los desplazamientos laterales requiere la aplicación de factores de ajuste a los resultados del análisis lineal elástico realizado con cargas sísmicas reducidas. Para estructuras regulares, se emplea un factor de ajuste de 0,75R, mientras que para estructuras irregulares se utiliza un factor de 0,85R. El valor del coeficiente R se especifica según la clasificación del sistema estructural en las normativas vigentes, tal como se representa en la figura 4.

Seguidamente, otra respuesta importante del análisis dinámico son las derivas de entrepiso, que, según Aguilar (2022), miden el desplazamiento relativo entre niveles en función de su altura

y se calculan a partir de las respuestas dinámicas obtenidas del modelo estructural sometido a sismos. Por su parte, Vielma (2014) establece una fórmula específica para determinar este parámetro, considerando las características dinámicas y geométricas de la edificación.

$$\delta_i = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{H_i - H_{i-1}}$$

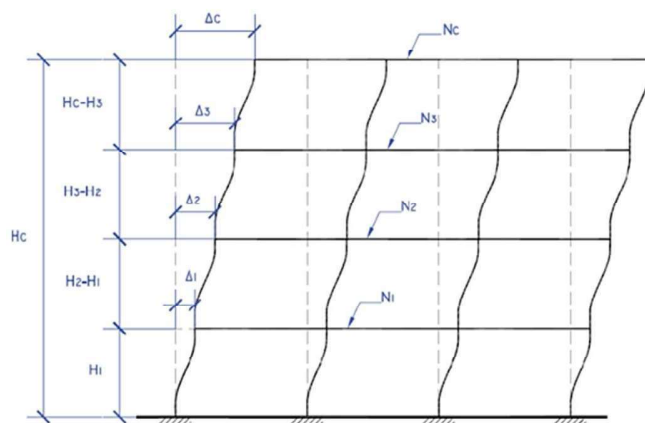
Donde:

- δ_i = deriva de entrepiso en el nivel i
- Δ_i = desplazamiento lateral en el nivel i
- Δ_{i-1} = desplazamiento lateral en el nivel i-1
- H_i = altura del nivel i
- H_{i-1} = altura del nivel i-1

A continuación, la figura 7 muestra cómo se distribuyen los desplazamientos y las derivas a lo largo de la altura de la estructura, permitiendo evaluar su respuesta dinámica frente a un sismo.

Figura 7

Representación gráfica de desplazamientos y derivas de entrepiso



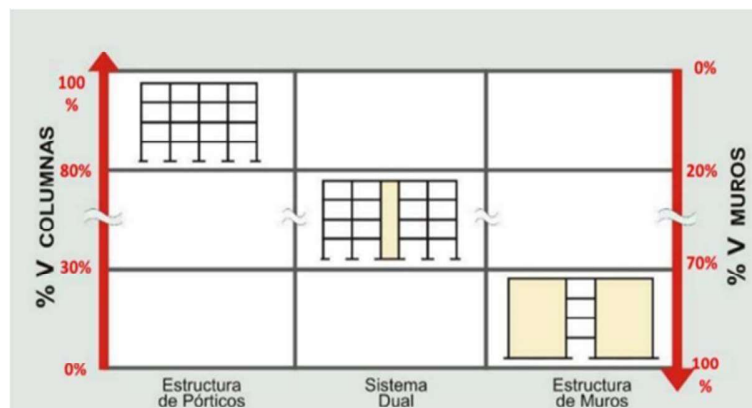
Nota. Se observa los desplazamientos absolutos (N) y relativos (Δ) entre niveles de una estructura, así como las derivas de entrepiso ($\delta_i = \Delta_i / H_i$), de acuerdo a Vielma (2008). Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Determinacion-de-las-derivas-de-entrepiso-a-partir-de-los-desplazamientos_fig1_45490994

2.2.3.3. Sistema Estructural de Muros Estructurales. Para Oviedo (2016), los muros estructurales, conocidos como placas, colaboran con las columnas para mejorar la eficiencia estructural, ya que su longitud proporciona rigidez y ductilidad, permitiendo resistir cargas sísmicas. Actúan como vigas verticales, con espesor reducido y mayor longitud. Además, el acero y el confinamiento de los bordes mejoran su resistencia, ductilidad y capacidad de deformación.

Por otra parte, la Norma Técnica E.030 (2018) señala que este tipo de sistema se distingue porque su capacidad para resistir cargas sísmicas depende principalmente de los muros estructurales, los cuales son responsables de resistir al menos el 70 % de la fuerza cortante en la base de la edificación (figura 8). Asimismo, este sistema estructural se suele usar en edificaciones grandes, ya que tienen que resistir mayores cargas.

Figura 8

Clasificación de los sistemas estructurales en concreto



Nota. Se observan la clasificación de los sistemas estructurales en concreto armado según el porcentaje de fuerza cortante soportada en la base, según Muñoz (2020).

2.2.3.4. Uso del OpenSeesPy para Análisis Dinámico. OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) es un software creado por la Universidad de California para facilitar la simulación de la respuesta estructural ante sismos (Mazzoni et al., 2006). OpenSeesPy, por su parte, combina las capacidades de OpenSees con una interfaz en Python, haciendo más accesibles las investigaciones en ingeniería sísmica (Canales, 2023).

El uso de OpenSeesPy, mediante un adecuado código (figura 9), en el análisis dinámico, permite obtener resultados clave, como desplazamientos y derivas, así como una visualización en 3D de la estructura (figura 10). Los hallazgos obtenidos resultan esenciales para analizar la respuesta estructural de la edificación ante actividad sísmica, permitiendo la optimización del diseño estructural, garantizando una mayor resistencia frente a las cargas generadas por movimientos telúricos.

Figura 9

Ejemplo de un código en OpenSeesPy

```

INICIO
[1]: import openseespy.opensees as ops
import openseespy.postprocessing.ops_vis as opsv
import pandas as ps
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d

# SISTEMA DE UNIDADES S.I. tnf, m
ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 3, '-ndf', 6)

NODOS, RESTRICCIONES DE NODOS, DIAFRAGMAS
[2]: # Nodos
ops.node(1, 0, 0, 0)
ops.node(2, 0, 4, 0)
ops.node(3, 0, 9.2, 0)
ops.node(4, 7.2, 0, 0)
ops.node(5, 7.2, 4, 0)
ops.node(6, 7.2, 9.2, 0)
ops.node(7, 0, 0, 3.5)
ops.node(8, 0, 4, 3.5)
ops.node(9, 0, 9.2, 3.5)
ops.node(10, 7.2, 0, 3.5)
ops.node(11, 7.2, 4, 3.5)
ops.node(12, 7.2, 9.2, 3.5)
ops.node(13, 0, 0, 6.5)
ops.node(14, 0, 4, 6.5)
ops.node(15, 0, 9.2, 6.5)
ops.node(16, 7.2, 0, 6.5)
ops.node(17, 7.2, 4, 6.5)
ops.node(18, 7.2, 9.2, 6.5)

# Nodos Maestras (Centro gravedad)
ops.node(19, 3.6, 4.6, 3.5)
ops.node(20, 3.6, 4.6, 6.5)

# Restricciones en base
ops.fix(1, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(2, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(3, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(4, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(5, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(6, 1, 1, 1, 1, 1)

# Restricciones en nudos de entrepiso ( 3 GDL)
for i in range (7,21):
    ops.fix(i, 0, 0, 1, 1, 1, 0)

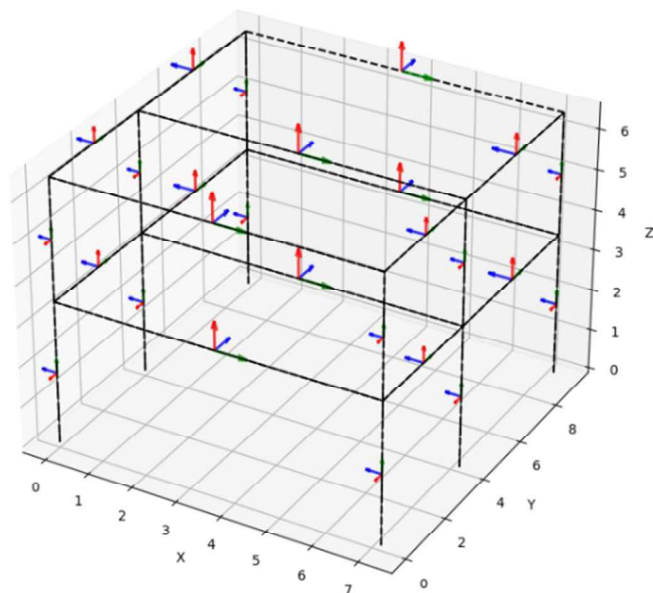
# Diafragma Rigido GDL 3 es normal al plano del diafragma
# rigidDiaphragm GDL 3 | Nudo maestro | Nodos enlazados
ops.rigidDiaphragm(3, 19, 7, 8, 9, 10, 11, 12)
ops.rigidDiaphragm(3, 20, 13, 14, 15, 16, 17, 18)

```

Nota. Se observa un código realizado en el software OpenSeesPy, donde también podemos visualizar las librerías utilizadas.

Figura 10

Visualización en 3D de una estructura con columnas realizado en OpenSeesPy



Nota. Se muestra el modelado en 3D de un sistema estructural compuesto por columnas y vigas realizado por el OpenSeesPy.

Una de las características más interesantes de OpenSeesPy es su flexibilidad para modelar diferentes tipos de materiales y elementos estructurales, lo que permite realizar análisis tanto lineales como no lineales. Además, soporta una amplia gama de modelos avanzados de materiales, desde acero y concreto hasta materiales más complejos, como aquellos modelados con elementos finitos con diversos tipos de secciones.

Otro aspecto notable es su capacidad para efectuar análisis dinámicos avanzados, tales como la respuesta sísmica de edificios bajo distintos registros sísmicos, incorporando efectos de amortiguamiento, no linealidades geométricas y de materiales. Proporciona resultados detallados como desplazamientos, fuerzas internas y derivas entrepiso. Esta versatilidad convierte a

OpenSeesPy es una herramienta esencial para simulaciones realistas en proyectos de ingeniería civil que deben cumplir con estándares sísmicos y de seguridad.

Para llevar a cabo estos análisis, el modelado en OpenSeesPy se desarrolla a través de una serie de etapas secuenciales que reflejan el proceso conceptual de análisis estructural, las cuales incluyen:

- Creación de nodos y definición de sus coordenadas.
- Asignación de masas nodales.
- Aplicación de restricciones (empotramientos, diafragmas rígidos).
- Definición de materiales y secciones.
- Generación de elementos estructurales (vigas, columnas, placas).
- Análisis modal.
- Visualización en 3D del modelado.
- Cálculo de desplazamientos nodales.
- Cálculo de derivas de entrepiso.

A continuación, se detallan las etapas que conforman el proceso de modelado estructural en OpenSeesPy:

Creación de Nodos y Definición de sus Coordenadas. La estructura se representa mediante nodos espaciales definidos con el comando “ops.node(nTag, x, y, z)”. Los nodos maestros, ubicados en el centro de masa de cada nivel, permiten el control dinámico de la estructura.

Asignación de Masas Nodales. Las masas se concentran en los nodos maestros, incorporando las cargas gravitacionales. Se asignan mediante el comando `ops.mass`, incluyendo las componentes traslacionales y rotacionales.

Aplicación de Restricciones. La base de la edificación se empotra con el comando `ops.fix`, restringiendo los seis grados de libertad. En los entrepisos, se aplican restricciones parciales para asegurar el comportamiento rígido del diafragma.

Modelado de Diafragmas Rígidos. Se implementa con “`ops.rigidDiaphragm`”, conectando los nodos de cada nivel al nodo maestro correspondiente, simulando la rigidez en el plano del piso.

Definición de Materiales y Secciones. Los elementos estructurales se caracterizan por propiedades elásticas, utilizando “`ops.section('Elastic', ...)`” para elementos lineales y “`ops.section('ElasticMembranePlateSection', ...)`” para placas.

Generación de Elementos Estructurales. Las vigas y columnas se modelan como elementos tipo “`elasticBeamColumn`”, y los muros mediante elementos finitos tipo “`ShellMITC4`”, definidos por cuatro nodos y una sección de placa.

Análisis Modal. La obtención de los modos y frecuencias naturales se realiza mediante `ops.eigen`, identificando los periodos de vibración del sistema estructural.

Cálculo de Desplazamientos Nodales. Los desplazamientos máximos por nivel se obtienen aplicando un registro sísmico en el análisis dinámico. Se incorpora amortiguamiento del 5 %

mediante coeficientes de Rayleigh, y se registran los desplazamientos en los nodos ubicados en el extremo (volado) de cada nivel.

Cálculo de Derivas de Entrepiso. Las derivas se determinan como la diferencia de desplazamientos entre dos niveles consecutivos, dividida por la altura entre ellos, constituyendo un parámetro clave para evaluar el desempeño sismorresistente de la edificación.

2.3. Definición de Términos Básicos

a) *Amortiguamiento*

El amortiguamiento es el proceso mediante el cual se disipa la energía en la estructura o el suelo, generado por la fuerza restauradora elasto-plástica en los elementos estructurales y juntas, así como por la disipación en el terreno en los componentes no estructurales (Chopra, 2014).

b) *Diafragma Rígido*

Según Gallegos (2018), una losa se considera que actúa como un diafragma rígido siempre que la proporción entre sus dimensiones en planta no supere el valor de 1:4.

c) *Cortante Basal*

La cortante basal representa una estimación de la fuerza lateral máxima que podría actuar sobre la base de la estructura debido a la actividad sísmica (Fernández, s. f.).

d) *Periodo de vibración*

El tiempo necesario para que el sistema complete un ciclo completo de oscilación (Yépez, 2001).

e) *Sismograma*

Son registros sísmicos, los cuales son herramientas esenciales para el análisis de fenómenos perturbadores como los sismos y las erupciones volcánicas, proporcionando información clave como la amplitud de las ondas sísmicas y el momento preciso en que estas se originan (Cenapred, 2018).

f) *Registro Acelerográfico*

Representa gráficamente la variación de aceleraciones en un punto específico, derivándose de los datos captados por un acelerómetro, el cual mide las aceleraciones del movimiento del suelo mediante tres sensores ortogonales que corresponden a las componentes vertical, norte-sur y este-oeste (Instituto Geofísico, s. f.).

g) *Momento Sísmico*

Describe la cantidad de energía liberada en un evento sísmico, siendo posible estimarlo mediante herramientas de software que analizan el tamaño o amplitud de las diversas ondas registradas en función de su frecuencia o período (RSN, 2019).

h) Ondas Sísmicas

Corresponden a movimientos generados en la corteza terrestre debido a la energía liberada desde un punto de origen denominado hipocentro, estas vibraciones se categorizan principalmente en ondas internas y superficiales (Rojas, 2019).

Capítulo III

Metodología de la Investigación

3.1. Metodología y Técnicas Utilizadas

3.1.1. *Tipo y Nivel de Investigación*

Esta investigación se encuentra bajo los alcances del tipo de investigación aplicada, se fundamenta en conceptos teóricos para desarrollar soluciones prácticas, con un alcance significativo en disciplinas como la medicina e ingeniería (Significados, Equipo, 2021).

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que, según Hernández, Collado y Baptista (2014), este tipo de investigación busca generar conocimiento objetivo mediante un enfoque deductivo que utiliza mediciones numéricas y análisis estadísticos para probar hipótesis, sin pretender abarcar numerosas circunstancias, sino de abordar un problema particular.

3.1.2. *Nivel de Investigación*

Una investigación de nivel descriptivo se enfoca en detallar fenómenos, sucesos o eventos en distintas áreas del conocimiento, considerando siempre un marco temporal y geográfico determinado que delimita su alcance. En consecuencia, los resultados obtenidos son aplicables únicamente a la población o contexto estudiado (Bioestadístico, s. f.).

Esta investigación tiene un enfoque descriptivo debido a su profundidad, ya que su propósito principal es ofrecer una visión detallada sobre el comportamiento de una edificación de concreto armado de seis niveles con sistema de muros, mediante un análisis dinámico ante sismos no impulsivos, utilizando el software OpenSeesPy.

3.1.3. Diseño de Investigación

La investigación adoptó un diseño no experimental, dado que no es posible manipular las variables ni asignar de manera aleatoria a los participantes o a las condiciones del experimento (Kerlinger, 1979).

Según Hernández, Collado y Baptista (2014), en una investigación no experimental, el investigador no tiene participación directa en la generación de las situaciones que se estudian, sino que se limita a observar aquellas que ya se han presentado de manera natural. Las variables independientes ya han sucedido y no pueden ser alteradas, por lo que el investigador no tiene la capacidad de influir sobre ellas ni sobre sus consecuencias. En resumen, en este tipo de estudio, los participantes ya están asignados a un grupo o nivel específico de la variable independiente debido a su propia elección.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

La población, de acuerdo a López (2004), se refiere al grupo de elementos o individuos que se busca estudiar en una investigación. Por lo que, para esta investigación, la población estuvo conformada por estructuras de concreto armado que utilizan un sistema estructural basado en muros estructurales.

3.2.2. Muestra

La muestra estuvo compuesta por una edificación típica de concreto armado de seis niveles con sistema de muros estructurales. Esta estructura fue evaluada mediante 30 registros de sismos no impulsivos, seleccionados para analizar su comportamiento dinámico bajo este tipo específico de eventos.

Capítulo IV

Resultados

4.1. Modelamiento Estructural

Para el desarrollo de la presente investigación, se tomó como base un proyecto arquitectónico real correspondiente a un jardín de niños, cuya configuración estructural original se basaba en muros de concreto armado. Este proyecto fue modificado con fines investigativos, adaptándose a una edificación multifamiliar de seis niveles. La nueva configuración se plantea como parte de un conjunto residencial hipotético (ver anexo 2), centrando el análisis en uno de sus bloques habitacionales, con el objetivo de evaluar su comportamiento dinámico ante sismos de tipo no impulsivo.

La elección de este modelo estructural se debió a su configuración regular tanto en planta como en altura, una condición fundamental para lograr un comportamiento sísmico más predecible y reducir la concentración de esfuerzos estructurales. Asimismo, se optó por un sistema de muros estructurales debido a su elevada rigidez lateral y buen desempeño frente a movimientos sísmicos intensos, como los que se presentan en la región de Tacna.

Cabe señalar que el núcleo de circulación vertical (escaleras) no fue incluido en el modelo estructural, ya que se encuentra estructuralmente separado mediante una junta sísmica, conforme a lo estipulado en la Norma Técnica Peruana E.030. Esta norma establece que toda estructura debe contar con una separación mínima igual a $s=0,006 h$, donde h representa la altura medida desde el nivel del terreno. Para una edificación de seis niveles con una altura promedio de 3 m por nivel, la

separación mínima exigida es de aproximadamente 10,8 cm, valor que puede incrementarse en función de los desplazamientos máximos esperados y criterios adicionales de seguridad estructural.

Finalmente, si bien el modelo no corresponde a un proyecto a ejecutar, fue diseñado respetando los criterios técnicos establecidos en la normativa sísmica vigente, garantizando la coherencia estructural y permitiendo simular con realismo el comportamiento dinámico de edificaciones multifamiliares modernas. Esta metodología permite generar resultados útiles para futuras investigaciones y aplicaciones en el diseño sismorresistente.

Por otro lado, dado que se trata de un modelo estructural hipotético diseñado con fines investigativos, para el análisis del comportamiento estructural dinámico, se consideró un suelo de cimentación representativo de la ciudad de Tacna, tomando como referencia las condiciones geotécnicas del Cercado de Tacna. Esta zona fue seleccionada por tratarse de un área urbana consolidada, con características del subsuelo típicas y una alta concentración de edificaciones multifamiliares, similares al tipo de estructura analizada. La selección se basó en un estudio de mecánica de suelos (EMS) previamente realizado en dicha área, el cual mostró un perfil estratigráfico compuesto por materiales aluviales, principalmente arenas limosas y limos de compacidad media a densa. Según la clasificación establecida en la Norma Técnica Peruana E.030 – Diseño Sismorresistente, este tipo de suelo fue clasificado como tipo S2, correspondiente a suelos de rigidez intermedia, con una velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) entre 180 m/s y 750 m/s. Esta clasificación fue fundamental para definir el espectro sísmico de diseño y caracterizar dinámicamente el modelo estructural.

Cabe señalar que, si bien no se realizaron estudios geotécnicos específicos en el área exacta del modelo estructural, se asumieron propiedades del suelo a partir de estudios técnicos confiables

realizados previamente en el Cercado de Tacna. Esta decisión se justifica por la representatividad geotécnica de dicha zona respecto al tipo de edificación y contexto urbano considerado en la investigación, aunque se reconoce como una limitación metodológica que podría abordarse en futuras investigaciones.

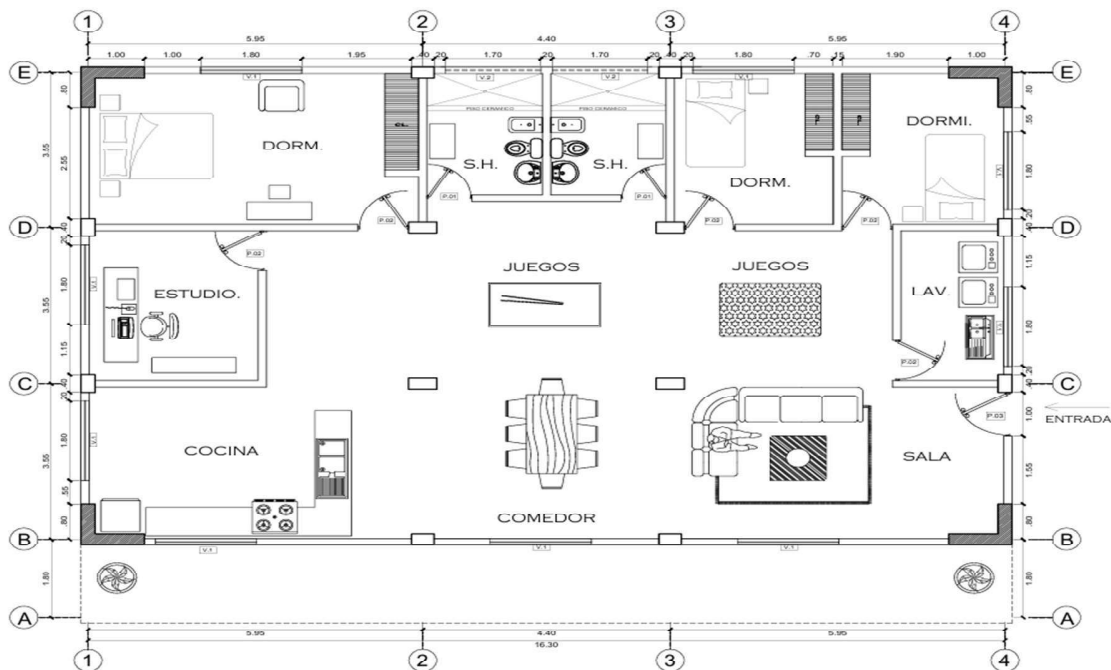
4.1.1. Descripción de la Edificación

Se realizará un análisis dinámico de una edificación de concreto armado de seis niveles con sistema de muros. Se trata de una vivienda multifamiliar que formará parte de un conjunto residencial ubicado en Tacna y contará con tres habitaciones, dos servicios higiénicos, sala, comedor, cocina, área de estudio, juegos y lavandería.

Cada nivel tendrá un área techada de 202,94 m² y una altura entre pisos de 3 metros, según lo detallado en los planos de planta y elevación (figuras 11 y 12), cuyos detalles ampliados se incluyen en el anexo 3.

Figura 11

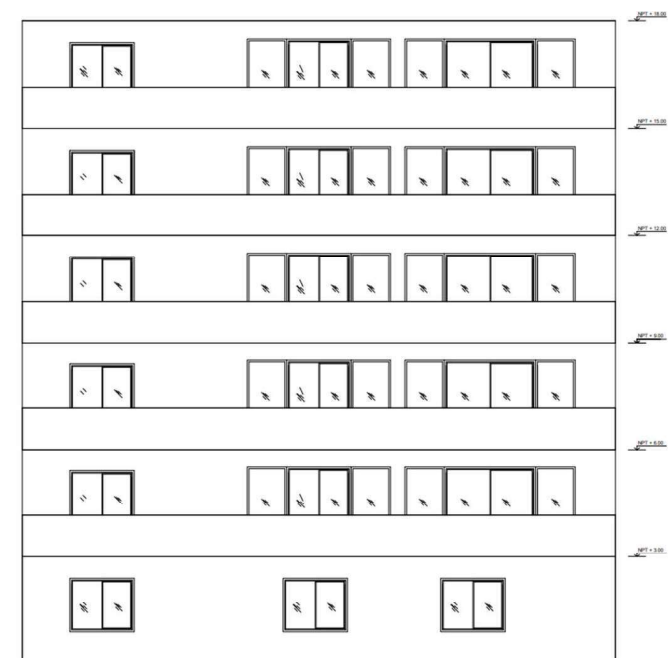
Plano en planta de la edificación multifamiliar a evaluar



Nota. La imagen presenta la distribución arquitectónica de la vivienda multifamiliar en estudio para la presente investigación. Se observan claramente los espacios destinados a dormitorios, servicios higiénicos, sala, comedor, cocina, área de estudio, lavandería y zona de juegos.

Figura 12

Plano de elevación de la edificación multifamiliar a evaluar



Nota. La imagen presenta el plano de elevación de la vivienda multifamiliar en estudio para la presente investigación. Se observan que la altura entre pisos por niveles es de 3 m.

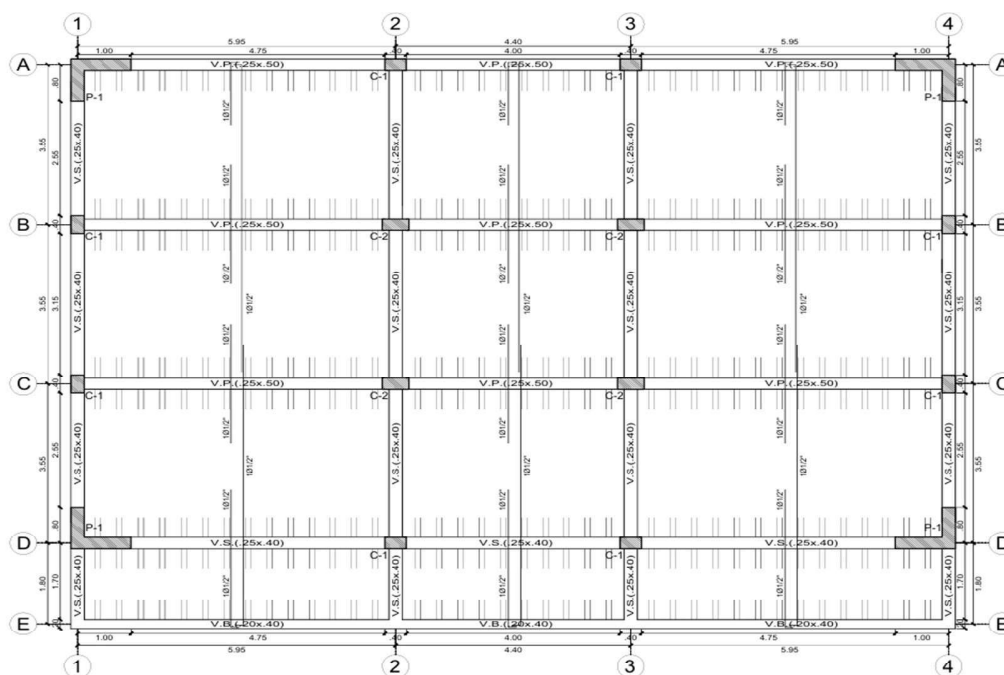
Desde el punto de vista estructural, la edificación está conformada por un sistema de muros estructurales de concreto armado en forma de “L”, identificados con la nomenclatura P-1 (ver figura 13). Estos muros de corte se ubican estratégicamente en las cuatro esquinas del edificio, aportando una elevada rigidez lateral en ambas direcciones (X y Y), así como un efectivo control de la torsión estructural ante solicitaciones sísmicas. Este sistema se complementa con elementos secundarios como vigas y columnas, cuya función principal es resistir cargas gravitacionales. Asimismo, la losa aligerada actúa como un diafragma rígido, permitiendo una adecuada transferencia de fuerzas inerciales hacia los elementos verticales resistentes, lo que refuerza el comportamiento integral del sistema de muros estructurales frente a eventos sísmicos.

Para una mejor comprensión, se presenta el plano estructural en la figura 13 y con mayor detalle en el anexo 4, donde se identifica la distribución y dimensiones de los elementos estructurales, asegurando el cumplimiento de los requerimientos sísmicos y normativos. A continuación, se detallan sus principales dimensiones:

- Altura de losa aligerada : $h = 0,20$ m
- Viga Principal : $VP = 0,25$ m x $0,50$ m
- Viga Secundaria : $VS = 0,25$ m x $0,40$ m
- Viga de Volado : $VB = 0,20$ m x $0,40$ m
- Columnas excéntricas : $C-1 = 0,25$ m x $0,40$ m
- Columnas centrales : $C-2 = 0,50$ m x $0,25$ m
- Placas o muros en L : $P-1 = 1,00$ m x $0,80$ m x $0,25$ m

Figura 13

Plano de estructuras de la edificación multifamiliar a evaluar



Nota. En la figura se observa el plano estructural de la vivienda multifamiliar en estudio, donde se pueden observar la disposición y dimensiones de los elementos estructurales principales, como vigas (principales, secundarias y de volado), columnas y muros o placas.

4.1.2. *Propiedades de los Materiales*

Concreto

Resistencia	: $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de elasticidad	: $E_c = 2,17E+06 \text{ kg/cm}^2$
Peso unitario	: $\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$

Acero

Resistencia	: $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de elasticidad	: $E_s = 2,00E+06 \text{ kg/cm}^2$

4.1.3. *Cargas*

De acuerdo a los establecido de la Norma Peruana de Estructuras E.020, se consideraron las siguientes cargas:

Carga Muerta.

- Piso terminado : $0,10 \text{ tonf/m}^2$
- P. lad techo : $0,07 \text{ tonf/m}^2$
- P. muros internos : $0,15 \text{ tonf/m}^2$

Carga Viva

- Sobre carga en azotea : $0,10 \text{ tonf/m}^2$
- Sobre carga en viviendas : $0,20 \text{ tonf/m}^2$
- Sobre carga en balcón : $0,25 \text{ tonf/m}^2$

Cabe señalar que la edificación en estudio es de uso multifamiliar, por lo que pertenece a la categoría C según el numeral 4.3 de la Norma E.030. En este caso, se debe adicionar a la carga permanente (P_{CM}) un porcentaje de la carga viva (P_{CV}), de acuerdo con la categoría:

- Categoría C: 25 % de la carga viva
- Azotea : 25 % de la carga viva

Por lo tanto, para la estimación del peso concentrado por niveles, se consideró $100 \% P_{CM} + 25 \% P_{CV}$.

4.1.4. Modelado en ETABS

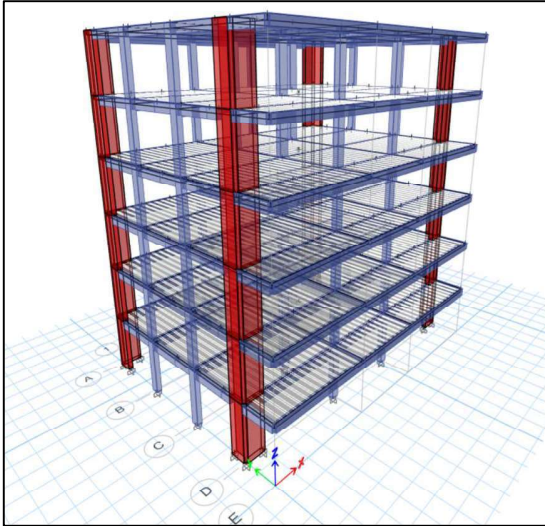
El modelado de la estructura se desarrolló en ETABS, basado en los planos de estructuras. Para la representación de los elementos estructurales, se consideraron las siguientes configuraciones:

- Las vigas y columnas fueron modelados como elementos tipo frame,
- Los muros estructurales se representaron como elementos membrane.
- La losa se modelo como shell, utilizando una sección Ribbed para una losa aligerada en una dirección.
- Además, se incorporaron brazos rígidos con un coeficiente de 0,5.

Finalmente, la versión final del modelo 3D de la estructura, desarrollado en ETABS, se presenta en la figura 14.

Figura 14

Visualización 3D del modelo estructural de la edificación



Nota. La figura muestra la visualización en 3D del modelo estructural de la estructura tras ser modelado utilizando el software ETABS.

El modelado en ETABS permitió obtener las masas en las direcciones X e Y para cada nivel (tabla 3), expresadas en toneladas fuerza por segundo cuadrado sobre metro ($\text{tonf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$). Estos valores fueron incorporados en el código desarrollado en OpenSeesPy para la ejecución del análisis dinámico.

Tabla 3*Resumen de masas por nivel obtenido en ETABS*

Story	UX tonf-s2/m	UY tonf-s2/m	UZ tonf-s2/m
Story 6	12.65	12.65	0
Story 5	21.64	21.64	0
Story 4	21.64	21.64	0
Story 3	21.64	21.64	0
Story 2	21.64	21.64	0
Story 1	21.64	21.64	0
Base	1.14	1.14	0

Nota. La tabla muestra la distribución de masas por niveles obtenida en ETABS. El valor $UZ = 0$ indica que no se considera masa en la dirección vertical, ya que en análisis dinámicos las cargas inerciales actúan principalmente en X e Y.

Estos datos sirvieron para poder hallar la inercia de masa rotacional J mide la resistencia de un cuerpo ante la rotación respecto a un eje. En estructuras, se calcula como la suma de las masas multiplicada por el cuadrado de su separación respecto al eje de rotación, siendo clave para analizar la torsión y respuesta sísmica del edificio. A continuación, se presenta la tabla 4 con los resultados obtenidos.

Tabla 4*Inercia de masa rotacional de cada nivel*

Nivel	Pi (tonf)	Masa X	Masa Y	a (m)	b (m)	J CM
1	212.25	21.64	-	16.30	12.45	758.51
2	212.25	21.64	-	16.30	12.45	758.51
3	212.25	21.64	-	16.30	12.45	758.51
4	212.25	21.64	-	16.30	12.45	758.51
5	212.25	21.64	-	16.30	12.45	758.51
6	124.128	12.65	-	16.30	12.45	443.59

Nota. La inercia de masa rotacional (J) se calcula considerando la distribución de masas y las dimensiones de la estructura respecto al centro de masa por nivel. Se observa que los

valores de J son constantes en los primeros cinco niveles, mientras que en el sexto nivel disminuyen debido a la reducción de la masa en ese nivel.

4.1.5. Modelado en OpenSeesPy

Mediante el uso de herramientas de post-procesamiento, como OpenSeesPy, se desarrolló un código que permitió la incorporación de 192 nodos (anexo 5) con sus respectivas coordenadas, representando una **edificación** de concreto armado de seis niveles con sistema de muros.

Para ello, se definieron los nodos maestros en el centro de gravedad de cada nivel, estableciendo restricciones en la base y en los nodos de entrepiso. Posteriormente, se modelaron los diafragmas rígidos, vinculando los **grados** de libertad de un grupo de nodos a su respectivo nodo maestro. Además, se asignaron las masas nodales a cada nivel, considerando las cargas gravitacionales y la distribución de cargas en la estructura, las cuales fueron definidas en las direcciones X, Y y Z. Asimismo, se especificaron las propiedades de los materiales, incluyendo sus características mecánicas, así como las inercias y secciones transversales de los elementos estructurales (vigas, columnas y muros).

Para la representación de los elementos estructurales, se consideraron las siguientes librerías:

- Las vigas y columnas fueron modeladas utilizando **elasticBeamColumn** (figura 15), lo que permitió representar su comportamiento elástico basado en sus propiedades geométricas y mecánicas.

- Los muros estructurales se representaron mediante **ShellMITC4** (figura 16), una formulación basada en elementos finitos que considera la interacción membrana-flexión, permitiendo una mejor representación del comportamiento de los muros frente a la acción de cargas sísmicas.

Como recomendación, para el modelado de la placa o muro estructural, se recomienda colocar los nodos que forman la placa en sentido antihorario.

Figura 15

Librería utilizada para modelar vigas y columnas en *OpenSeesPy*

```
# ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, Area, E_mod, G_mod, Jxx, Iy, Iz, transfTag, <'-mass', mass>, <'-cMass'>)
G=0.9e6
Ec=2.17e6
A1=0.10
A2=0.125
A3=0.08

JxxCV=1.273e-3
IyCV=0.001333
IzCV=0.000521

JxxCHVS=1.273e-3
IyCHVS=0.000521
IzCHVS=0.001333

JxxC2VP=1.788e-3
IyC2VP=0.000651
IzC2VP=0.002604

JxxVB=0.732e-3
IyVB=0.000267
IzVB=0.001067

ops.element('elasticBeamColumn', 1, 3, 28, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 2, 4, 29, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 3, 9, 35, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 4, 10, 36, A2, Ec, G, JxxC2VP, IyC2VP, IzC2VP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 5, 11, 37, A2, Ec, G, JxxC2VP, IyC2VP, IzC2VP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 6, 12, 38, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 7, 13, 40, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 8, 14, 41, A2, Ec, G, JxxC2VP, IyC2VP, IzC2VP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 9, 15, 42, A2, Ec, G, JxxC2VP, IyC2VP, IzC2VP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 10, 16, 43, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 11, 21, 49, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 12, 22, 50, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
```

Nota. La figura muestra la implementación de la librería *elasticBeamColumn* en *OpenSeesPy* para modelar vigas y columnas. Esta función requiere como parámetros el área de la sección transversal, el módulo de elasticidad (E_{mod}), el módulo de corte (G_{mod}), el momento de inercia en la dirección fuerte (J_{xx}), las inercias respecto a los ejes Y e Z (I_y e I_z), así como el identificador único (*tag*) de cada elemento estructural.

Figura 16

Librería utilizada para modelar muros estructurales en OpensSeesPy

```
# Propiedades de material y sección
thickness = 0.25 # e de placa
nu = 0.125 # relación de poisson
Ec = 2.17e6

# Definir la sección elástica para la placa
sectionTag = 2005 #Etiqueta
ops.section('ElasticMembranePlateSection', sectionTag, Ec, thickness, nu)

# PLACAS
ops.element('ShellMITC4', 259, 1, 2, 27, 26, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 260, 5, 6, 31, 30, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 261, 19, 20, 48, 47, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 262, 23, 24, 52, 51, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 263, 1, 7, 32, 26, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 264, 6, 8, 33, 31, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 265, 17, 19, 47, 44, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 266, 18, 24, 52, 45, sectionTag)
```

Nota. La figura muestra la implementación de *ShellMITC4* en OpenSeesPy para modelar placas, utilizando la sección *ElasticMembranePlateSection*. Se definen propiedades como el espesor, la relación de Poisson y el módulo de elasticidad, asignando un identificador único a cada elemento.

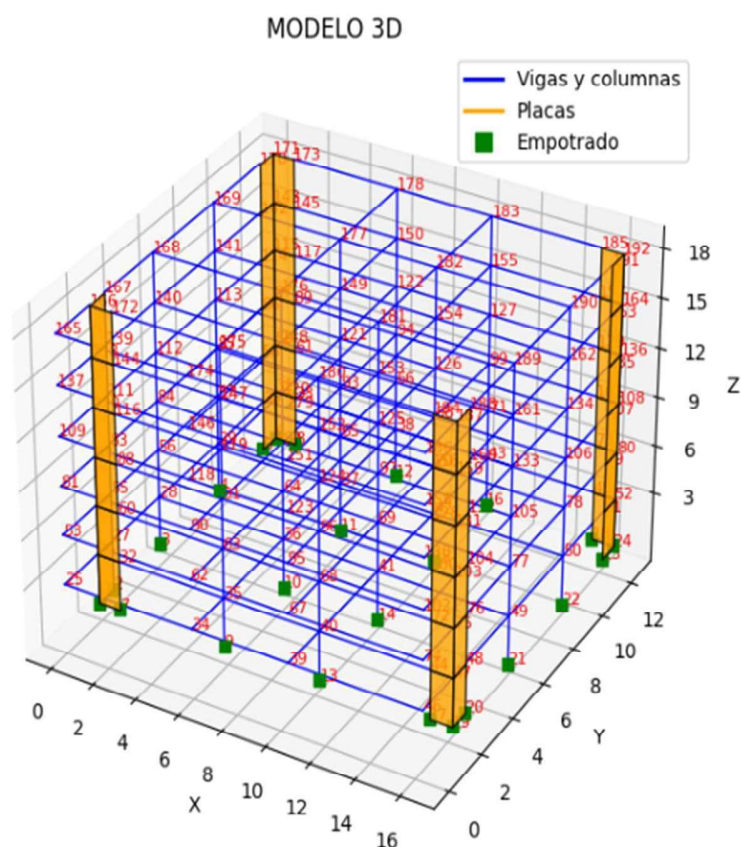
Asimismo, tras completar el análisis, se obtuvo una representación visual en 3D detallada del modelo estructural, como se muestra en la figura 17, en donde destaca los siguientes elementos:

- Vigas y columnas, representadas en color azul, que conforman la estructura principal del edificio.
- Muros estructurales o placas, mostrados en color naranja, los cuales proporcionan rigidez y estabilidad sísmica a la edificación.
- Restricciones en la base, representadas con rectángulos de color verde, los cuales representan que la base esta empotrada.
- Numeración de los nodos, en color rojo, lo que facilita la identificación de cada nodo en la estructura.

Esta visualización permite evaluar la correcta disposición y conectividad de los elementos estructurales, verificar la configuración de restricciones y nodos dentro del modelo.

Figura 17

Visualización 3D de la edificación multifamiliar a evaluar en OpenSeesPy



Nota. Se muestra la visualización en 3D del modelo estructural generado mediante un código desarrollado en OpenSeesPy de una edificación de concreto armado de 6 niveles con muros estructurales. Asimismo, cuenta con una leyenda la cual permite identificar los elementos estructurales.

Cabe señalar que lo expuesto en este apartado se puede visualizar en el anexo 6, donde se presenta en detalle el código de programación utilizado para modelar la estructura de estudio en OpenSeesPy.

4.1.6. *Sistema estructural de Muros Estructurales*

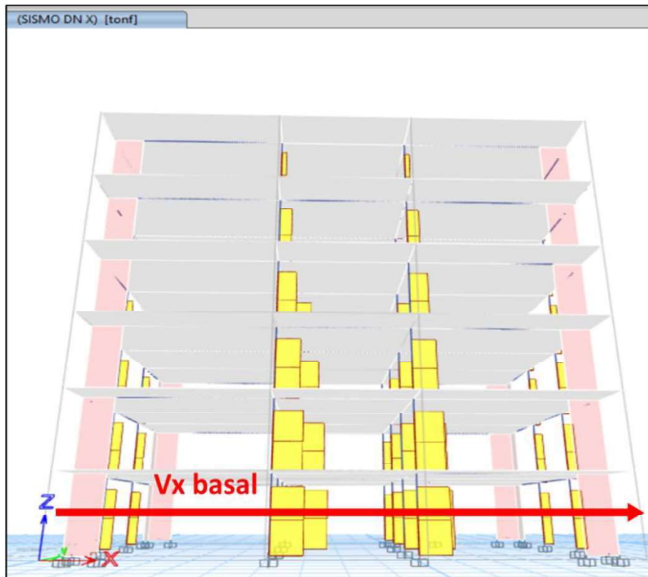
De acuerdo con la Norma E.030, en la sección 3.2.1 referida a las "Estructuras de Concreto Armado", los sistemas de muros estructurales se definen como aquellos donde la capacidad sismo resistente proviene principalmente de los muros estructurales, que deben soportar como mínimo el 70 % de la fuerza cortante total en la base de la estructura. Con la finalidad de comprobar el cumplimiento de la normativa, se incorporó el caso de carga "Response Spectrum" para determinar la cortante basal en las direcciones X e Y, considerando la contribución de las placas. Para este análisis, fue necesario definir la función de espectro, utilizando los parámetros establecidos en la Norma E.030 (capítulos 2 y 3).

- Zona sísmica : $Z_4 = 0.45$
- Factor de uso : $U = 1.0$
- Perfil de suelo : $S_2 = 1.05$

A continuación, se muestran las figuras 18 y 19, donde se visualiza el corte efectuado en ETABS para obtener la fuerza cortante en la base en las direcciones X y Y, respectivamente.

Figura 18

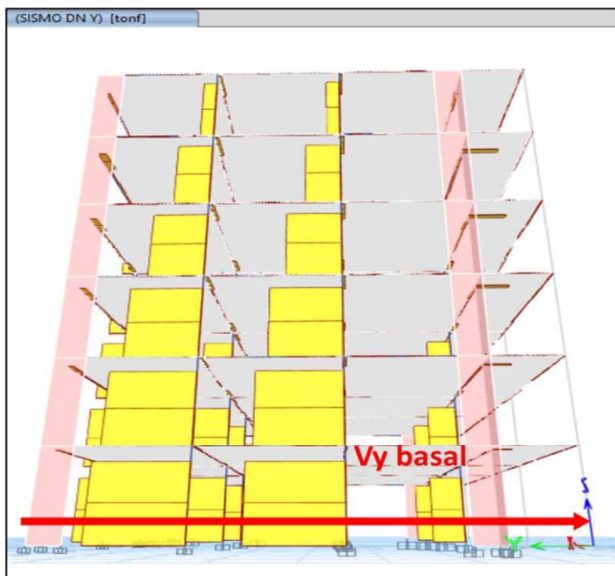
Corte en ETABS para hallar la cortante basal en X



Nota. La figura muestra el corte en ETABS para determinar la cortante basal y el porcentaje de la fuerza cortante que absorben las placas en la dirección X.

Figura 19

Corte en ETABS para hallar la cortante basal en Y



Nota. La figura muestra el corte en ETABS para determinar la cortante basal y el porcentaje de fuerza cortante que absorben las placas en la dirección Y.

Los resultados obtenidos de la cortante en la base se muestran en la tabla 5.

Tabla 5

Cortante en la base

Sentido X	V basal (tonf)	V basal (%)	Sentido Y	V basal (tonf)	V basal (%)
Placas + Columnas	200.93	100.00	Placas + Columnas	205.16	100.00
Placas	189.10	94.11	Placas	196.26	95.66

Nota. La información sobre la cortante basal mostrados en la tabla fue obtenida del software ETABS. Estos valores representan los resultados obtenidos para el caso de carga Response Spectrum. La fuerza cortante en la base fue determinada en ambas direcciones principales de análisis.

De acuerdo con los resultados, las placas absorben el 94,11 % de la cortante basal en la dirección X y el 95,66 % en la dirección Y. Dado que estos valores superan el 70 % exigido por la norma, se confirma que la edificación cuenta con un sistema estructural basado en muros estructurales.

4.2. Análisis Modal

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos del análisis modal realizado en el modelo tridimensional de la edificación, empleando OpenSeesPy y el software ETABS. Se analizaron 18 modos de vibración, considerando sus respectivas frecuencias y periodos de vibración. Estos modos permiten entender cómo la estructura responde ante excitaciones dinámicas, mostrando no solo su capacidad para resistir dichas cargas, sino también cómo se distribuyen las deformaciones a lo largo de la edificación. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6*Modos de vibración con su periodo de vibración y frecuencia*

Modos	OPENSEESPY		SOFTWARE ETABS	
	Periodo (sec)	Frecuencia (cyc/sec)	Periodo (sec)	Frecuencia (cyc/sec)
1	0.217	4.608	0.216	4.634
2	0.211	4.739	0.193	5.172
3	0.134	7.463	0.141	7.102
4	0.074	13.514	0.074	13.496
5	0.072	13.889	0.066	15.099
6	0.046	21.739	0.049	20.608
7	0.046	21.739	0.047	21.219
8	0.045	22.222	0.042	23.839
9	0.036	27.778	0.037	27.272
10	0.035	28.571	0.032	30.796
11	0.031	32.258	0.032	31.373
12	0.030	33.333	0.031	32.15
13	0.029	34.483	0.030	33.469
14	0.028	35.714	0.028	35.599
15	0.028	35.714	0.026	38.109
16	0.022	45.455	0.024	40.85
17	0.019	52.632	0.022	46.417
18	0.018	55.556	0.020	49.059

Nota. Se visualiza los periodos de vibración y frecuencias obtenidos en OpenSeesPy y ETABS para los primeros 18 modos de vibración de la edificación.

Por otro lado, el período de vibración fundamental es una característica clave para comprender la respuesta dinámica de la estructura. La tabla 7 presenta los valores obtenidos a partir de los modelos desarrollados en OpenSeesPy y ETABS, permitiendo una comparación directa entre ambos.

Tabla 7*Periodo de vibración fundamental T_1*

Modo	OPENSEESPY	SOFTWARE ETABS
	Periodo fundamental (sec)	Periodo fundamental (sec)
T1	0.217	0.216

Nota. Para determinar el periodo fundamental de la estructura, se utilizaron tanto OpenSeesPy como ETABS.

4.2.1. Modos de Vibración de la Edificación

El análisis de los modos de vibración ayuda a entender la manera en que una estructura reacciona ante distintas frecuencias, sobre todo durante eventos sísmicos. Estos modos reflejan los movimientos relativos de las diferentes partes de la estructura cuando es sometida a la acción de fuerzas sísmicas.

Según la Norma E.030, en el Artículo 4.6.1 sobre “modos de vibración”, se establece que deben incluirse como mínimo los tres primeros modos predominantes en la dirección evaluada. Además, en cada sentido, deben incluirse los modos necesarios para representar al menos el 90 % de la masa total de la estructura. Los resultados obtenidos de los modos y la masa participativa modal se presentan en la tabla 8.

Tabla 8*Modos de vibración y masa participativa modal de la edificación*

Modo	Period (sec)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	0.216	1.41E-06	0.8733	1.41E-06	0.8733	3.344E-06	3.34E-06
2	0.193	0.8533	2.08E-06	0.8533	0.8733	0.0204	0.0204
3	0.141	0.0200	2.41E-06	0.8733	0.8733	0.8534	0.8738
4	0.074	0.0000	0.0884	0.8733	0.9618	0.0000	0.8738
5	0.066	0.0864	0.0000	0.9597	0.9618	0.0020	0.8758
6	0.049	0.0019	1.08E-06	0.9617	0.9618	0.0863	0.9622
7	0.047	0.0000	0.0259	0.9617	0.9876	6.491E-06	0.9622
8	0.042	0.0254	0.0000	0.9871	0.9876	0.0005	0.9627
9	0.037	0.0000	0.0091	0.9871	0.9967	5.524E-07	0.9627
10	0.032	0.0088	0.0000	0.9958	0.9967	0.0003	0.9630
11	0.032	0.0000	0.0027	0.9958	0.9994	3.025E-06	0.9630
12	0.031	0.0007	0.0000	0.9966	0.9994	0.0249	0.9879
13	0.030	0.0000	0.0004	0.9966	0.9998	6.499E-07	0.9879
14	0.028	0.0027	0.0000	0.9992	0.9998	0.0001	0.9880
15	0.026	0.0004	0.0000	0.9997	0.9998	3.283E-06	0.9880
16	0.024	0.0002	0.0000	0.9999	0.9998	0.0085	0.9966
17	0.022	0.0001	0.0000	0.9999	0.9998	0.0024	0.9990
18	0.020	5.56E-06	0.0000	0.9999	0.9998	0.0002	0.9992

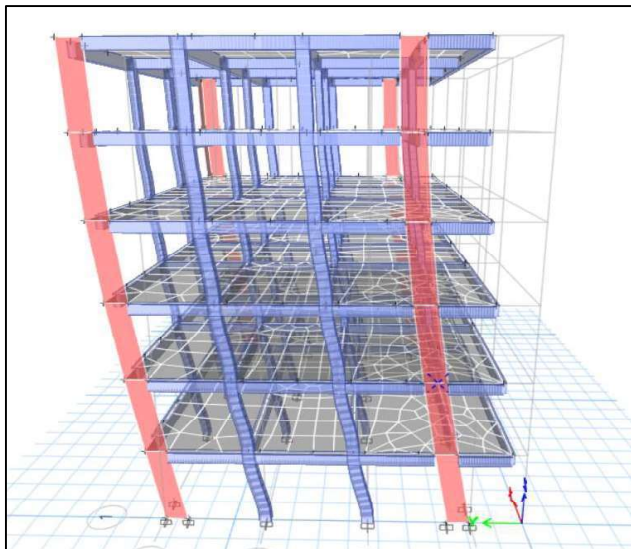
Nota. La tabla muestra los 18 modos de vibración y la participación de masa modal de la edificación, obtenidos del software ETABS, destacando los modos con mayor contribución en cada dirección.

En la tabla 8, se aprecia que los tres primeros modos representan los modos principales en las direcciones "X", "Y" y la rotación en "Z", detallándose de la siguiente manera:

- El 1er modo de vibración corresponde al sentido "Y", tal como se muestra en la figura 20, con un período de vibración de 0,216 s y una participación de masa modal del 87,33 %.
- El 2do modo de vibración corresponde al sentido "X", tal como se muestra en la figura 21, con un periodo de vibración de 0,193 s y una participación de masa modal del 85,33 %.
- El 3er modo de vibración es rotacional alrededor del eje "Z", tal como se muestra en la figura 22, con un periodo de 0,141 s una participación de masa modal del 85,34 %.

Figura 20

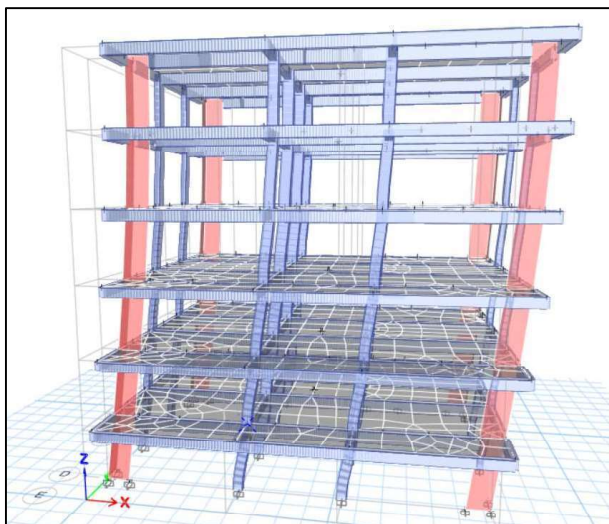
Primer Modo de Vibración - Dirección Y



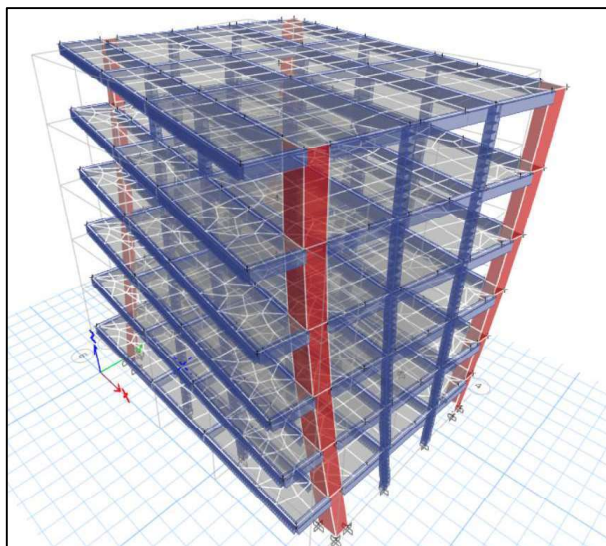
Nota. La figura presenta el modo de vibración 1 obtenido del software ETABS, caracterizado por un desplazamiento predominante en la dirección "Y", reflejando el comportamiento traslacional principal en dicha dirección.

Figura 21

Segundo Modo de Vibración - Dirección X



Nota. La figura presenta el modo de vibración 2 obtenido del software ETABS, caracterizado por un desplazamiento predominante en la dirección "X", reflejando el comportamiento traslacional principal en dicha dirección.

Figura 22*Tercer Modo de Vibración - Rotacional*

Nota. La figura muestra el modo de vibración 3 obtenido del software ETABS, el cual representa un movimiento rotacional alrededor del eje vertical, evidenciando una torsión predominante en la estructura.

La tabla 8 indica que el último modo dominante en la dirección 'X' es el modo número 8. Además, se observa que el total de las masas efectivas, resaltada en color celeste en la tabla, excede el 90 % de la masa total de la estructura. Por lo tanto, se verifica el cumplimiento de la Norma E.030, concluyendo que no habría inconvenientes en considerar 8 modos de vibración.

Asimismo, esta secuencia de modos también refleja una característica típica de edificaciones con una configuración estructural simétrica, donde la secuencia de los modos principales se compone de traslaciones puras en las dos direcciones ortogonales seguidas de una rotación.

4.3. Determinación de Registros No Impulsivos

Se seleccionaron 30 registros sísmicos no impulsivos provenientes de distintas regiones del Perú, obtenidos mediante la base de datos del CISMID. Se consideraron registros de eventos sísmicos con una magnitud de momento entre 6 y 8,4. Además, los pasos de tiempo de los registros varían entre 0,005, 0,01 y 0,02 segundos, según la frecuencia de muestreo de cada estación. Los datos de magnitud de momento y aceleración máxima del suelo (PGA) fueron extraídos directamente de la misma fuente.

A partir de los registros de aceleración, se llevó a cabo el procesamiento de los datos utilizando técnicas de análisis de señales digitales, implementadas mediante rutinas programadas en el software MATLAB. Este procedimiento permitió obtener el Ldv (cm/s) y PGV (cm/s), que representan la longitud desarrollada del registro de velocidades y la velocidad máxima del suelo respectivamente.

Posteriormente, a partir de ambos parámetros, se calculó el índice de impulsividad (I_p) para los registros seleccionados, lo que permitió clasificarlos como no impulsivos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9*Registro de sismos no impulsivos*

N°	Fecha	Ubicación	Estación	Mag (Mw)	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	Ldv (cm/s)	dt (seg)	Ip	Clasificación
1	1970_05_31	Lima	Parque de la Reserva	7.0	-105.05	10.40	616.78	0.020	59.32	NO IMPULSIVO
2	2001_06_23	Moquegua	César Vizcarra Vargas	8.4	-295.15	28.30	2737.04	0.010	96.71	NO IMPULSIVO
3	2001_07_07	Arequipa	UNSA	7.6	-123.21	10.04	1065.77	0.005	106.21	NO IMPULSIVO
4	2005_06_13	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	7.8	-94.18	6.83	789.59	0.005	115.58	NO IMPULSIVO
5	2007_08_15	Lima	Jorge Alva Hurtado	8.0	-73.89	7.25	1492.86	0.005	206.02	NO IMPULSIVO
6	2010_05_05	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	6.6	-190.00	11.61	429.16	0.005	36.96	NO IMPULSIVO
7	2011_04_02	Tacna	Alberto Giesecke Matto	5.9	6.41	0.39	98.85	0.005	252.40	NO IMPULSIVO
8	2012_05_14	Tacna	Universidad Privada de Tacna	6.2	180.00	10.06	352.07	0.005	35.01	NO IMPULSIVO
9	2013_09_25	Lima	Decanato FIC-UNI	7.1	3.56	0.31	214.90	0.005	695.09	NO IMPULSIVO
10	2014_03_23	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	7.6	-9.32	0.64	176.55	0.005	276.15	NO IMPULSIVO
11	2014_04_01	Tacna	Alberto Giesecke Matto	8.2	-71.29	6.37	924.13	0.005	145.02	NO IMPULSIVO
12	2015_03_22	Tacna	Municipalidad de Ciudad Nueva	6.4	-54.47	2.02	317.20	0.005	157.38	NO IMPULSIVO
13	2017_06_05	Piura	SENCICO	6.2	-11.46	0.57	336.78	0.005	589.53	NO IMPULSIVO
14	2017_06_24	Tacna	SENCICO	7.1	-2.81	0.05	251.83	0.005	4953.43	NO IMPULSIVO
15	2017_07_17	Arequipa	SENCICO	6.3	-43.86	2.53	388.15	0.005	153.56	NO IMPULSIVO
16	2017_10_10	Tacna	SENCICO	7.6	107.13	3.06	768.31	0.005	250.99	NO IMPULSIVO
17	2018_01_14	Tacna	SENCICO	6.8	6.36	0.54	289.08	0.005	532.69	NO IMPULSIVO
18	2019_04_11	Lima	Facultad de Ingeniería Civil, UNFV	6.1	6.82	0.10	212.78	0.005	2232.35	NO IMPULSIVO
19	2019_05_26	Iquitos	SENCICO	8.0	-81.08	6.88	1291.32	0.005	187.75	NO IMPULSIVO
20	2021_07_30	Piura	SENCICO	6.1	-168.07	8.57	686.55	0.005	80.09	NO IMPULSIVO
21	2021_11_28	La Libertad	SENCICO	7.5	33.96	1.25	575.23	0.005	459.84	NO IMPULSIVO
22	2022_02_03	Trujillo	SENCICO	6.8	8.02	0.25	231.35	0.005	914.46	NO IMPULSIVO
23	2022_05_10	Tacna	SENCICO	6.8	4.56	0.41	210.76	0.005	510.89	NO IMPULSIVO
24	2022_05_26	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	6.9	-16.68	0.58	293.35	0.005	507.64	NO IMPULSIVO
25	2024_01_20	Ucayali	SENCICO	6.5	-2.32	0.24	202.22	0.005	825.84	NO IMPULSIVO
26	2024_01_28	Ucayali	UNIDAD DE POSGRADO DE LA FIC-UNI	6.2	-6.32	0.51	150.09	0.005	294.35	NO IMPULSIVO
27	2024_06_28	Ica	UNIDAD DE POSGRADO DE LA FIC-UNI	7.0	52.36	7.30	675.87	0.005	92.60	NO IMPULSIVO
28	2024_06_29	Ica	UNIDAD DE POSGRADO DE LA FIC-UNI	6.4	7.80	1.21	243.69	0.005	201.80	NO IMPULSIVO
29	2024_07_18	Tacna	SENCICO	7.1	6.82	0.22	256.62	0.005	1171.82	NO IMPULSIVO
30	2024_11_05	Ica	SENCICO	6.0	37.90	2.70	327.69	0.005	121.44	NO IMPULSIVO

Nota. Se muestran los 30 registros de aceleración seleccionados, identificados como no impulsivos según los cálculos efectuados.

4.4. Selección de Sismos Filtrados por Escalado

Para la selección de sismos filtrados por escalado, se tuvo que obtener el espectro de diseño de la Norma E.30 y los espectros de dirección máxima. A continuación, se muestra cada apartado.

4.4.1. Espectro de Diseño de la Norma E.030

El espectro de diseño según la Norma E.030 es una representación gráfica de la aceleración espectral en función del período de vibración de una estructura, considerando factores claves como la zona sísmica (Z1, Z2, Z3 y Z4), el factor uso (U), el coeficiente de reducción de respuesta (R), el tipo de suelo (S0, S1, S2 y S3), el factor de amplificación sísmica (C). Desde un enfoque matemático, se expresa mediante la aceleración espectral normalizada con respecto a la aceleración gravitatoria (S_a/g), mediante la siguiente ecuación:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} \times g$$

En esta investigación, se emplearon los siguientes parámetros de acuerdo con la Norma E.030 "Diseño Sismorresistente", específicamente en el capítulo 2: Peligro sísmico y el Capítulo 3: Categoría, sistema estructural y regularidad de las edificaciones.

- Zona sísmica : Z4 = 0,45
- Factor de uso : U = 1,0 (Edificación de categoría C)
- Perfil de suelo : S₂ = 1,05
- Periodo característico del suelo : T_p = 0,60 s.
- Periodo límite : T_L = 2,0 s.
- Coeficiente de reducción de respuesta: R = 6 (Correspondiente a Muros estructurales)

El factor de amplificación sísmica (C) se determina a través de las siguientes expresiones:

$$T < T_p \quad \rightarrow C = 2,5$$

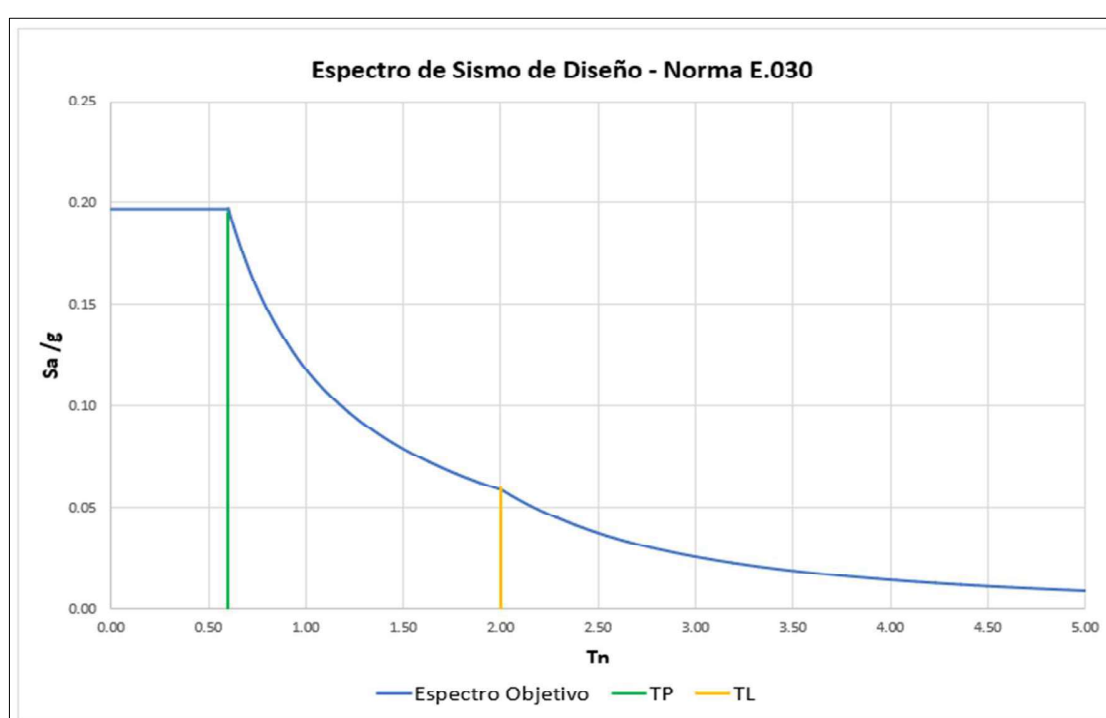
$$T_p < T < T_L \quad \rightarrow C = 2,5 * (T_p/T)$$

$$T > T_L \quad \rightarrow C = 2,5 * (T_p * T_L / T^2)$$

Para el cálculo numérico del espectro de diseño o espectro objetivo, se utilizó una hoja de cálculo en Excel, el cual se puede observar en el anexo 7, en la cual se ingresaron los datos correspondientes, permitiendo la generación de la gráfica del espectro objetivo mostrada en la figura 23.

Figura 23

Espectro de diseño sísmico de acuerdo a la Norma E.030



Nota. La figura presenta el espectro de diseño sísmico conforme a la Norma E.030, representando la variación de la aceleración espectral (S_a/g) en función del período natural (T_n). Se destacan los valores T_P (verde) y T_L (amarillo), que definen los cambios en la respuesta sísmica según el tipo de suelo (S2).

4.4.2. Espectro de Dirección Máxima

En el Art 16.2.3.2 de la Norma ASCE-7-22, está la “escala de amplitud”, en el cual se establece que, para cada par de movimientos horizontales del suelo, es necesario generar un “espectro de dirección máxima” utilizando ambos componentes del movimiento sísmico horizontal. Este enfoque de espectro de dirección máxima es importante, porque las estructuras no siempre experimentan su mayor demanda en una de las dos direcciones ortogonales (como las componentes X y Y del movimiento sísmico). En cambio, la dirección más crítica puede ser cualquier combinación lineal de estas dos componentes.

Para determinar dicho espectro, primero se halló el “registro de aceleración en la dirección máxima”, calculando la combinación lineal correspondiente. La representación matemática que se aplicó es la siguiente:

$$a_{rotado}(t, \theta) = a_x(t) \cos(\theta) + a_y(t) \sin(\theta)$$

Donde $a_x(t)$ y $a_y(t)$ representan las componentes de aceleración en las direcciones X e Y, respectivamente, mientras que θ es el ángulo de rotación medido desde el eje X.

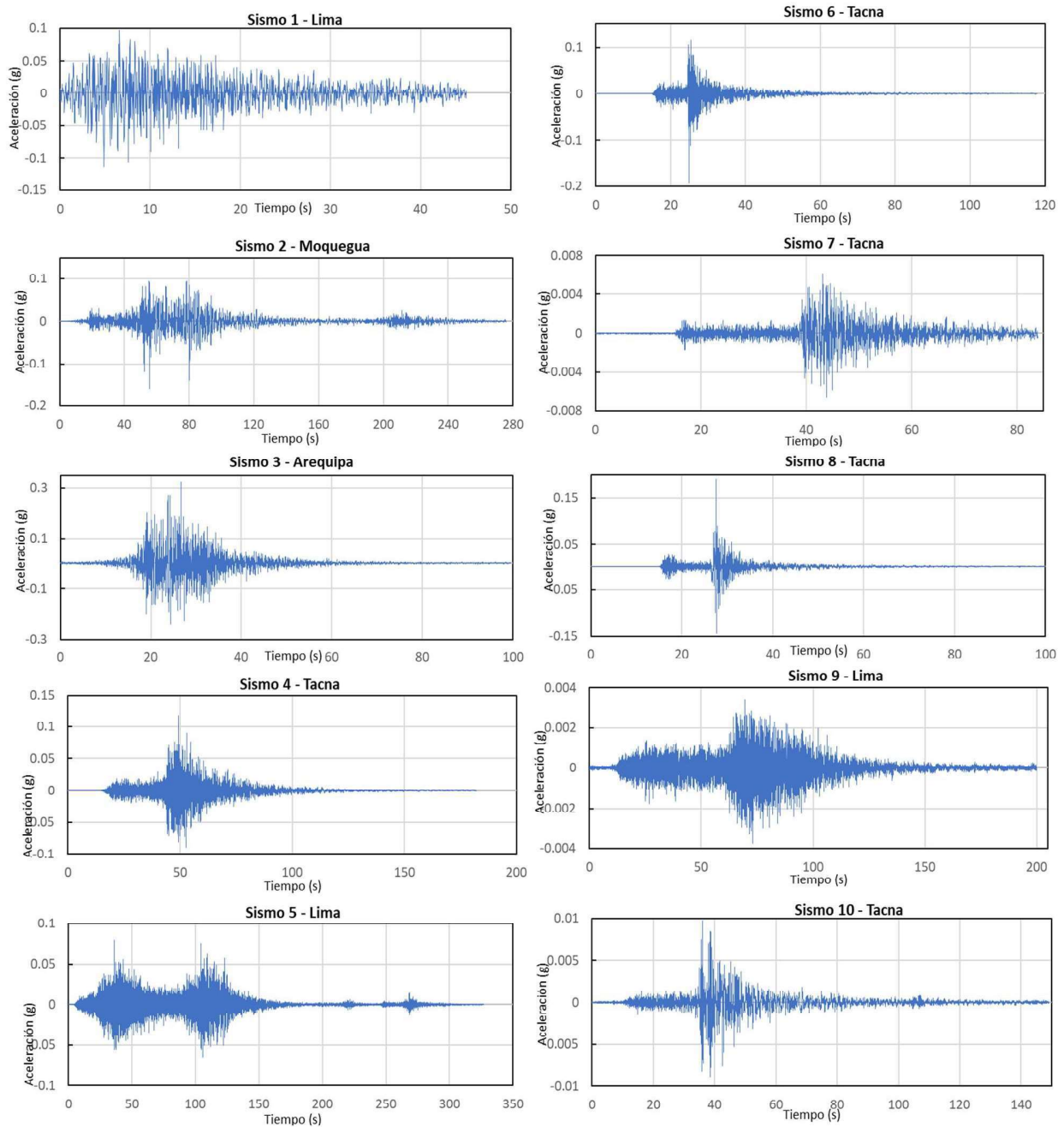
A continuación, en la tabla 10, se presentan los ángulos que generan el registro de aceleración máxima para cada uno de los 30 sismos analizados.

Tabla 10*Ángulos que dan el registro de aceleración máxima*

N°	Fecha	Ubicación	Estación	Ángulo (°)	Valor Máximo de Aceleración (g)
1	1970_05_31	Lima	Parque de la Reserva	62	0.11342
2	2001_06_23	Moquegua	César Vizcarra Vargas	45	0.16050
3	2001_07_07	Arequipa	UNSA	44	0.32470
4	2005_06_13	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	43	0.11865
5	2007_08_15	Lima	Jorge Alva Hurtado	161	0.07978
6	2010_05_05	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	89	0.19373
7	2011_04_02	Tacna	Alberto Giesecke Matto	172	0.00660
8	2012_05_14	Tacna	Universidad Privada de Tacna	15	0.19008
9	2013_09_25	Lima	Decanato FIC-UNI	166	0.00374
10	2014_03_23	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	166	0.00977
11	2014_04_01	Tacna	Alberto Giesecke Matto	26	0.08053
12	2015_03_22	Tacna	Municipalidad de Ciudad Nueva	38	0.06340
13	2017_06_05	Piura	SENCICO	76	0.01205
14	2017_06_24	Tacna	SENCICO	48	0.00378
15	2017_07_17	Arequipa	SENCICO	112	0.04644
16	2017_10_10	Tacna	SENCICO	114	0.11997
17	2018_01_14	Tacna	SENCICO	90	0.00648
18	2019_04_11	Lima	Facultad de Ingeniería Civil, UNFV	117	0.00778
19	2019_05_26	Iquitos	SENCICO	18	0.08546
20	2021_07_30	Piura	SENCICO	49	0.19717
21	2021_11_28	La Libertad	SENCICO	76	0.03573
22	2022_02_03	Trujillo	SENCICO	2	0.00818
23	2022_05_10	Tacna	SENCICO	78	0.00475
24	2022_05_26	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	129	0.01868
25	2024_01_20	Ucayali	SENCICO	0	0.00237
26	2024_01_28	Ucayali	UNIDAD DE POSGRADO DE LA FIC-UNI	150	0.00747
27	2024_06_28	Ica	UNIDAD DE POSGRADO DE LA FIC-UNI	84	0.05425
28	2024_06_29	Ica	UNIDAD DE POSGRADO DE LA FIC-UNI	87	0.00801
29	2024_07_18	Tacna	SENCICO	77	0.00697
30	2024_11_05	Ica	SENCICO	40	0.04791

Nota. Además del ángulo, se presenta el valor máximo de aceleración, expresado en unidades de gravedad (g), obtenido tras la combinación lineal para cada sismo

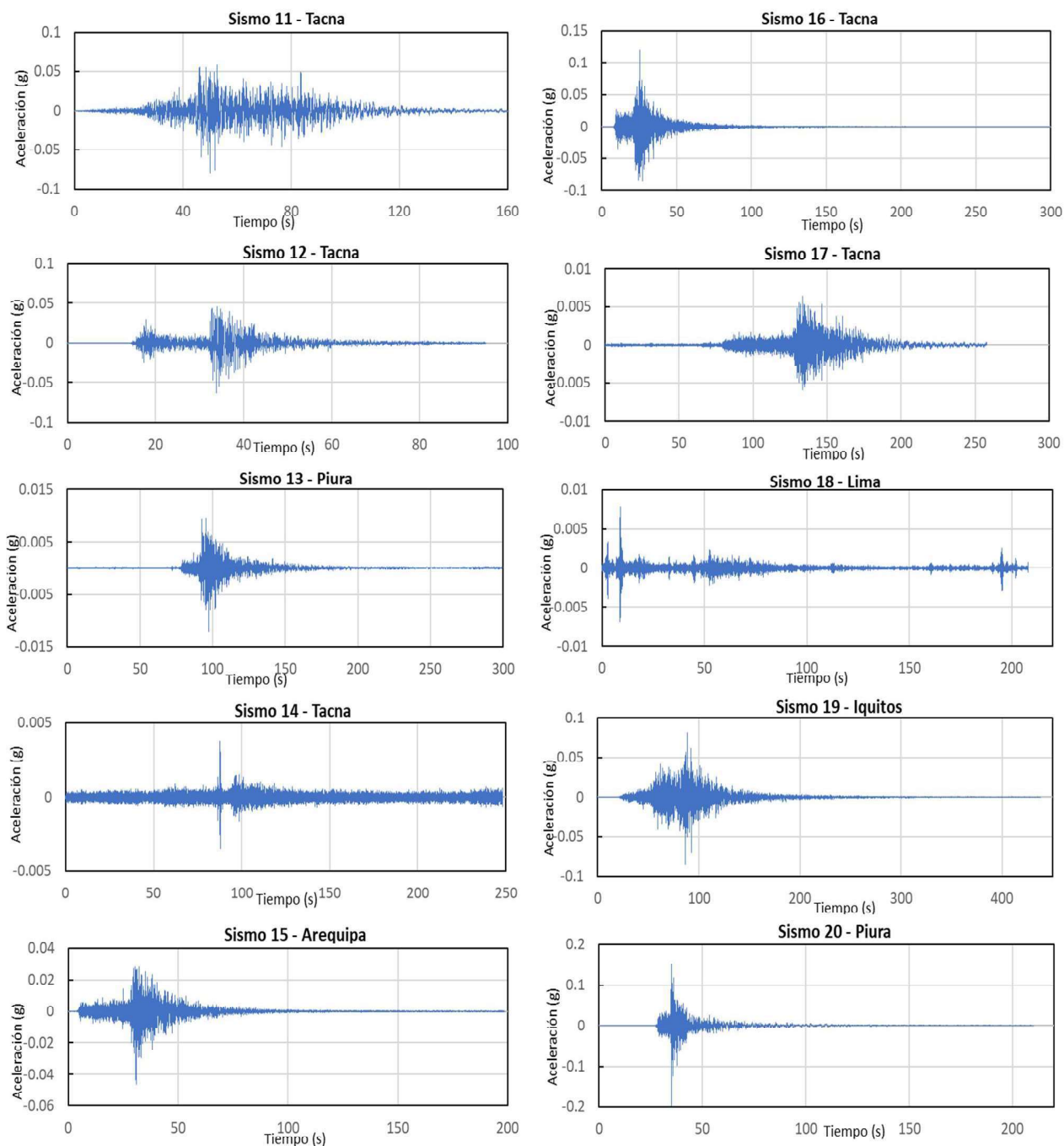
Inicialmente, se intentó realizar el procedimiento en Excel; sin embargo, debido a la gran cantidad de datos en cada registro sísmico, este método resultó tedioso y poco práctico. Por ello, se optó por desarrollar un código basado en la representación matemática y las indicaciones mencionadas anteriormente. Dicho código fue implementado en el software MATLAB, lo que permitió determinar de manera más eficiente el ángulo θ que genera el registro de aceleración más crítico, es decir, aquel con mayor amplitud. Este procedimiento se aplicó a los 30 registros sísmicos, obteniéndose así los "registros de dirección máxima" correspondientes. El código utilizado se incluye en el anexo 8, y los registros se presentan en las figuras 24, 25 y 26.

Figura 24*Registros de dirección máxima – 1 al 10*

Nota. Se observa los registros de aceleración de dirección máxima obtenidos para los sismos 1 al 10, expresados en función del tiempo.

Figura 25

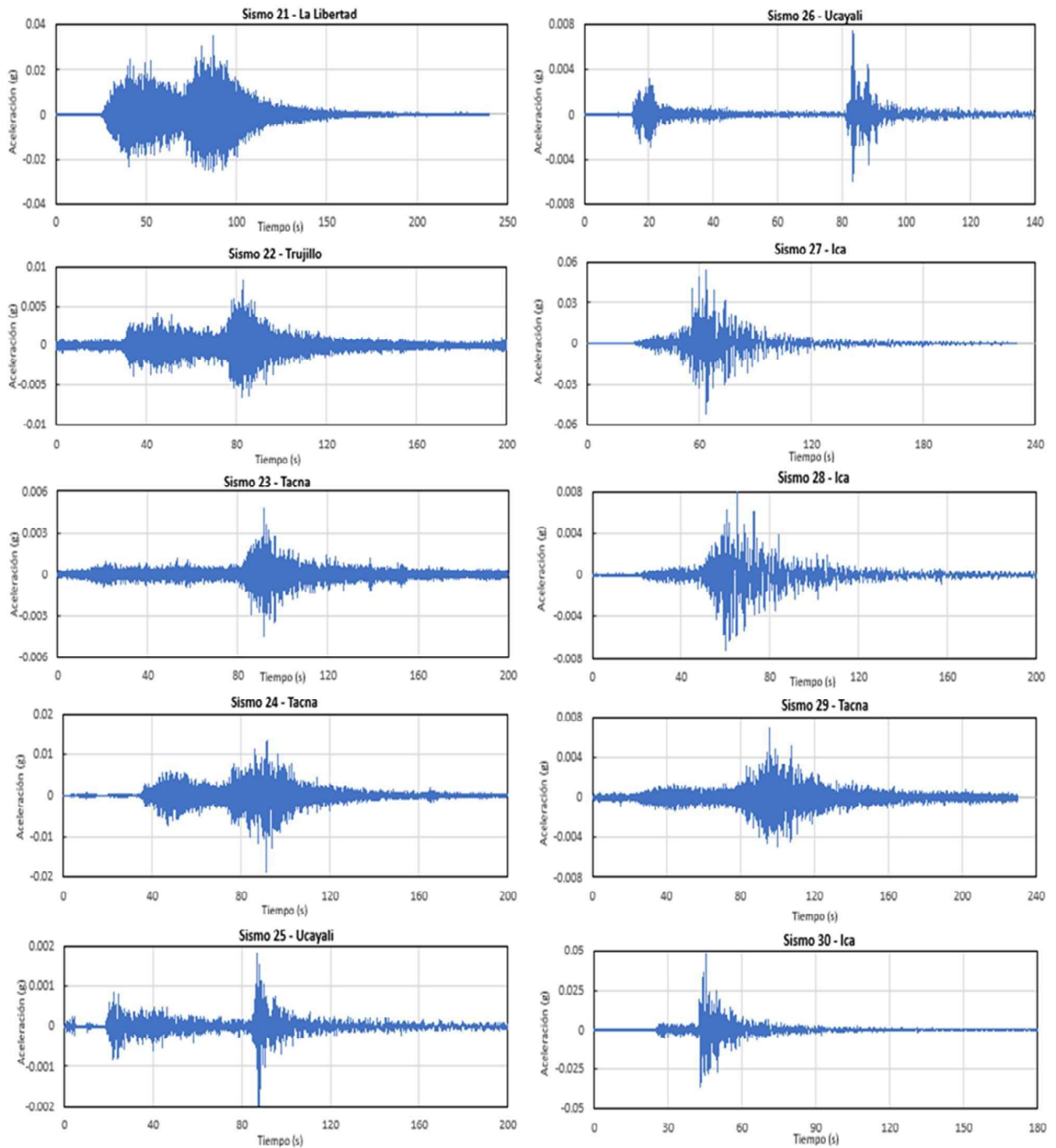
Registros de dirección máxima – 11 al 20



Nota. Se observa los registros de aceleración de dirección máxima obtenidos para los sismos 11 al 20, expresados en función del tiempo.

Figura 26

Registros de dirección máxima – 21 al 30



Nota. Se observa los registros de aceleración de dirección máxima obtenidos para los sismos 21 al 30, expresados en función del tiempo.

Para obtener el “**espectro de dirección máxima**” con los registros previamente calculados, se desarrolló un código en MATLAB. Al principio, se consideró el uso del software SeismoSignal; sin embargo, este no permitió exportar los datos del espectro, lo que motivó la creación del código propio, el cual se presenta en el anexo 9.

El algoritmo implementado utiliza el método de Nigam-Jennings, basado en fórmulas de recurrencia. Este método calcula la velocidad, el desplazamiento y la aceleración en el momento de tiempo t_{i+1} , empleando los valores previamente obtenidos en t_i .

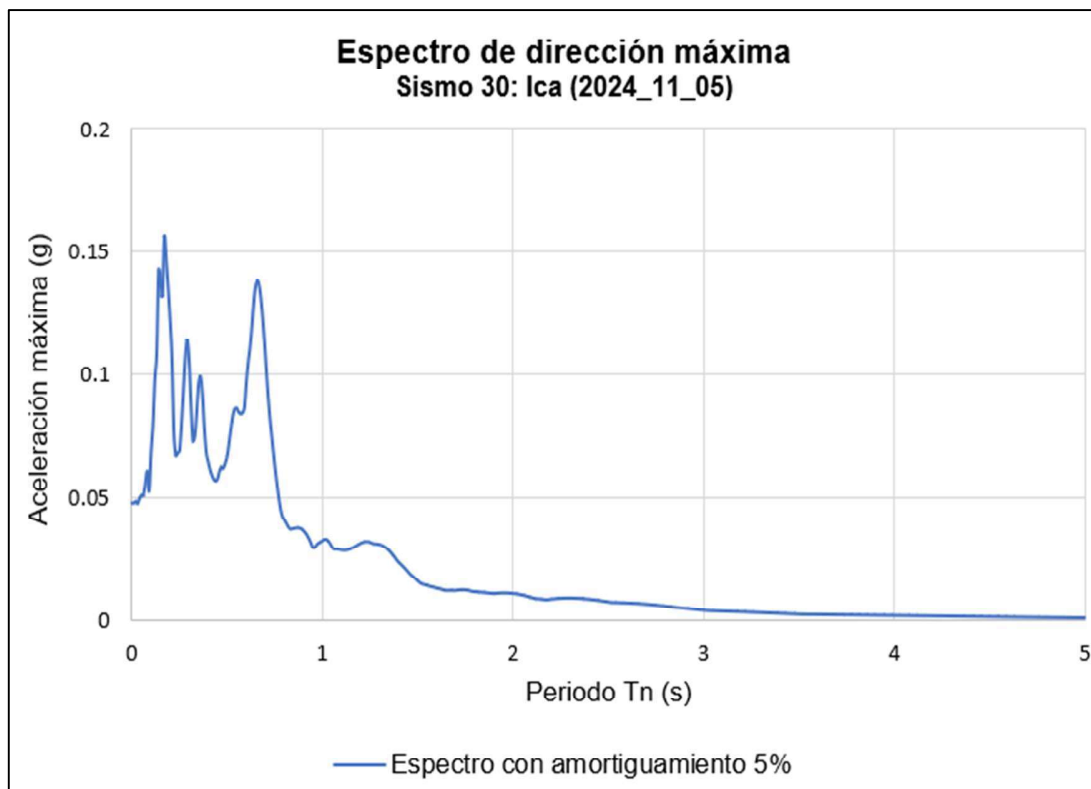
Entre las consideraciones adoptadas:

- Amortiguamiento: 5 % (valor típico para estructuras de concreto armado).
- Periodo natural (T_n): Se evaluó desde 0 hasta 5, con un paso de 0.01 segundos.

Este procedimiento fue aplicado a cada uno de los 30 sismos analizados, generándose para cada registro un archivo .txt con los resultados correspondientes. A continuación, se tiene la figura 27, el cual muestra la gráfica del espectro de dirección máxima del sismo 30 de Ica.

Figura 27

Espectro de dirección máxima del sismo 30: Ica (2024_11_05)



Nota. Se observa el espectro de dirección máxima para el sismo 30 (Ica), considerando un amortiguamiento del 5 %, valor comúnmente empleado en estructuras de concreto armado.

4.4.3. Escalamiento de Sismos

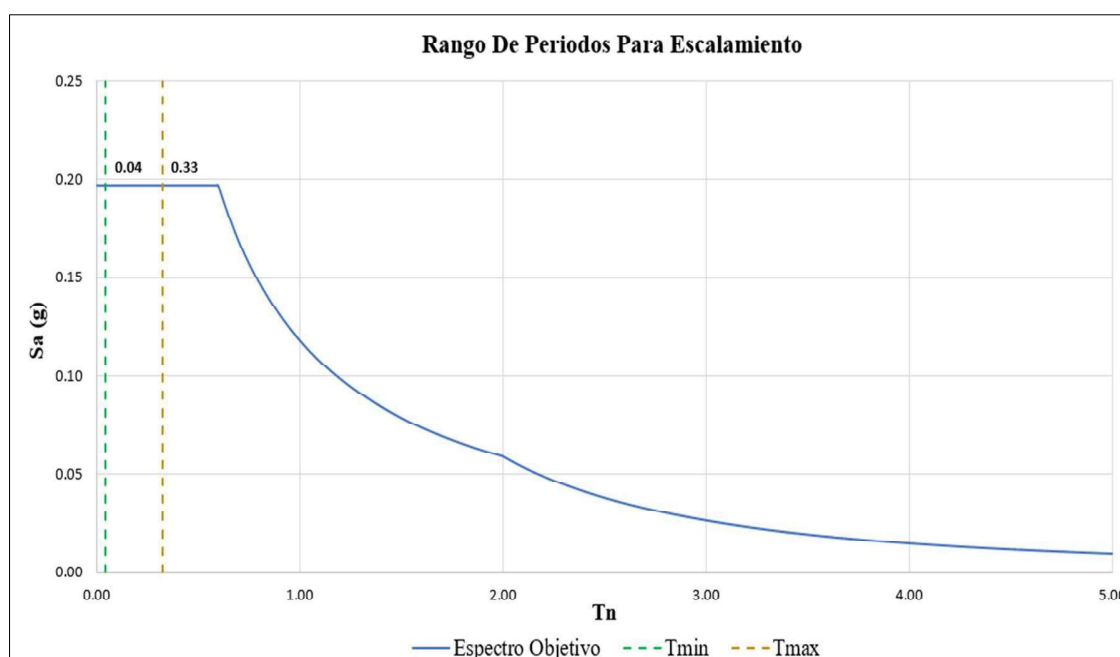
Previo a realizar el escalamiento de los sismos, es necesario definir un rango de períodos de escalamiento. Para ello, la Norma ASCE 7-22 (artículo 16.2.3.1) y la Norma E.030 (artículo 4.7.1), establecen criterios para definir el rango de períodos de vibración que deben tomarse en cuenta en el estudio del comportamiento dinámico de edificaciones.

En consecuencia y de acuerdo a la información brindada por ambas normas, se adoptó un límite inferior ($T_{\text{mín}}$) de $0.2 T$ y un límite superior ($T_{\text{máx}}$) de $1.5 T$, donde T representa el período fundamental de la estructura. Para una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros, el período fundamental obtenido mediante OpenSeesPy fue $T = 0,217$ s, obteniendo como resultado el siguiente rango de periodo (figura 28).

- Límite inferior = $T_{\text{mín}} = 0,2 T = 0,04$ s
- Límite superior = $T_{\text{máx}} = 1,5 T = 0,33$ s

Figura 28

Rango de periodo para escalamiento



Nota. El gráfico muestra el rango de períodos utilizados ($T_{\text{mín}} = 0,04$ y $T_{\text{máx}} = 0,33$) para el escalamiento de movimientos sísmicos en función del espectro objetivo.

Para la escala de amplitud, se consideraron el artículo 16.2.3.2 de la Norma ASCE 7-22 y el FEMA P-1051 (2015), que coinciden en que el escalamiento de registros sísmicos es clave para

ajustar los movimientos del suelo al peligro sísmico esperado, siendo el objetivo que el espectro de respuesta promedio iguale o supere el espectro objetivo dentro de un determinado rango de períodos, sin caer por debajo del 90 %.

Si bien ninguna norma establece un límite específico para el factor de escalamiento, se recomienda evitar valores excesivamente altos, salvo justificación técnica, ya que un escalado inadecuado puede distorsionar la respuesta estructural, por lo que es fundamental mantener un rango moderado, como sugieren Wang et al. (2015) y Huang et al. (2017).

Tomando en consideración todo lo anterior, el proceso de escalamiento se llevó a cabo utilizando una hoja de cálculo en Excel (Anexo 10). Se calcularon dos factores de escala (F.E. 1 y F.E. 2), por sismo, los cuales se obtuvieron dividiendo el espectro objetivo entre el espectro de dirección máxima, ambos en unidades de gravedad (g), correspondientes para los límites inferior (T_{min}) y superior ($T_{máx}$). Finalmente, se seleccionó el mayor de los dos factores de escala para aplicar al registro sísmico.

Este procedimiento se realizó para cada uno de los 30 sismos no impulsivos seleccionados con anterioridad (tabla 9). Sin embargo, al evaluar los factores de escala correspondientes a cada uno de ellos, se descartaron aquellos registros que presentan factores de escala excesivamente altos, ya que no cumplen con el criterio de selección adoptado (factores de escala moderados). De este modo, se eligieron 11 sismos cuyos factores se encuentran dentro de lo que se considera un rango aceptable. Esta cantidad cumple estrictamente con el requisito mínimo establecido en la Norma ASCE 7-22 (sección 16.2.2), la cual exige al menos 11 movimientos sísmicos para el análisis.

Estos registros, ahora reordenados con una numeración consecutiva (tabla 11), serán empleados en las siguientes etapas de la investigación.

Tabla 11

Sismos filtrados según factor de escala

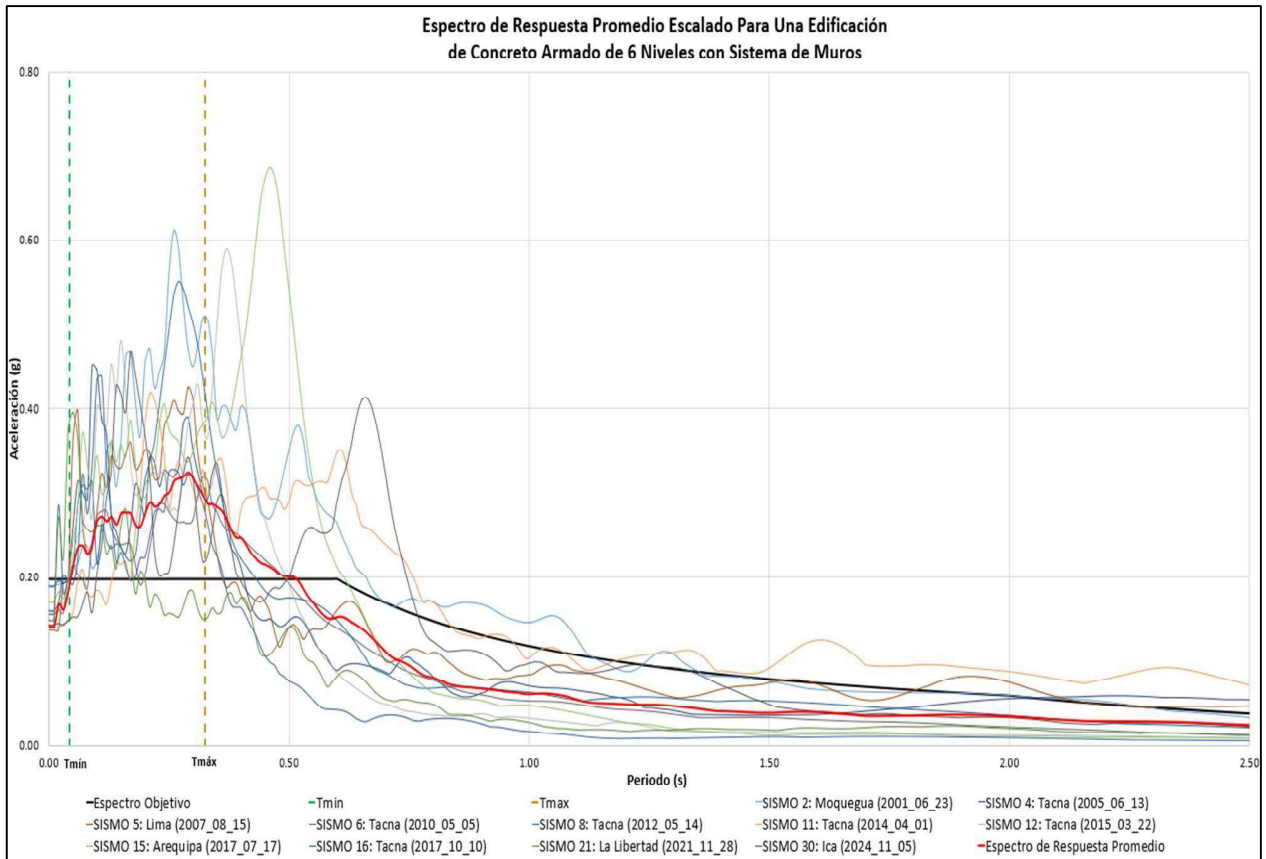
N°	Sismo Original N°	Fecha	Ubicación	Estación	Factor Escala (F.E.)
1	2	2001_06_23	Moquegua	César Vizcarra Vargas	1.18
2	4	2005_06_13	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	1.35
3	5	2007_08_15	Lima	Jorge Alva Hurtado	1.73
4	6	2010_05_05	Tacna	Jorge Basadre Grohmann University	0.81
5	8	2012_05_14	Tacna	Universidad Privada de Tacna	0.99
6	11	2014_04_01	Tacna	Alberto Giesecke Matto	1.75
7	12	2015_03_22	Tacna	Municipalidad de Ciudad Nueva	2.48
8	15	2017_07_17	Arequipa	SENCICO	3.67
9	16	2017_10_10	Tacna	SENCICO	1.25
10	21	2021_11_28	La Libertad	SENCICO	4.00
11	30	2024_11_05	Ica	SENCICO	3.00

Nota. La tabla presenta los 11 sismos no impulsivos seleccionados de un total de 30, que cumplen con un factor de escala moderado, para continuar con el desarrollo de la investigación.

Finalmente, se elaboró el espectro de respuesta promedio correspondiente a los 11 sismos seleccionados, para verificar que coincidiera o superara el espectro objetivo dentro del rango de períodos previamente definido, asegurando que no cayera por debajo del 90 % del espectro objetivo. Como se puede observar en la figura 29, esto se cumplió.

Figura 29

Espectro de respuesta promedio de los 11 sismos no impulsivos seleccionados



Nota. La figura presenta el espectro de respuesta promedio (en rojo) de los 11 sismos seleccionados, que excede al espectro objetivo dentro del rango de períodos establecido.

4.5. Análisis Tiempo-Historia

El estudio mediante el análisis tiempo-historia permite obtener una respuesta detallada de la estructura frente a cargas dinámicas, como las generadas por movimientos sísmicos. Mediante este método, se puede analizar la respuesta de la edificación en cuanto a desplazamientos, distorsiones y deformaciones. Seguidamente, se presentan los resultados alcanzados al realizar este análisis.

4.5.1. Desplazamientos

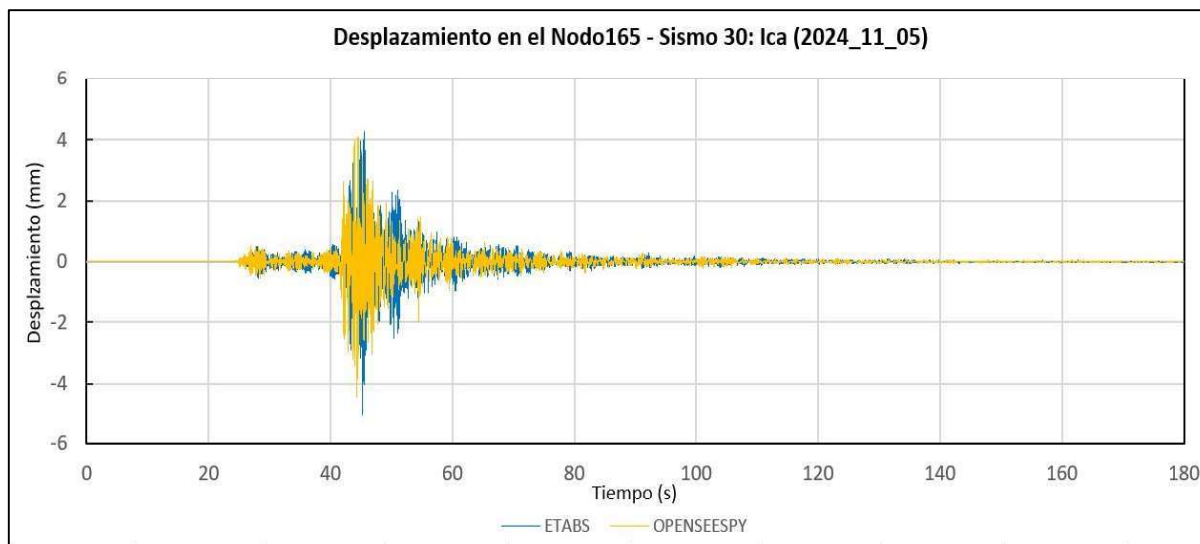
Para esta etapa de la investigación, se desarrolló un código en OpenSeesPy (anexo 11), el cual permite ingresar las aceleraciones del registro sísmico de dirección máxima para cada sismo, junto con su factor de escala. El programa procesa estos datos y calcula los desplazamientos máximos absolutos en cada piso de la estructura. Adicionalmente, el código genera dos gráficas: una de desplazamiento vs tiempo y la segunda de desplazamientos máximos absolutos por piso, siendo ambas de suma importancia para lograr una mejor comprensión del comportamiento de la estructura ante un sismo no impulsivo.

Para efectos prácticos, se analizará como actúa la estructura tras ser sometida al sismo 30: Ica (2024_11_05), uno de los 11 sismos seleccionados con factores de escala moderados mostrados en la Tabla 11.

Como un análisis previo, se estudió el comportamiento del desplazamiento en el nodo 165, ubicado en el sexto nivel de la edificación y situado en la zona de volado, considerada crítica debido a la posibilidad de registrar mayores desplazamientos. Como resultado, en la figura 30, se evidencia que los desplazamientos en el nodo 165 son más elevados en los resultados calculados con ETABS en comparación con OpenSeesPy, tras la implementación del código en dicha herramienta de post-procesamiento.

Figura 30

Desplazamiento del nodo 165 en OpenSeesPy y ETABS – sismo 30: Ica (2024_11_05)



Nota. La figura muestra la comparación del desplazamiento en el nodo 165 de la edificación multifamiliar analizada, sometida al sismo 30: Ica (2024-11-05). Se observan los resultados obtenidos mediante OpenSeesPy (color amarillo) y ETABS (color azul).

Adicionalmente, en la tabla 12, se presentan los desplazamientos máximos absolutos registrados en cada nivel de la estructura tras ser sometida al sismo 30: Ica (2024_11_05). Por otro lado, en la figura 31, se presenta una representación gráfica de la variación de los desplazamientos máximos por nivel, tanto en OpenSeesPy como en ETABS, permitiendo visualizar con mayor claridad la variación de los desplazamientos entre estos dos programas.

Tabla 12

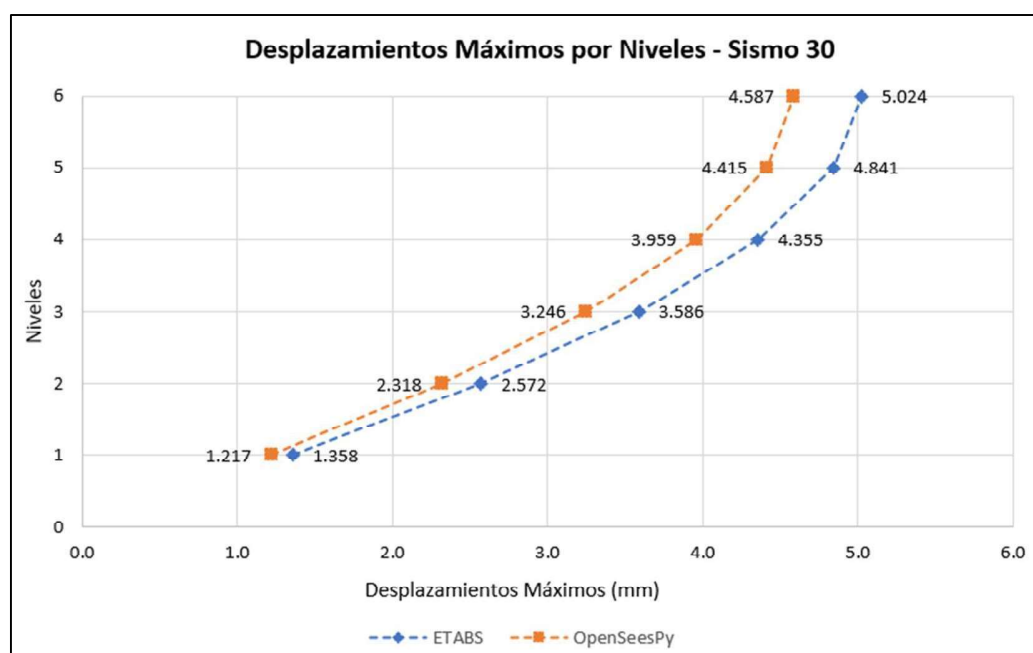
Desplazamientos máximos registrados por niveles (mm) – sismo 30: Ica (2024_11_05)

Nivel	ETABS (mm)	OPENSEESPY (mm)
1	1.358	1.217
2	2.572	2.318
3	3.586	3.246
4	4.355	3.959
5	4.841	4.415
6	5.024	4.587

Nota. La tabla presenta los desplazamientos máximos absolutos registrados en cada uno de los seis niveles de la estructura, obtenidos a partir del análisis realizado en OpenSeesPy y ETABS.

Figura 31

Desplazamientos máximos por niveles en OpenSeesPy y ETABS – sismo 30: Ica (2024_11_05)



Nota. La figura muestra los resultados presentados en la tabla 12, donde se evidencia la diferencia entre los desplazamientos obtenidos con OpenSeesPy (línea naranja) y ETABS (línea azul).

El mismo análisis se llevó a cabo para los 10 sismos restantes de los 11 seleccionados mostrados en la tabla 11. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 13 y 14, donde se reportan los desplazamientos máximos absolutos por nivel, calculados tras la inserción de los registros sísmicos en el modelo desarrollado en OpenSeesPy. Asimismo, estos resultados fueron representados gráficamente de forma conjunta en la figura 32, lo que permite un análisis más detallado del comportamiento estructural frente a los sismos evaluados.

Tabla 13

Desplazamientos máximos por nivel en los sismos 2, 4, 5, 6, 8 y 11 en OpenSeesPy

Nivel	SISMO 2	SISMO 4	SISMO 5	SISMO 6	SISMO 8	SISMO 11
	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)
1	1.001	1.386	1.364	0.985	1.318	1.680
2	1.866	2.657	2.628	1.834	2.470	3.212
3	2.569	3.740	3.715	2.558	3.422	4.514
4	3.093	4.568	4.555	3.125	4.138	5.511
5	3.420	5.091	5.094	3.489	4.587	6.148
6	3.542	5.287	5.297	3.627	4.754	6.388

Nota. La tabla presenta los desplazamientos máximos absolutos por nivel, obtenidos a partir del análisis dinámico tipo tiempo-historia con los primeros 6 registros sísmicos de los 11 seleccionados en OpenSeesPy.

Tabla 14

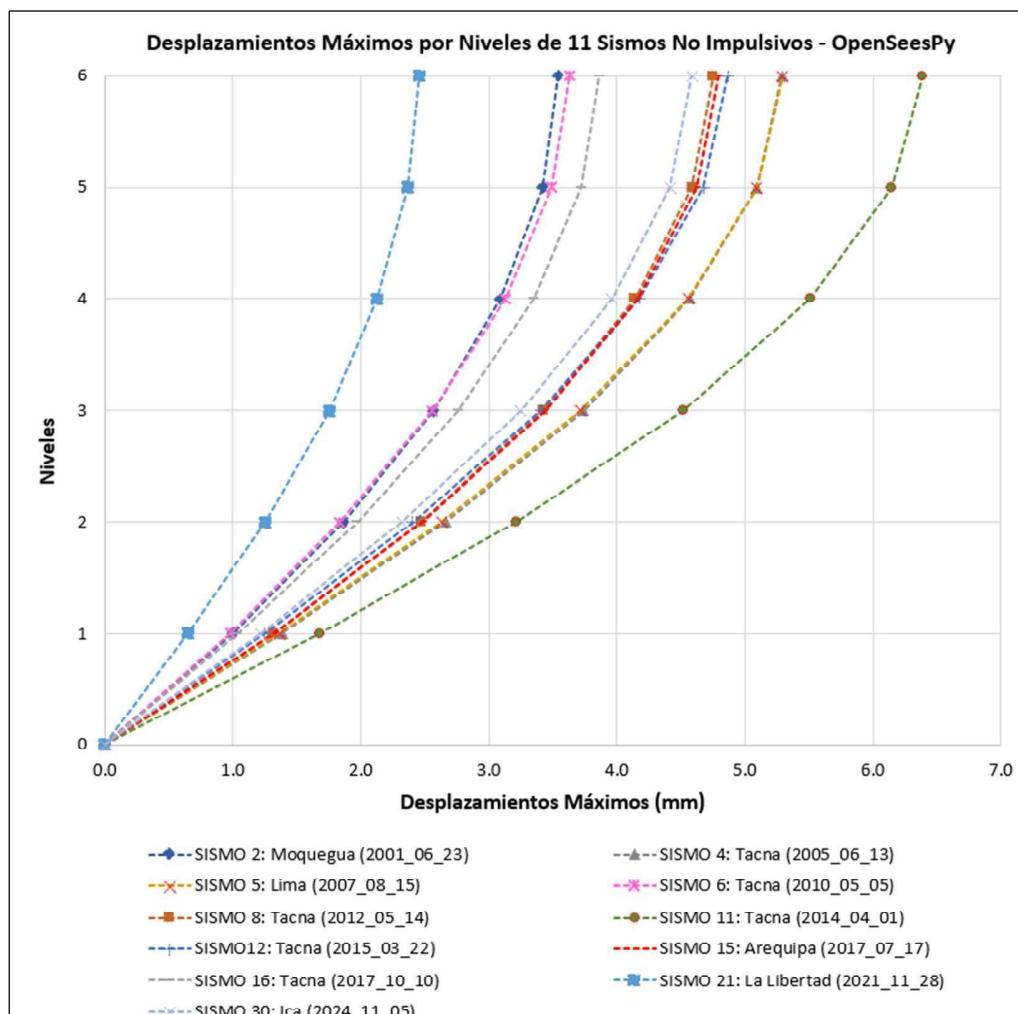
Desplazamientos máximos por nivel en los sismos 12, 15, 16, 21 y 30 en OpenSeesPy

Nivel	SISMO 12	SISMO 15	SISMO 16	SISMO 21	SISMO 30
	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)	Desplazamientos (mm)
1	1.250	1.320	1.036	0.650	1.217
2	2.405	2.478	1.974	1.250	2.318
3	3.400	3.437	2.758	1.751	3.246
4	4.174	4.161	3.350	2.127	3.959
5	4.675	4.620	3.724	2.366	4.415
6	4.866	4.791	3.864	2.456	4.587

Nota. La tabla presenta los desplazamientos máximos absolutos por nivel, obtenidos a partir del análisis dinámico tipo tiempo-historia de los últimos 5 registros sísmicos de los 11 seleccionados en OpenSeesPy.

Figura 32

Desplazamientos máximos por nivel en los 11 sismos no impulsivos seleccionados en OpenSeesPy



Nota. La figura interpreta los resultados de las tablas 13 y 14, en donde se observa los desplazamientos máximos por nivel obtenidos en OpenSeesPy para los 11 sismos no impulsivos seleccionados, evidenciando mayores desplazamientos en los niveles superiores y variabilidad según el sismo analizado.

4.5.2. Derivas de Piso

Como parte del análisis dinámico, la tabla 15 detalla las derivas de piso generadas en cada nivel de la estructura durante el sismo 30: Ica (2024_11_05). Por su parte, la figura 33 contrasta los resultados obtenidos con OpenSeesPy y ETABS, permitiendo visualizar con mayor claridad la variación de los resultados entre estos dos programas.

Tabla 15

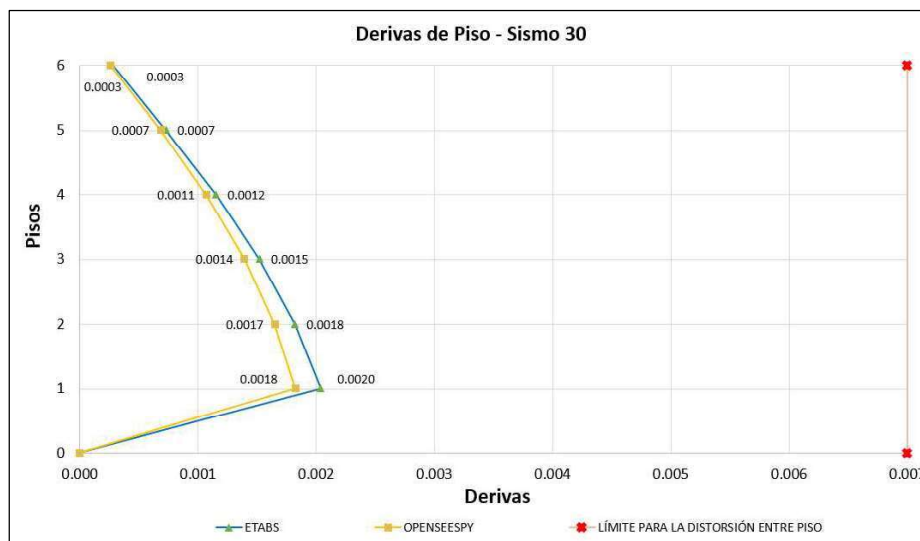
Derivas de piso en OpenSeesPy y ETABS – sismo 30: Ica (2024_11_05)

Nivel	ETABS	OPENSEESPY
1	0.0020	0.0018
2	0.0018	0.0017
3	0.0015	0.0014
4	0.0012	0.0011
5	0.0007	0.0007
6	0.0003	0.0003

Nota. La tabla presenta las derivas en cada uno de los seis niveles de la estructura, obtenidos a partir del análisis realizado en OpenSeesPy y ETABS.

Figura 33

Derivas de piso OpenSeesPy y ETABS – sismo 30: Ica (2024_11_05)



Nota. La figura muestra los resultados presentados en la tabla 15, donde se evidencia la diferencia entre las derivas obtenidos con OpenSeesPy (línea amarilla) y ETABS (línea azul).

Asimismo, basándonos en lo expuesto en las bases teóricas (ítem 2.2.2.2.4), y considerando que la edificación analizada es de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros ($R = 6$), se evaluó su comportamiento frente a los 11 sismos no impulsivos de la tabla 11, mediante la realización de un código en OpenSeesPy (Anexo 12), obteniéndose los siguientes resultados que se muestran en las tablas 16, 17 y 18.

Tabla 16*Derivas de piso de los sismos 2, 4 y 5 en OpenSeesPy*

SISMO 2					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura (mm)	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R			
1	1.001	4.506	3000	0.0015	CUMPLE
2	1.866	8.395	3000	0.0013	CUMPLE
3	2.569	11.562	3000	0.0011	CUMPLE
4	3.093	13.917	3000	0.0008	CUMPLE
5	3.420	15.391	3000	0.0005	CUMPLE
6	3.542	15.940	3000	0.0002	CUMPLE
SISMO 4					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura (mm)	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R			
1	1.386	6.239	3000	0.0021	CUMPLE
2	2.657	11.958	3000	0.0019	CUMPLE
3	3.740	16.830	3000	0.0016	CUMPLE
4	4.568	20.554	3000	0.0012	CUMPLE
5	5.091	22.910	3000	0.0008	CUMPLE
6	5.287	23.793	3000	0.0003	CUMPLE
SISMO 5					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura (mm)	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R			
1	1.364	6.139	3000	0.0020	CUMPLE
2	2.628	11.825	3000	0.0019	CUMPLE
3	3.715	16.719	3000	0.0016	CUMPLE
4	4.555	20.499	3000	0.0013	CUMPLE
5	5.094	22.921	3000	0.0008	CUMPLE
6	5.297	23.834	3000	0.0003	CUMPLE

Nota. La tabla presenta las derivas de piso calculadas en OpenSeesPy para los sismos 2, 4 y 5, evidenciando que en ningún caso se supera el límite establecido por la normativa vigente.

Tabla 17*Derivas de piso de los sismos 6, 8, 11 y 12 en OpenSeesPy*

SISMO 6					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura (mm)	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R			
1	0.985	4.431	3000	0.0015	CUMPLE
2	1.834	8.253	3000	0.0013	CUMPLE
3	2.558	11.511	3000	0.0011	CUMPLE
4	3.125	14.061	3000	0.0009	CUMPLE
5	3.489	15.700	3000	0.0005	CUMPE
6	3.627	16.322	3000	0.0002	CUMPLE
SISMO 8					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura (mm)	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R			
1	1.318	5.930	3000	0.0020	CUMPLE
2	2.470	11.115	3000	0.0017	CUMPLE
3	3.422	15.400	3000	0.0014	CUMPLE
4	4.138	18.619	3000	0.0011	CUMPLE
5	4.587	20.640	3000	0.0007	CUMPLE
6	4.754	21.395	3000	0.0003	CUMPLE
SISMO 11					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura (mm)	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R			
1	1.680	7.558	3000	0.0025	CUMPLE
2	3.212	14.456	3000	0.0023	CUMPLE
3	4.514	20.311	3000	0.0020	CUMPLE
4	5.511	24.798	3000	0.0015	CUMPLE
5	6.148	27.664	3000	0.0010	CUMPLE
6	6.388	28.745	3000	0.0004	CUMPLE
SISMO 12					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura (mm)	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R			
1	1.250	5.624	3000	0.0019	CUMPLE
2	2.405	10.823	3000	0.0017	CUMPLE
3	3.400	15.298	3000	0.0015	CUMPLE
4	4.174	18.782	3000	0.0012	CUMPLE
5	4.675	21.039	3000	0.0008	CUMPLE
6	4.866	21.897	3000	0.0003	CUMPLE

Nota. La tabla presenta las derivas de piso calculadas en OpenSeesPy para los sismos 6, 8, 11 y 12, evidenciando que en ningún caso se supera el límite establecido por la normativa vigente.

Tabla 18*Derivas de piso de los sismos 15, 16, 21 y 30 en OpenSeesPy*

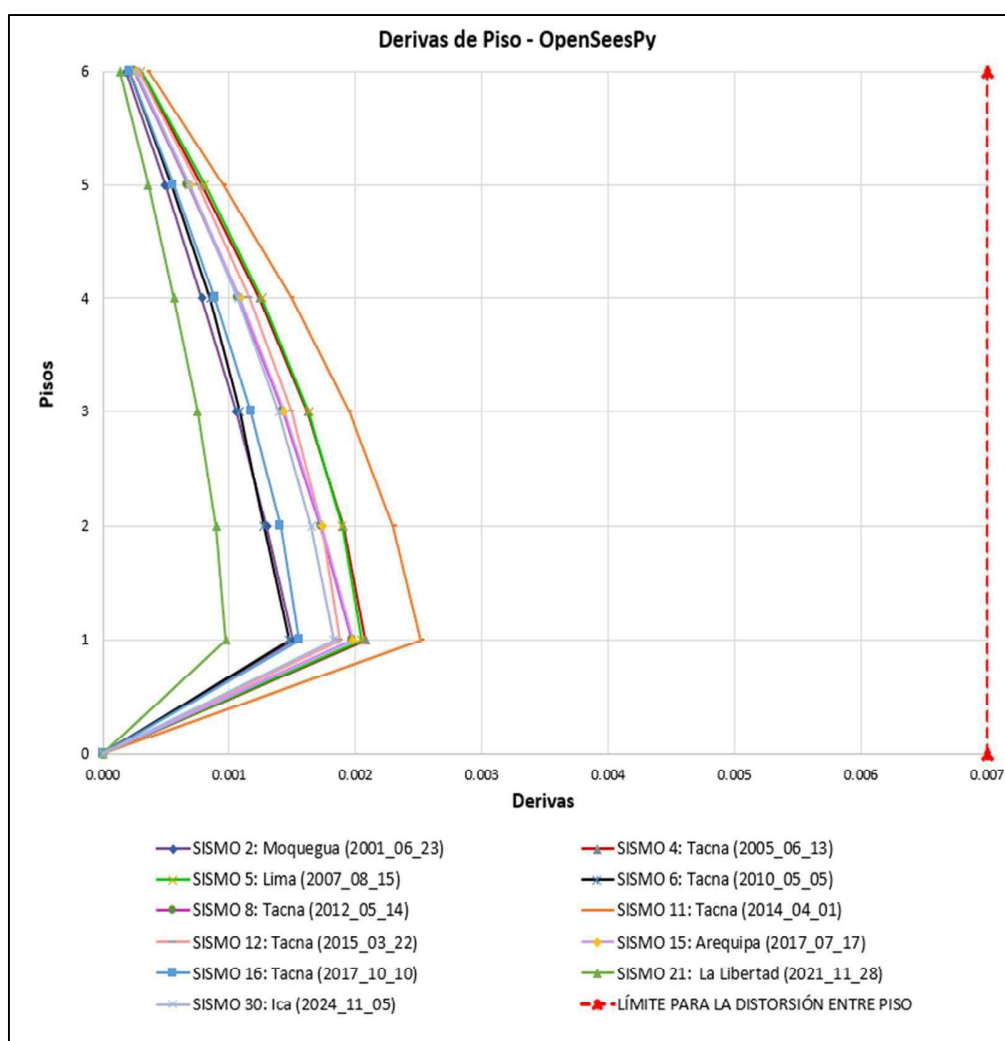
SISMO 15					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R	(mm)		
1	1.320	5.942	3000	0.0020	CUMPLE
2	2.478	11.151	3000	0.0017	CUMPLE
3	3.437	15.467	3000	0.0014	CUMPLE
4	4.161	18.726	3000	0.0011	CUMPLE
5	4.620	20.788	3000	0.0007	CUMPLE
6	4.791	21.561	3000	0.0003	CUMPLE
SISMO 16					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R	(mm)		
1	1.036	4.662	3000	0.0016	CUMPLE
2	1.974	8.882	3000	0.0014	CUMPLE
3	2.758	12.411	3000	0.0012	CUMPLE
4	3.350	15.075	3000	0.0009	CUMPLE
5	3.724	16.758	3000	0.0006	CUMPLE
6	3.864	17.388	3000	0.0002	CUMPLE
SISMO 21					
Nivel	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R	(mm)		
1	0.650	2.927	3000	0.0010	CUMPLE
2	1.250	5.624	3000	0.0009	CUMPLE
3	1.751	7.878	3000	0.0008	CUMPLE
4	2.127	9.572	3000	0.0006	CUMPLE
5	2.366	10.646	3000	0.0004	CUMPLE
6	2.456	11.051	3000	0.0001	CUMPLE
SISMO 30					
Nivel / Piso	Desp. Elástico	Desp. Inelástico	Altura	Derivas	< 0.007
	X (mm)	0.75 x R	(mm)		
1	1.217	5.479	3000	0.0018	CUMPLE
2	2.318	10.429	3000	0.0017	CUMPLE
3	3.246	14.609	3000	0.0014	CUMPLE
4	3.959	17.815	3000	0.0011	CUMPLE
5	4.415	19.868	3000	0.0007	CUMPLE
6	4.587	20.643	3000	0.0003	CUMPLE

Nota. La tabla presenta las derivas de piso calculadas en OpenSeesPy para los sismos 15, 16, 21 y 30, evidenciando que en ningún caso se supera el límite establecido por la normativa vigente.

Por otra parte, estos resultados fueron representados gráficamente en la figura 34, donde se observan las derivas de piso obtenidas en OpenSeesPy, permitiendo verificar el cumplimiento de los límites normativos frente a los distintos registros sísmicos.

Figura 34

Derivas de piso de los sismos 11 sismos seleccionados en OpenSeesPy



Nota. La figura muestra los resultados de las Tablas 16, 17 y 18, donde se representan las derivas de piso obtenidas del análisis dinámico final inelástico en OpenSeesPy para los 11 sismos no impulsivos seleccionados. Se observa que ninguno de los sismos supera el límite máximo permitido para la distorsión de piso (indicado en rojo) en edificaciones de concreto armado.

Capítulo V

Discusión de Resultados

5.1. Hipótesis General

De acuerdo a la hipótesis general: “Mediante un adecuado análisis dinámico en OpenSeesPy se podrá predecir con precisión la respuesta ante sismos no impulsivos de edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros en Tacna 2025”, se menciona lo siguiente:

- El análisis dinámico realizado en OpenSeesPy permitió evaluar con precisión la respuesta sísmica de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros en Tacna, sometida a registros de sismos no impulsivos. Los resultados obtenidos al realizar este análisis, demostraron que esta herramienta de post procesamiento es capaz de predecir el comportamiento estructural bajo este tipo de sismos.
- Méndez y Olivares (2024) realizaron un análisis dinámico en una edificación con sistema de pórticos utilizando OpenSeesPy, comparando los resultados obtenidos con los del software ETABS. Concluyeron que OpenSeesPy presenta un margen mínimo de error, mostrando resultados ligeramente menores pero confiables. En la investigación, aunque se emplea un sistema estructural distinto basado en muros estructurales y un análisis tiempo-historia, se observa también una alta concordancia entre los resultados de OpenSeesPy y ETABS, lo que confirma su fiabilidad para este tipo de análisis bajo las condiciones planteadas.

5.2. Hipótesis Específicas

5.2.1. Primera Hipótesis

De acuerdo a la primera hipótesis específica: “Mediante el cálculo del Índice de Impulsividad, se identificarán los sismos no impulsivos, permitiendo así realizar un análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros”, se menciona lo siguiente:

- En esta etapa, se calculó el índice de impulsividad para diversos registros sísmicos del Perú, con énfasis en la región de Tacna. A partir de este análisis, se seleccionaron 30 registros que, según su índice ($I_p > 30$), fueron clasificados como no impulsivos (tabla 9).
- Posteriormente, una vez identificados estos registros, se procedió a su ajuste mediante escalamiento, utilizando como referencia el espectro de diseño definido por la Norma Técnica E.030 y los espectros de dirección máxima correspondientes a cada registro.
- Para este fin, y antes de realizar el escalamiento, se determinó el espectro objetivo o de diseño conforme a la Norma E.030, considerando los parámetros asociados al uso de la edificación y a la zona sísmica, cuyos resultados se presentan gráficamente en la Figura 23.
- Por otro lado, se cumplieron los parámetros establecidos en el artículo 16.2.3.2 de la norma ASCE-7-22 para la obtención del espectro de dirección máxima. Durante este proceso, se determinaron los ángulos (tabla 10) que generan la aceleración máxima para cada uno de los 30 registros sísmicos, obteniendo así los registros de dirección máxima

(figuras 24, 25, 26). A partir de estos registros, se construyó el espectro de dirección máxima correspondiente para cada sismo, permitiendo evaluar la respuesta más crítica de la estructura frente a dichas acciones sísmicas.

- Los registros sísmicos fueron escalados siguiendo los criterios establecidos en las normativas ASCE 7-22 y E.030, definiendo un rango de períodos de escalamiento entre $T_{mín} = 0.04$ s y $T_{máx} = 0.33$ s en el espectro objetivo. Asimismo, los resultados demostraron que el espectro de respuesta promedio de los sismos escalados superó en un 90 % al espectro normativo en todo el intervalo de periodos definido, validando el cumplimiento sísmico (figura 29).
- Finalmente, de los 30 registros iniciales, se seleccionaron 11 sismos, cuyos factores de escala fueron moderados, descartando los 19 restantes debido a factores excesivamente altos que podrían comprometer la confiabilidad del análisis. Estos 11 registros escalados se utilizaron para realizar el análisis dinámico bajo condiciones adecuadas (ver tabla 11).
- En línea con estos resultados, Mendoza (2022) clasifica los sismos en impulsivos y no impulsivos siguiendo el método cuantitativo propuesto por Panella et al. (2013), adoptado también en esta investigación para asegurar consistencia con metodologías internacionalmente validadas. En su estudio, los valores de velocidad pico del suelo (PGV, cm/s) para sismos no impulsivos son significativamente menores que los de sismos impulsivos, con valores aproximados de 11,02 cm/s y 28,77 cm/s, respectivamente. De manera similar, en esta investigación, los valores de PGV para los sismos no impulsivos oscilan entre 10,40 cm/s y 28,30 cm/s, confirmando esta tendencia. Cabe destacar que, aunque el método de clasificación es el mismo, Mendoza presenta directamente la categorización sin mostrar los valores de LdV e I_p ; por ello, la

comparación se realizó mediante el PGV. Sin embargo, este parámetro no es determinante por sí solo para la clasificación, siendo el índice de impulsividad (I_p) un indicador más representativo y fiable para dicho propósito.

5.2.2. Segunda Hipótesis

De acuerdo a la segunda hipótesis específica: “Mediante el uso del lenguaje de programación Python, se podrá implementar un código en OpenSeesPy para realizar un análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros ante sismos no impulsivos”, se menciona lo siguiente:

- La implementación del lenguaje de programación Python junto con la biblioteca OpenSeesPy permitió desarrollar un código capaz de realizar el análisis dinámico de una edificación de concreto armado de seis niveles con sistema de muros ante sismos no impulsivos. Los resultados obtenidos facilitaron la evaluación de la respuesta estructural bajo distintos escenarios sísmicos, validando la metodología aplicada.
- Durante la etapa de modelado, se verificó que las propiedades de los materiales y las geometrías de los elementos estructurales cumplieran con las especificaciones técnicas del proyecto. Para los muros estructurales, se utilizaron las librerías ShellMITC4 (figura 16), y para vigas y columnas se empleó ElasticBeamColumn (figura 15), ambas disponibles en OpenSeesPy. Asimismo, se empleó la librería Matplotlib para la visualización tridimensional de la estructura modelada, asegurando una representación fiel del comportamiento estructural.

- Los resultados del análisis dinámico evidenciaron la eficacia del código desarrollado en OpenSeesPy para evaluar la respuesta estructural ante sismos no impulsivos. Se obtuvieron parámetros clave como desplazamientos y distorsiones (derivadas), destacando que el período fundamental calculado fue de $T = 0,217$ s, mientras que en ETABS se obtuvo $T = 0,216$ s (Tabla 7). Esta mínima diferencia respalda la precisión del modelo en OpenSeesPy y confirma la rigidez esperada en estructuras con muros estructurales.
- Por otro lado, se observó una correlación directa entre el tiempo de procesamiento y la duración de los registros sísmicos empleados. En particular, el uso de registros con más de 30,000 pasos temporales incrementó el tiempo de simulación en un 60-70 % en comparación con sismos de menor duración. Sin embargo, a pesar de este aumento en el tiempo de procesamiento, OpenSeesPy sigue siendo una herramienta altamente recomendable, ya que, en comparación con un análisis dinámico manual, ofrece respuestas rápidas y confiables, optimizando significativamente el proceso de evaluación estructural.
- Por último, investigaciones previas, como la de Cohaila y Gómez (2022), evidencian que, mediante asistentes virtuales con inteligencia artificial programados en Python, es posible optimizar el análisis sísmico hasta en un 70 %. La presente investigación complementa estos hallazgos al utilizar OpenSeesPy (también basado en Python) para el análisis dinámico de muros estructurales ante sismos no impulsivos, obteniendo una diferencia mínima de 0,001 s en el período fundamental respecto a ETABS. Mientras que Cohaila y Gómez automatizaron análisis de pórticos, este estudio implementó el elemento ShellMITC4 para modelar muros, demostrando la versatilidad y potencia de

Python en análisis estructurales complejos. Esto confirma que el dominio del lenguaje Python es actualmente indispensable para la ingeniería estructural y sísmica moderna.

Mientras Cohaila y Gómez automatizaron el análisis de pórticos, este estudio utilizó ShellMITC4 para capturar el comportamiento de muros estructurales, demostrando la versatilidad de Python tanto en análisis convencionales como en modelado de sistemas complejos. Esto confirma que el dominio del lenguaje de programación Python es hoy en día indispensable en la ingeniería estructural y sísmica.

5.2.3. Tercera Hipótesis

De acuerdo a la tercera hipótesis específica: “La respuesta dinámica en términos de desplazamientos y derivas, cumple con los límites establecidos en el reglamento vigente de la Norma Peruana E.030, para una edificación de concreto armado de 6 niveles en Tacna”, se menciona lo siguiente:

- Para evaluar la confiabilidad del modelo estructural implementado en OpenSeesPy, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos del análisis dinámico bajo el sismo 30: Ica (2024-11-05) y aquellos generados por el software ETABS. Esta comparación, representada en la figura 31, muestra el desplazamiento en el nodo 165, ubicado en el último nivel, evidenciando una diferencia mínima entre ambos programas, siendo los valores calculados en OpenSeesPy ligeramente menores. En cuanto al desplazamiento máximo absoluto en el último nivel, ETABS registró 5,024 mm, mientras que OpenSeesPy obtuvo 4,587 mm, representando una diferencia del 8,7 %. De manera similar, para las derivas de piso, la máxima ocurrió en el primer nivel con

valores de 0,0018 en OpenSeesPy y 0,0020 en ETABS, con una variación mínima de 0,0002, lo que confirma la coherencia entre ambos modelos y respalda la confiabilidad del código desarrollado.

- En relación con la respuesta dinámica de la edificación, los desplazamientos máximos por nivel obtenidos mediante OpenSeesPy para los 11 sismos no impulsivos analizados se detallan en las tablas 13 y 14. La figura 32 muestra gráficamente la distribución de estos desplazamientos, evidenciándose que las mayores amplitudes se concentran en los niveles superiores, lo cual es coherente con el comportamiento esperado debido a la mayor flexibilidad en dichas zonas. El desplazamiento máximo registrado fue de 6,388 mm durante el sismo 11: Tacna (2014-04-01). No obstante, para la comparación entre softwares, se seleccionó el sismo 30 por representar condiciones típicas del conjunto estructural, evitando así posibles sesgos derivados de eventos extremos.
- De igual forma, se confirmó el cumplimiento de las distorsiones de entrepiso (figura 34) con los valores límite establecidos en la Norma E.030, tras analizar la estructura bajo la acción de los 11 registros sísmicos no impulsivos seleccionados. La mayor deriva registrada alcanzó un valor máximo de 0,0025 para el sismo 11: Tacna (2014-04-01) y 0,0021 para el sismo 4: Tacna (2005-06-13), manteniéndose en ambos casos dentro del límite permisible de 0,007 definido por la normativa vigente.
- También se confirmó el cumplimiento del artículo 4.6.1 de la Norma E.030 sobre "modos de vibración", determinando que es adecuado considerar 8 modos de vibración, ya que la suma de las masas efectivas supera el 90 %. Las figuras 20, 21 y 22 ilustran que los tres primeros modos reflejan un comportamiento característico de edificaciones con configuración estructural simétrica: los dos primeros corresponden a traslaciones en

las direcciones Y y X, respectivamente, mientras que el tercero es un modo rotacional alrededor del eje Z.

- En nuestra investigación con muros estructurales se observó que las diferencias en desplazamientos entre OpenSeesPy y ETABS fueron ligeramente más marcadas que las reportadas en investigaciones con pórticos, como el caso de la investigación realizada por Riofrio (2024), donde los resultados mostraron una leve variación. Esta variación puede explicarse por las particularidades del modelado de muros en comparación con pórticos. No obstante, en lo que respecta a las derivas de piso (parámetro fundamental para la evaluación sísmica), ambas herramientas presentaron resultados notablemente consistentes tanto en nuestro análisis como en el estudio de referencia. Esta coincidencia en los resultados clave valida la confiabilidad del análisis dinámico realizado con OpenSeesPy y corrobora el cumplimiento de los valores máximos permitidos en la Norma E.030, demostrando que es una herramienta efectiva para este tipo de evaluaciones estructurales independientemente del sistema analizado.

Conclusiones

Primera. Se realizó el análisis dinámico de una edificación de concreto armado de seis niveles con sistema de muros estructurales, utilizando el software OpenSeesPy como herramienta principal. Este análisis permitió modelar con precisión el comportamiento de la estructura frente a movimientos sísmicos no impulsivos, empleando registros reales y considerando las propiedades dinámicas relevantes del sistema. Los resultados obtenidos demostraron que OpenSeesPy es una plataforma confiable para llevar a cabo simulaciones lineales, generando resultados coherentes con los obtenidos mediante el software ETABS. La estrecha concordancia observada entre ambos programas, particularmente en los períodos fundamentales de vibración (0,217 s en OpenSeesPy y 0,216 s en ETABS), valida la precisión del modelo estructural desarrollado y confirma la capacidad de OpenSeesPy para representar adecuadamente la respuesta dinámica de edificaciones con muros estructurales.

Segunda. Se identificaron registros sísmicos clasificados como no impulsivos para su aplicación en el análisis dinámico, utilizando como criterio de selección el índice de impulsividad ($I_p > 30$), el cual permitió excluir eventos con características de alta impulsividad que no cumplían con las condiciones del estudio. A partir de una base de datos inicial de 30 sismos, se seleccionaron 11 registros representativos mediante un proceso de escalamiento de espectros en la dirección de máxima respuesta. Se descartaron aquellos registros que requerían factores de escala excesivos, lo cual podría distorsionar los resultados del análisis. Este procedimiento se realizó siguiendo los

lineamientos establecidos en la Norma Técnica Peruana E.030 y la Norma ASCE 7-22, garantizando la validez del proceso.

Tercera. Se utilizó OpenSeesPy como herramienta principal para desarrollar el análisis dinámico de una edificación de concreto armado de seis niveles, la cual incorpora un sistema de muros estructurales, con el objetivo de evaluar su comportamiento frente a movimientos sísmicos no impulsivos. Los resultados obtenidos confirmaron la efectividad de esta metodología para analizar con precisión la respuesta dinámica de estructuras complejas ante solicitaciones sísmicas reales. La implementación del modelo requirió una comprensión sólida tanto de los conceptos de análisis estructural como del lenguaje de programación Python, así como del manejo de la sintaxis específica de los comandos en OpenSeesPy. Esta integración permitió representar fielmente los elementos estructurales, asignar adecuadamente sus propiedades mecánicas y definir las condiciones de carga necesarias para el análisis. Además, la flexibilidad del entorno de programación facilitó el procesamiento detallado de los resultados y la interpretación de la respuesta estructural ante distintos escenarios sísmicos, consolidando a OpenSeesPy como una herramienta versátil y confiable para la investigación y evaluación del desempeño sísmico de edificaciones.

Cuarta. A partir del análisis dinámico realizado, se obtuvo la respuesta global de la edificación, identificando los modos de vibración, desplazamientos máximos y derivas entre niveles. El registro sísmico de Tacna del 1 de abril de 2014 (sismo 11) generó los valores más altos de respuesta estructural, alcanzando un desplazamiento máximo de 6,388 mm y una deriva de 0,0025. Ambos valores se encuentran dentro de los límites

establecidos por la Norma Técnica Peruana E.030, lo que evidencia un comportamiento estructural adecuado frente a sismos de considerable magnitud. La presencia de muros estructurales mejoró el comportamiento sísmico al aumentar la rigidez y la disipación de energía, demostrando la eficacia del sistema. Estos resultados validan el análisis dinámico como una herramienta confiable para evaluar edificaciones sismorresistentes.

Recomendaciones o Sugerencias

Primera. Dado que la información disponible sobre el modelado de edificaciones con muros estructurales en OpenSeesPy aún es limitada, se recomienda a futuros investigadores recurrir a estudios previos enfocados en pórticos, los cuales ofrecen mayor documentación, ejemplos prácticos y validaciones. Estos pueden servir como base para desarrollar e implementar modelos más complejos con muros estructurales. Asimismo, se sugiere adaptar metodologías de modelación empleadas en otros programas o investigaciones internacionales, teniendo en cuenta las diferencias en el enfoque numérico y la sintaxis del código. La implementación debe estar acompañada de verificaciones que garanticen la precisión y coherencia del análisis con los principios de la ingeniería sísmica.

Segunda. En caso de no contar con un número suficiente de registros sísmicos no impulsivos provenientes del entorno local o nacional, se recomienda utilizar la base de datos del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), una plataforma ampliamente reconocida a nivel internacional. Esta permite acceder a registros sísmicos globales que pueden ser filtrados según parámetros relevantes como magnitud, tipo de falla, distancia epicentral y duración. Los registros seleccionados deben ser sometidos a un proceso de escalamiento espectral compatible con la Norma Técnica Peruana E.030, asegurando que su espectro objetivo se ajuste al diseño sismorresistente requerido. Esta estrategia permite superar la limitación de datos sísmicos nacionales, manteniendo el rigor técnico y cumpliendo con los estándares internacionales de calidad en análisis dinámico.

- Tercera.** Para una implementación efectiva de OpenSeesPy en el análisis dinámico estructural, se recomienda que los tesisistas y profesionales adquieran competencias básicas e intermedias en programación, específicamente en el lenguaje Python. Este conocimiento no solo facilita la escritura de scripts eficientes y ordenados, sino que permite automatizar tareas repetitivas, gestionar datos de entrada/salida de manera más precisa y aplicar técnicas de postprocesamiento con librerías como NumPy o Matplotlib. Además, familiarizarse con el uso de entornos integrados como Jupyter Notebooks puede mejorar significativamente la experiencia de modelado. Además, participar en comunidades especializadas facilitará la resolución de problemas y el aprovechamiento de las capacidades del software en estudios sísmicos.
- Cuarta.** Para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos en OpenSeesPy, es recomendable realizar comparaciones con los resultados obtenidos en otros programas ampliamente utilizados en la industria como ETABS o SAP2000, especialmente en lo referente a desplazamientos, derivas y períodos fundamentales; a su vez, evaluar la concordancia entre los resultados permite identificar posibles errores de modelado, asignación incorrecta de propiedades o supuestos estructurales inadecuados. Asimismo, se sugiere evaluar la sensibilidad del modelo ante variaciones en propiedades estructurales como la resistencia del concreto, las características del suelo o la geometría de la edificación. Este enfoque permite fortalecer la precisión del análisis y optimizar el uso de herramientas computacionales en estudios de respuesta sísmica.

Referencias Bibliográficas

Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras* (4.^a ed.). Pearson

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill.

Aguilar, E. (2022). *Efecto de réplicas sísmicas sobre las derivas e índice de daño en la I.E. N°82030 Fernández Gil en la localidad de Pariamarca, Cajamarca 2022* [Tesis para Maestría, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5285>

Álvarez, M. (2024). Magnitud de momento: esta es la forma como los sismólogos miden los terremotos. <https://www.infobae.com/mexico/2024/12/17/magnitud-de-momento-esta-es-la-forma-en-que-los-sismologos-miden-los-terremotos/>

American Society of Civil Engineers (ASCE). (2022). *ASCE 7-22: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. Chapter 16: Nonlinear Response History Analysis. American Society of Civil Engineers.

Arancibia, F. (2013, 9 de agosto). Modos de vibración de un edificio. Ingeniería Sísmica y la construcción Civil. <http://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.com/2013/08/modos-de-vibracion-de-un-edificio.html>

Bioestadístico. (s. f.). *Niveles de investigación*. Bioestadístico. Recuperado el 28 de diciembre de 2024, de <https://bioestadistico.com/niveles-de-investigacion>

- Canales, D. (2023). *Análisis dinámico incremental para estructuras en 2D y considerando interacción suelo estructura mediante el software OpenSees* [Tesis para título, Universidad de Talca Chile]. <http://dspace.ugal.cl/bitstream/1950/13300/3/2023A001236.pdf>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (2017). *Manual para la Evaluación del Riesgo por Sismos*. https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/MANUAL%20DE%20SISMOS.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2018). *Sismogramas: registros útiles para analizar fenómenos perturbadores como sismos y erupciones volcánicas*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/sismogramas-documentos-utiles-para-estudiar-fenomenos-perturbadores-como-sismos-y-erupciones-volcanicas>
- Chininín, J. y Duran, N. (2022). *Análisis del comportamiento dinámico no-lineal en OpenSees de estructuras con disipadores sísmicos metálicos ranurados-desacoplados* [Tesis para Título, Universidad de Cuenca]. Repositorio Académico de la UPM. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/38022>
- Cohaila, J. y Gomez, K. (2023). *Implementación de un asistente virtual estructural para automatizar el análisis sísmico de un edificio multifamiliar utilizando inteligencia artificial* [Tesis para título, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Academico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/669963>

- El Peruano. (2023, mayo 30). *¿Qué ocurrió el 31 de mayo de 1970 en Perú? ¿Por qué es considerada la peor tragedia?* <https://www.elperuano.pe/noticia/244577-que-ocurrio-el-31-de-mayo-de-1970-en-peru-por-que-es-considerada-la-peor-tragedia>
- CYPE. (2021, octubre 4). *¿Cuáles son las diferencias entre análisis estático y dinámico?* CYPE. <https://www.cype.pe/blog/cuales-son-las-diferencias-entre-analisis-estatico-y-dinamico/>
- Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (2015). *NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures: Volume I (Part 1: Provisions; Part 2: Commentary)* (FEMA P-1050-1). https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-07/fema_nehrp-seismic-provisions-new-buildings_p-1050-1_2015.pdf
- Fernández, V. (s.f.). *Escalado de fuerzas por cortante basal estático* [Trabajo de diploma, Universidad Mayor de San Simón].
- Frau, C. y Saragoni, G. (2012). Terremotos tipo pulso y efectos de directividad de la ruptura. *Ingeniería de Estructuras*, 17, 1–26. <https://www.researchgate.net/publication/280238380>
- Frau, C., Tornello, M. y Panella, S. (2016). Consideración de los pulsos de velocidad en el diseño de estructuras con aislamiento sísmico de base. *Alternativas*, 17(3), 94–100. <https://doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.218>
- Gallegos, C. (2018). *Comparación de los métodos de análisis sísmico Tiempo Historia Lineal Elástico y Modal Espectral*. [Tesis para Título, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7101>

Huang, D., Du, W. y Zhu, H. (2017). A procedure to select ground-motion time histories for deterministic seismic hazard analysis from the Next Generation Attenuation (NGA) database. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 17, pp. 1725–1739. DOI: 10.5194/nhess-17-1725-2017

Inga, P. (2020). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica frente los sismos ocurridos en Perú-Yungay 1970 y Perú-Ica 2007, de dos edificios de 06 pisos en Urbanización San Isidro, Trujillo* [Tesis para título, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional UPN. <https://hdl.handle.net/11537/27225>

Instituto de Resiliencia (2014). *Magnitud, intensidad y aceleración*. EcoExploratorio <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/terremotos/magnitud-intensidad-y-aceleracion/>

Instituto Geofísico del Perú. (2020, agosto 15). *Pisco 2007: 13 años de un sismo devastador*. <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/294466-pisco-2007-13-anos-de-un-sismo-devastador>

Instituto Geofísico del Perú. (2023, 21 de noviembre). IGP reitera que actividad sísmica en el Perú tiene su origen en el proceso de colisión de placas tectónicas frente a nuestras costas. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/955564-igp-reitera-que-actividad-sismica-en-el-peru-tiene-su-origen-en-el-proceso-de-colision-de-placas-tectonicas-frente-a-nuestras-costas>

Instituto Geofísico del Perú. (2024, 12 de diciembre). IGP y Rímac Seguros comprometidos a fomentar la cultura sísmica en el Perú. Gobierno <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/1021943-igp-y-rimac-seguros-comprometidos-a-fomentar-la-cultura-sismica-en-el-peru>

Instituto Geofísico del Perú. (2024). *Mapa sísmico del Perú*. <https://ultimosismo.igp.gob.pe/mapas-sismicos>

Instituto Geofísico. (s. f.). *Registros Acelerográficos*. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/sismogramas-documentos-utiles-para-estudiar-fenomenos-perturbadores-como-sismos-y-erupciones-volcanicas>

Instituto Nacional de Prevención Sísmica (s.f.). *Intensidad y Magnitud*. Argentina.gob.ar . https://www.argentina.gob.ar/inpres/docentes-y-alumnos/intensidad-y-magnitud?utm_source=chatgpt.com

Kerlinger, F. (1979). Enfoque conceptual de la investigación del comportamiento.

Li, W. y Chen, S. (2023). An improved model order reduction method for dynamic analysis of large-scale structures with local nonlinearities. *Applied Mathematical Modelling*, 120, 786–811. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2023.04.011>

López, M y Vaca, M. (2016). *Los movimientos sísmicos*. La Geografía. <https://lageografia.com/geografia-fisica/movimientos-sismicos>

- López, P. (2004). Población muestra y muestreo. *Punto Cero*, 09(08), 69-74.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&tlng=es.
- MathsisFun. (s. f.). *Los movimientos sísmicos*. Disfruta las Matemáticas.
<https://www.disfrutalasmaticas.com/calculo/longitud-arco.html>
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. y Fenves, G. (2006). *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES)* [OpenSees Command Language Manual] University of California, Berkeley.
<https://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/OpenSeesCommandLanguageManualJune2006.pdf>
- McKenna, F. (2011). OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science and Engineering*, 13(4), 58–66. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>
- Medina, M. y Ayma, R. (2023). *Evaluación del desempeño sísmico de una edificación de salud de primer nivel en la ciudad de Tacna – 2022* [Tesis para título, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio UNJBG
<https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/4352>
- Mena, U. (2002). *Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbana* [Tesis para Doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya]. 10.5821/dissertation-2117-93534

- Mendez, K. y Diaz, O. (2019). *Diseño estructural sismorresistente de un edificio de cuatro niveles en concreto armado* [Tesis para título, Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion]. Repositorio UNJFSC. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/2950>
- Mendez, L. y Olivares, E. (2024). *Análisis dinámico de una estructura de concreto armado de 4 niveles de sistema aporticado con la aplicación del software OpenSees* [Tesis para título, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/147356>
- Mendoza, W. (2022). *Influencia de la rigidez post-elástica en la distribución de energía plástica entre plantas en estructuras con disipadores histeréticos* [Trabajo de fin de Master para Maestría no publicada] Universidad Politécnica de Madrid.
- Mendoza, W., Cotrado D., Ticahuanca, J. y Mendoza, A. (2020). Frecuencias y periodos predominantes de sismos registrados en la ciudad de Tacna, mediante análisis y espectro de Fourier. *Ingeniería Investiga*, 2(01), 160–175. <https://doi.org/10.47796/ING.V2I01.288>
- Ministerio de Salud. (2001). *Impacto del sismo del 23 de junio del 2001 en la infraestructura de los establecimientos de salud en el sur del Perú*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/417295/409814554401792555320191106-32001-1osu5hi.pdf>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *E.030 Diseño sismo resistente*.

Gobierno del Perú.

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686410/E.030%20Dise%C3%B1o%20Sismo%20resistente.pdf>

Muñoz, A. (2020). *Comentarios a la Norma Peruana E.030: Diseño sismo resistente*. SENCICO

https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1129512/COMENTARIOS_A_LA_NORMA_PERUANA_E.030_DISE%C3%91O_SISMORRESISTENTE.pdf

Nuñez, A. (2017). *Diseño por desempeño de un edificio de hormigón armado utilizando el método*

de análisis tiempo-historia [Tesis para título, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio de Universidad Técnica de Ambato. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/27236>

Oviedo Sarmiento, R. (2016). *Diseño Sismorresistente de Edificaciones de Concreto Armado*.

[Archivo PDF]. Scribd. <https://es.scribd.com/document/469188149/Diseno-sismorresistente-de-edificaciones-de-concreto-armado-Ricardo-Oviedo-Sarmiento-1-pdf>

Panella, D., Frau, C. y Tornello, M. (2013). Identificación de registros sísmicos impulsivos para

uso en ingeniería estructural. *Mecánica Computacional*, 32(10), 851–863. <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4393>

Panella, D., Frau, C. y Tornello, M. (2020). identificación de registros sísmicos impulsivos para

uso en ingeniería estructural. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25(4), 445–468. <http://dx.doi.org/10.24133/riie.v25i4.1858>

- Paz, E. (2012). *Procedimiento de cálculo para la elaboración de espectros sísmicos para el diseño sismorresistente de estructuras* [Tesis para título, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis/T11052.pdf>
- Red Sismológica Nacional. (2019). *¿Cuál es la diferencia entre magnitud momento y magnitud Richter?* UCR. <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/2326-cual-es-la-diferencia-entre-magnitud-momento-y-magnitud-richter>
- Riofrio, A. (2024). *Análisis dinámico lineal de una estructura aporticada en OpenSeesPy* [Trabajo de integración curricular para título, Universidad Técnica Particular de Loja]. Repositorio Institucional UTPL. <https://bibliotecautpl.utpl.edu.ec/cgi-bin/abnetclwo?ACC=DOSEARCH&xsqf99=139798.TITN>.
- Rojas, A. (2019). *Ondas sísmicas*. Geología – publicaciones. <https://post.geoxnet.com/glossary/ondas-sismicas/>
- Significados, Equipo (2021). *Tipos de investigación*. En: Significados.com. <https://www.significados.com/tipos-de-investigacion/>
- Sociedad Geológica del Perú. (2024). *¡Alerta! Perú: un país altamente sísmico*. <https://www.sgp.org.pe/alerta-peru-un-pais-altamente-sismico/>
- Somerville, P. (2000). Seismic Hazard Evaluation State-of-the-Art Paper. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, 3, 325–346

- Tavera, H. y Bernal, I. (2003). *El sismo de Arequipa del 23 de junio del 2001: características e impactos* [Informe técnico]. Instituto Geofísico del Perú. <https://repositorio.igp.gob.pe/server/api/core/bitstreams/6978d044-27ea-43b1-8bc2-e32523dc9f9b/content>
- Universidad de Piura. (2021, 6 de julio). ¿Estamos preparados para afrontar un sismo en el Perú? Universidad de Piura. <https://www.udep.edu.pe/hoy/2021/07/estamos-preparados-para-afrontar-un-sismo-en-el-peru/>
- Vielma, J. (2008). Determinación de las derivas de entrepiso a partir de los desplazamientos laterales de un edificio [Figura]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Determinacion-de-las-derivas-de-entrepiso-a-partir-de-los-desplazamientos_fig1_45490994
- Vielma, J. (2014). Contribuciones a la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios. Monografías de ingeniería sísmica. [En línea]. Recuperado de: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjVuNPAns_uAhXxGbkGHdDLDD1IQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fupcommons.upc.edu%2Fbitstream%2Fhandle%2F2117%2F28515%2FMIS68.pdf&usg=AOvVaw3FMi6eObnR0GVF7D2JCZDW
- Wang, G., Youngs, R., Power, M. y Li, Z. (2015). Design ground motion library: an interactive tool for selecting earthquake ground motions. *Earthq. Spectra*, Vol. 31, pp. 617–635. DOI: 10.1193/090612EQS283M

- Yanqui, A. y Paniagua, G. (2020). *Evaluación estructural sísmico del pabellón “C” del C.E.I. 225 Niños Héroes, Tacna 2020* [Tesis para título, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio de la Universidad Privada de Tacna <http://hdl.handle.net/20.500.12969/1560>
- Yépez, F. (2001). *Seminario: “Gestión de riesgos y prevención de desastres”: Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito y futuros proyectos de mitigación*

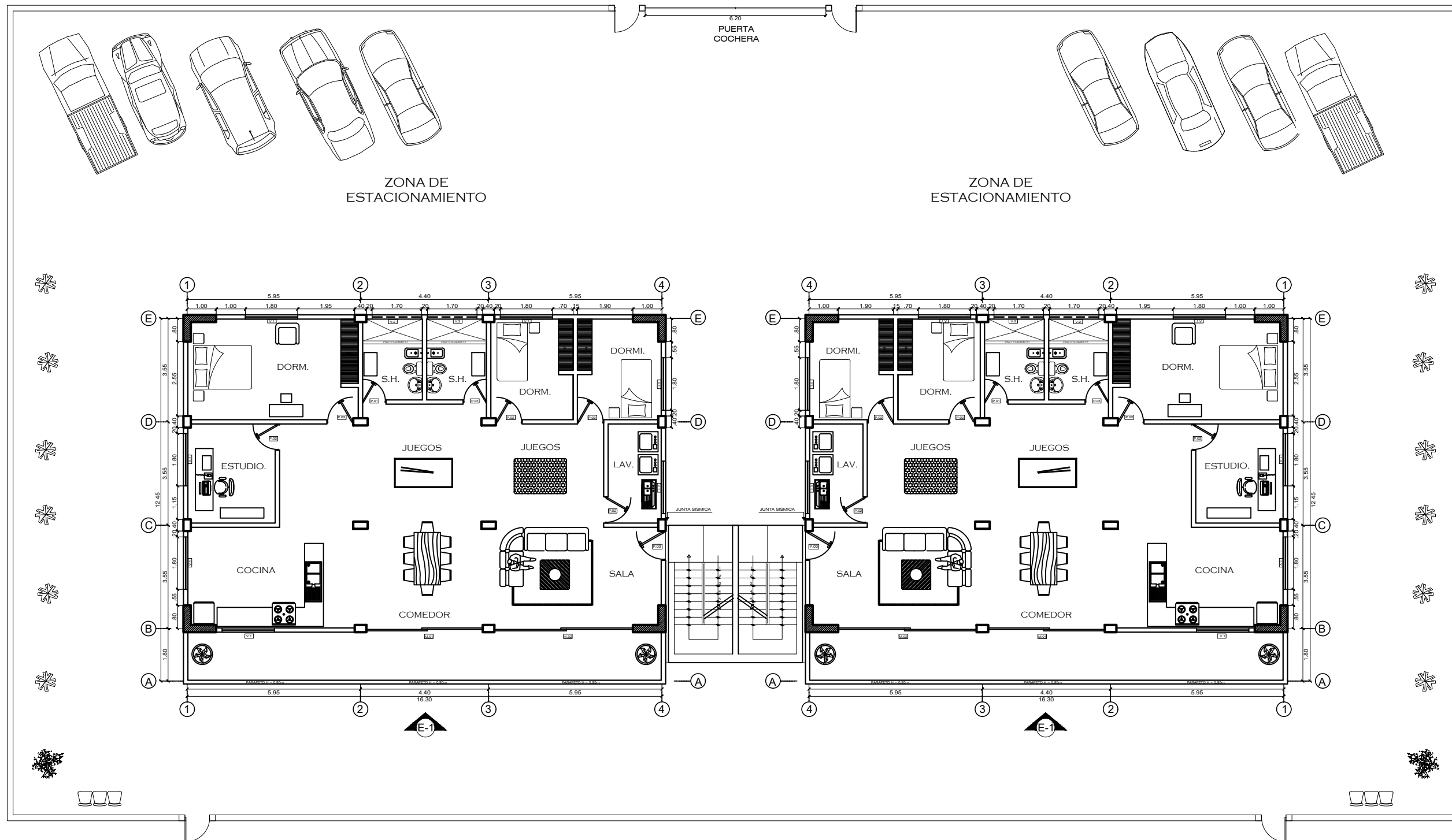
Anexos

Anexo 1: Matriz de Consistencia

Título: “Análisis Dinámico Ante Sismos No Impulsivos de una Edificación de Concreto Armado de 6 Niveles con Sistema de Muros Mediante OpenSeesPy Tacna 2025”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	METODOLOGÍA	VARIABLES	DIMENSIONES	INSTRUMENTO
¿Cómo realizar el análisis dinámico ante sismos no impulsivos de edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros mediante OpenSeesPy Tacna 2025?	Realizar el análisis dinámico ante sismos no impulsivos de una edificación de concreto armado de 6 Niveles con Sistema de Muros Mediante OpenSeesPy Tacna 2025.	Mediante un adecuado análisis dinámico en OpenSeesPy se podrá predecir con precisión la respuesta ante sismos no impulsivos de edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros en Tacna 2025.	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN El tipo de investigación es aplicada y de enfoque cuantitativo, y el diseño es no experimental	VI: Sismos no impulsivos	- Parámetros sísmicos - Impulsividad	- Fichas de recolección de datos - OpenSeesPy.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	POBLACIÓN	VD: Análisis dinámico	- Propiedades dinámicas - Respuesta dinámica	- Revisión documental - Software ETABS - Acelerogramas representativos
¿Cómo identificar sismos no impulsivos para aplicar en análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles?	Identificar los sismos no impulsivos para su aplicación en el análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros.	Mediante el cálculo del Índice de Impulsividad, se identificarán los sismos no impulsivos, permitiendo así realizar un análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros.	MUESTRA La muestra estará conformada por una edificación típica de concreto armado de 6 niveles, sin irregularidades y con sistema de muros estructurales. Esta estructura será evaluada mediante 30 registros de sismos no impulsivos, seleccionados para analizar su comportamiento dinámico bajo este tipo específico de eventos.			
¿Cómo implementar OpenSeesPy para realizar un análisis dinámico ante sismos no impulsivos en una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros?	Implementar el OpenSeespy para realizar el análisis dinámico ante sismos no impulsivos de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros.	Mediante el uso del lenguaje de programación Python, se podrá implementar un código en OpenSeesPy para realizar un análisis dinámico de una edificación de concreto armado de 6 niveles con sistema de muros ante sismos no impulsivos.				
¿Cómo es la respuesta dinámica ante sismos no impulsivos de una edificación de concreto armado de 6 niveles en Tacna?	Determinar la respuesta dinámica ante sismos no impulsivos de una edificación de concreto armado de 6 niveles en Tacna.	La respuesta dinámica en términos de desplazamientos y derivas, cumplirá con los límites establecidos en el reglamento vigente de la Norma Peruana E.030, para una edificación de concreto armado de 6 niveles en Tacna.				

Anexo 2: Plano Arquitectónico de Planta de una Edificación Residencial Multifamiliar



ESCALA 1/150



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

PROYECTO:
 VIVIENDA MULTIFAMILIAR
 DE 6 NIVELES

ESTUDIANTES:
 MILEYDI LIBBETH MAMANI APAZA
 WENDY VANESSA ALANIA LEON

PLANO:

CURSO:
 DESARROLLO DEL PROYECTO
 DE INVESTIGACIÓN

ESPECIALIDAD:
 INGENIERÍA CIVIL

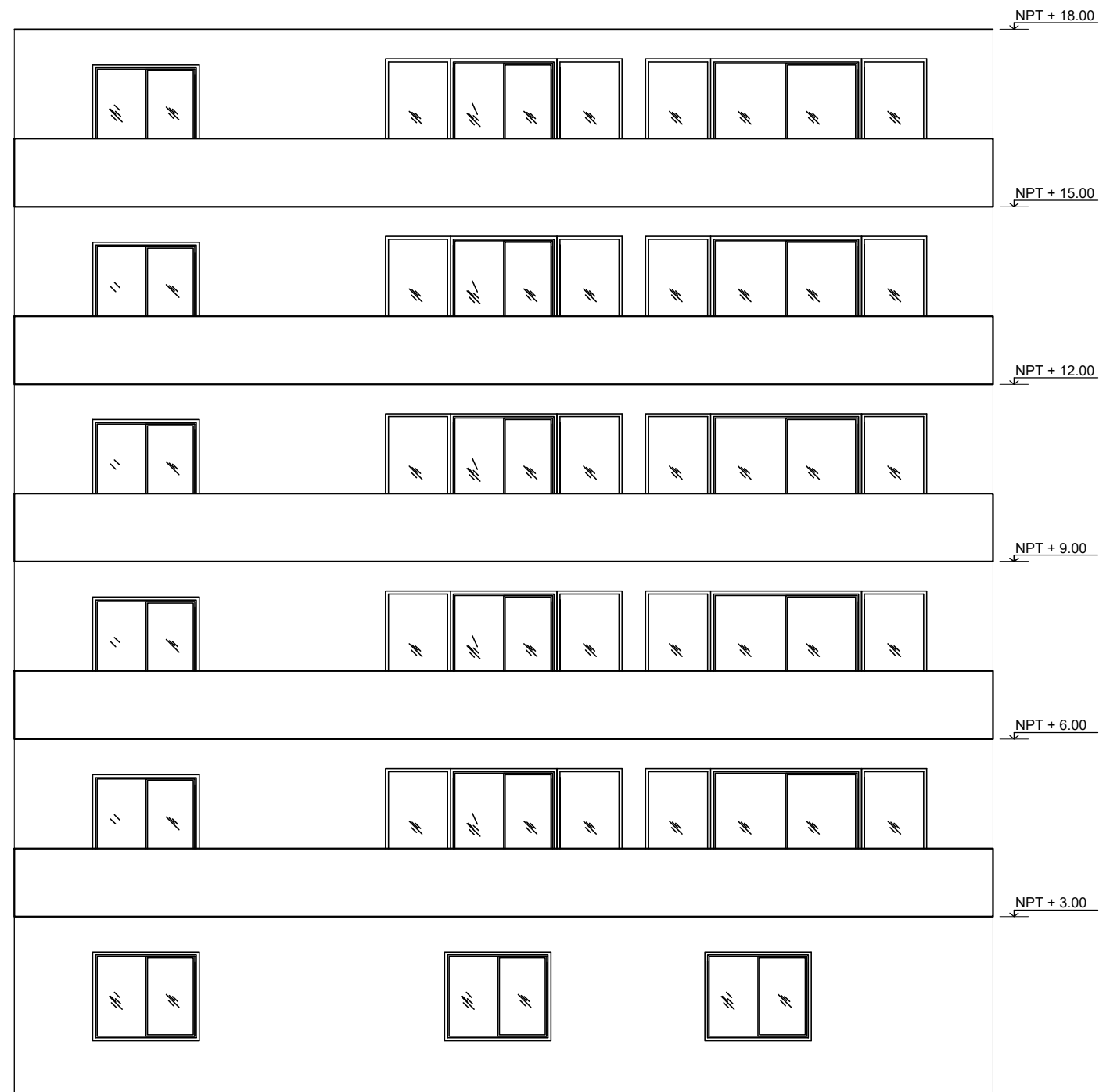
ESCALA: INDICADA

FECHA: ABRIL - 2025

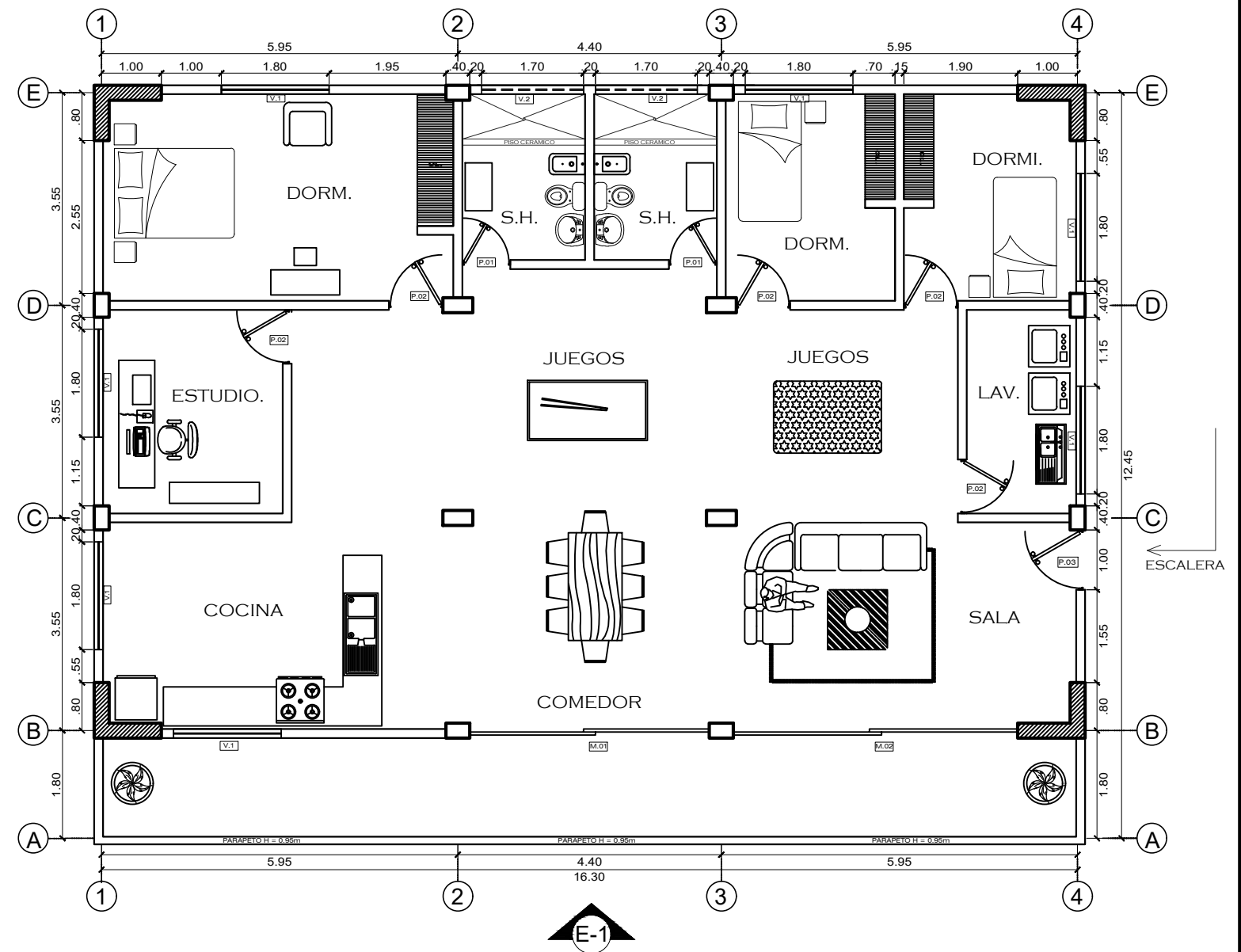
LAMINA:

A-0

Anexo 3: Plano Arquitectónico de Planta y Elevación de una Edificación de Concreto Armado de 6 Niveles con Sistema de Muros



ELEVACIÓN 1
ESCALA 1/100



PLANTA TÍPICA
ESCALA 1/100 h=0.20m. S/C 200kg/m²

CUADRO DE VANOS VENTANAS - PUERTAS				
	ANCHO	ALTURA	ALFEIZAR	TIPO
V1	1.80	1.50	0.90	--
V2	1.70	0.40	2.10	--
P1	0.80	2.60	--	--
P2	0.90	2.50	--	--
P3	1.00	2.60	--	--
M1	4.00	2.50	--	--
M2	4.75	2.50	--	--



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

PROYECTO:
VIVIENDA MULTIFAMILIAR

ESTUDIANTES:
MILEYDI LIZBETH MAMANI APAZA
WENDY VANESSA ALANIA LEON

PLANO: ARQUITECTURA
PLANTA - ELEVACIÓN

CURSO:
DESARROLLO DEL PROYECTO
DE INVESTIGACIÓN

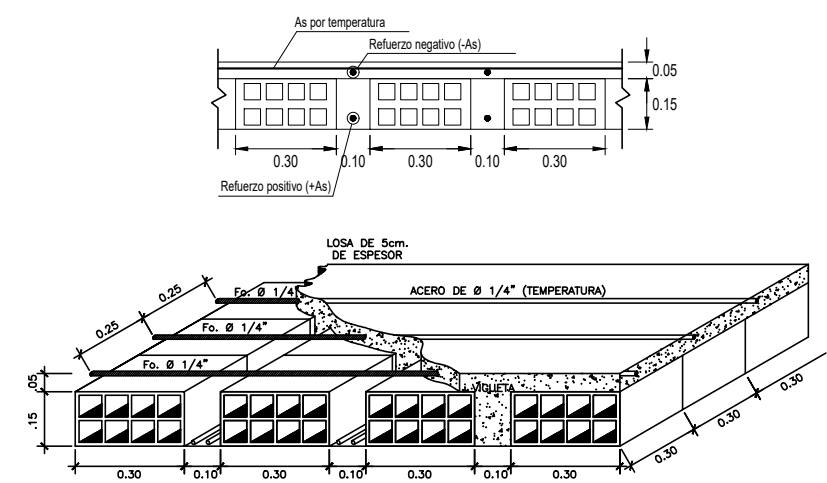
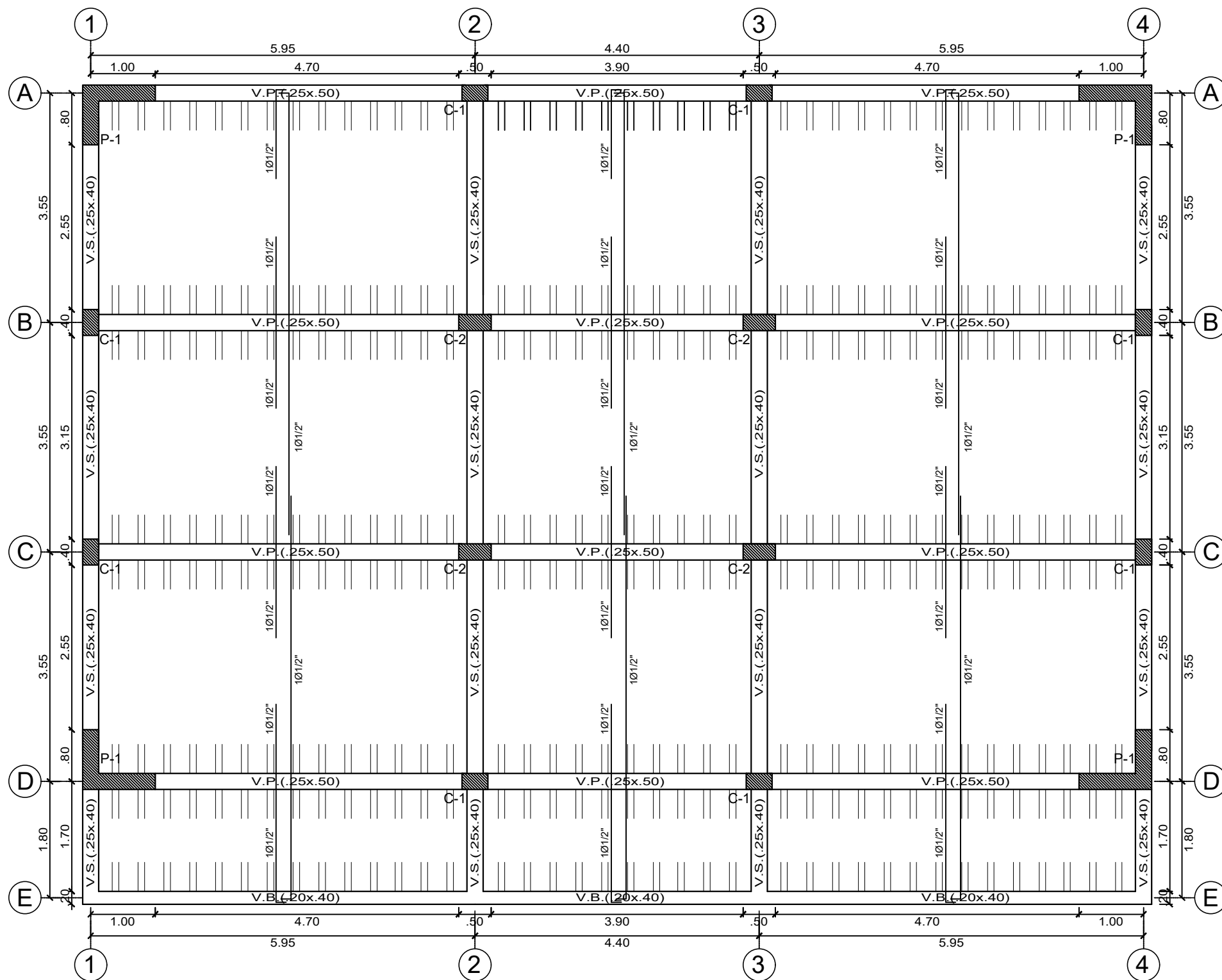
ESPECIALIDAD:

ESCALA: INDICADA
INGENIERÍA CIVIL
FECHA: ABRIL - 2025

LAMINA:

A-02

Anexo 4: Plano de Estructura de una Edificación de Concreto Armado de 6 Niveles con Sistema de Muros



DETALLE DE LOSA ALIGERADA H=0.20m
Esc. S/E

CUADRO DE VIGAS
ESC. 1/75

Sección	VP (25 X 50)	VS (25 X 40)	VB (20 X 40)
Nivel 1-6			

CUADRO DE COLUMNAS Y PLACAS
ESC. 1/75

Sección	C-1 (25 X 40)	C-2 (25 X 50)	PL-1 (1.00 X .80 X .25)

ALIGERADO TÍPICO
ESCALA 1/75 h=0.20m. S/C 200kg/m²



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

PROYECTO:
VIVIENDA MULTIFAMILIAR

ESTUDIANTES:
MILEYDI LIZBETH MAMANI APAZA
WENDY VANESSA ALANIA LEON

PLANO: ESTRUCTURAS ALIGERADO

CURSO: DESARROLLO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

ESPECIALIDAD: INGENIERÍA CIVIL

ESCALA: INDICADA

FECHA: ABRIL - 2025

LAMINA:
E-01

Anexo 5: Enumeración de 192 Nodos con sus Respectivas Coordenadas - txt

NODO_6N.txt					NODO_6N.txt					
Archivo	Editar	Ver			Archivo	Editar	Ver			
1	;	0.00	;	1.83	;	0.00	;	5.38	;	3.00
2	;	0.00	;	2.63	;	0.00	;	8.93	;	3.00
3	;	0.00	;	5.38	;	0.00	;	11.71	;	3.00
4	;	0.00	;	8.93	;	0.00	;	12.51	;	3.00
5	;	0.00	;	11.71	;	0.00	;	0.00	;	6.00
6	;	0.00	;	12.51	;	0.00	;	1.83	;	6.00
7	;	1.00	;	1.83	;	0.00	;	2.63	;	6.00
8	;	1.00	;	12.51	;	0.00	;	5.38	;	6.00
9	;	5.95	;	1.83	;	0.00	;	8.93	;	6.00
10	;	5.95	;	5.38	;	0.00	;	11.71	;	6.00
11	;	5.95	;	8.93	;	0.00	;	12.51	;	6.00
12	;	5.95	;	12.51	;	0.00	;	1.83	;	6.00
13	;	10.35	;	1.83	;	0.00	;	12.51	;	6.00
14	;	10.35	;	5.38	;	0.00	;	0.00	;	6.00
15	;	10.35	;	8.93	;	0.00	;	1.83	;	6.00
16	;	10.35	;	12.51	;	0.00	;	5.38	;	6.00
17	;	15.30	;	1.83	;	0.00	;	8.93	;	6.00
18	;	15.30	;	12.51	;	0.00	;	12.51	;	6.00
19	;	16.30	;	1.83	;	0.00	;	0.00	;	6.00
20	;	16.30	;	2.63	;	0.00	;	1.83	;	6.00
21	;	16.30	;	5.38	;	0.00	;	5.38	;	6.00
22	;	16.30	;	8.93	;	0.00	;	8.93	;	6.00
23	;	16.30	;	11.71	;	0.00	;	12.51	;	6.00
24	;	16.30	;	12.51	;	0.00	;	1.83	;	6.00
25	;	0.00	;	0.00	;	3.00	;	12.51	;	6.00
26	;	0.00	;	1.83	;	3.00	;	0.00	;	6.00
27	;	0.00	;	2.63	;	3.00	;	1.83	;	6.00
28	;	0.00	;	5.38	;	3.00	;	2.63	;	6.00
29	;	0.00	;	8.93	;	3.00	;	5.38	;	6.00
30	;	0.00	;	11.71	;	3.00	;	8.93	;	6.00
31	;	0.00	;	12.51	;	3.00	;	11.71	;	6.00
32	;	1.00	;	1.83	;	3.00	;	12.51	;	6.00
33	;	1.00	;	12.51	;	3.00	;	0.00	;	9.00
34	;	5.95	;	0.00	;	3.00	;	1.83	;	9.00
35	;	5.95	;	1.83	;	3.00	;	2.63	;	9.00
36	;	5.95	;	5.38	;	3.00	;	5.38	;	9.00
37	;	5.95	;	8.93	;	3.00	;	8.93	;	9.00
38	;	5.95	;	12.51	;	3.00	;	11.71	;	9.00
39	;	10.35	;	0.00	;	3.00	;	12.51	;	9.00
40	;	10.35	;	1.83	;	3.00	;	1.83	;	9.00
41	;	10.35	;	5.38	;	3.00	;	12.51	;	9.00
42	;	10.35	;	8.93	;	3.00	;	0.00	;	9.00
43	;	10.35	;	12.51	;	3.00	;	1.83	;	9.00
44	;	15.30	;	1.83	;	3.00	;	5.38	;	9.00
45	;	15.30	;	12.51	;	3.00	;	8.93	;	9.00
46	;	16.30	;	0.00	;	3.00	;	12.51	;	9.00
47	;	16.30	;	1.83	;	3.00	;	0.00	;	9.00
48	;	16.30	;	2.63	;	3.00	;	1.83	;	9.00
49	;	16.30	;	5.38	;	3.00	;			
50	;	16.30	;	8.93	;	3.00	;			
51	;	16.30	;	11.71	;	3.00	;			
52	;	16.30	;	12.51	;	3.00	;			
53	;	0.00	;	0.00	;	6.00	;			
54	;	0.00	;	1.83	;	6.00	;			
55	;	0.00	;	2.63	;	6.00	;			
56	;	0.00	;	5.38	;	6.00	;			
57	;	0.00	;	8.93	;	6.00	;			
58	;	0.00	;	11.71	;	6.00	;			
59	;	0.00	;	12.51	;	6.00	;			
60	;	1.00	;	1.83	;	6.00	;			
61	;	1.00	;	12.51	;	6.00	;			
62	;	5.95	;	0.00	;	6.00	;			
63	;	5.95	;	1.83	;	6.00	;			
64	;	5.95	;	5.38	;	6.00	;			
65	;	5.95	;	8.93	;	6.00	;			
66	;	5.95	;	12.51	;	6.00	;			
67	;	10.35	;	0.00	;	6.00	;			
68	;	10.35	;	1.83	;	6.00	;			
69	;	10.35	;	5.38	;	6.00	;			
70	;	10.35	;	8.93	;	6.00	;			
71	;	10.35	;	12.51	;	6.00	;			
72	;	15.30	;	1.83	;	6.00	;			
73	;	15.30	;	12.51	;	6.00	;			
74	;	16.30	;	0.00	;	6.00	;			
75	;	16.30	;	1.83	;	6.00	;			
76	;	16.30	;	2.63	;	6.00	;			
77	;	16.30	;	5.38	;	6.00	;			
78	;	16.30	;	8.93	;	6.00	;			
79	;	16.30	;	11.71	;	6.00	;			
80	;	16.30	;	12.51	;	6.00	;			
81	;	0.00	;	0.00	;	9.00	;			
82	;	0.00	;	1.83	;	9.00	;			
83	;	0.00	;	2.63	;	9.00	;			
84	;	0.00	;	5.38	;	9.00	;			
85	;	0.00	;	8.93	;	9.00	;			
86	;	0.00	;	11.71	;	9.00	;			
87	;	0.00	;	12.51	;	9.00	;			
88	;	1.00	;	1.83	;	9.00	;			
89	;	1.00	;	12.51	;	9.00	;			
90	;	5.95	;	0.00	;	9.00	;			
91	;	5.95	;	1.83	;	9.00	;			
92	;	5.95	;	5.38	;	9.00	;			
93	;	5.95	;	8.93	;	9.00	;			
94	;	5.95	;	12.51	;	9.00	;			
95	;	10.35	;	0.00	;	9.00	;			
96	;	10.35	;	1.83	;	9.00	;			

Archivo	Editar	Ver		
97	10.35	5.38	9.00	
98	10.35	8.93	9.00	
99	10.35	12.51	9.00	
100	15.30	1.83	9.00	
101	15.30	12.51	9.00	
102	16.30	0.00	9.00	
103	16.30	1.83	9.00	
104	16.30	2.63	9.00	
105	16.30	5.38	9.00	
106	16.30	8.93	9.00	
107	16.30	11.71	9.00	
108	16.30	12.51	9.00	
109	0.00	0.00	12.00	
110	0.00	1.83	12.00	
111	0.00	2.63	12.00	
112	0.00	5.38	12.00	
113	0.00	8.93	12.00	
114	0.00	11.71	12.00	
115	0.00	12.51	12.00	
116	1.00	1.83	12.00	
117	1.00	12.51	12.00	
118	5.95	0.00	12.00	
119	5.95	1.83	12.00	
120	5.95	5.38	12.00	
121	5.95	8.93	12.00	
122	5.95	12.51	12.00	
123	10.35	0.00	12.00	
124	10.35	1.83	12.00	
125	10.35	5.38	12.00	
126	10.35	8.93	12.00	
127	10.35	12.51	12.00	
128	15.30	1.83	12.00	
129	15.30	12.51	12.00	
130	16.30	0.00	12.00	
131	16.30	1.83	12.00	
132	16.30	2.63	12.00	
133	16.30	5.38	12.00	
134	16.30	8.93	12.00	
135	16.30	11.71	12.00	
136	16.30	12.51	12.00	
137	0.00	0.00	15.00	
138	0.00	1.83	15.00	
139	0.00	2.63	15.00	
140	0.00	5.38	15.00	
141	0.00	8.93	15.00	
142	0.00	11.71	15.00	
143	0.00	12.51	15.00	
144	1.00	1.83	15.00	
145	1.00	12.51	15.00	
146	5.95	0.00	15.00	
147	5.95	1.83	15.00	
148	5.95	5.38	15.00	
149	5.95	8.93	15.00	
150	5.95	12.51	15.00	
151	10.35	0.00	15.00	
152	10.35	1.83	15.00	
153	10.35	5.38	15.00	
154	10.35	8.93	15.00	
155	10.35	12.51	15.00	
156	15.30	1.83	15.00	
157	15.30	12.51	15.00	
158	16.30	0.00	15.00	
159	16.30	1.83	15.00	
160	16.30	2.63	15.00	
161	16.30	5.38	15.00	
162	16.30	8.93	15.00	
163	16.30	11.71	15.00	
164	16.30	12.51	15.00	
165	0.00	0.00	18.00	
166	0.00	1.83	18.00	
167	0.00	2.63	18.00	
168	0.00	5.38	18.00	
169	0.00	8.93	18.00	
170	0.00	11.71	18.00	
171	0.00	12.51	18.00	
172	1.00	1.83	18.00	
173	1.00	12.51	18.00	
174	5.95	0.00	18.00	
175	5.95	1.83	18.00	
176	5.95	5.38	18.00	
177	5.95	8.93	18.00	
178	5.95	12.51	18.00	
179	10.35	0.00	18.00	
180	10.35	1.83	18.00	
181	10.35	5.38	18.00	
182	10.35	8.93	18.00	
183	10.35	12.51	18.00	
184	15.30	1.83	18.00	
185	15.30	12.51	18.00	
186	16.30	0.00	18.00	
187	16.30	1.83	18.00	
188	16.30	2.63	18.00	
189	16.30	5.38	18.00	
190	16.30	8.93	18.00	
191	16.30	11.71	18.00	
192	16.30	12.51	18.00	

Anexo 6: Código Desarrollado para Modelar la Estructura de Estudio en OpenSeesPy

The image shows a JupyterLab interface with the following content:

INICIO

```
[1]: import openseespy.opensees as ops
import openseespy.postprocessing.ops_vis as opsv
import pandas as ps
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d

# SISTEMA DE UNIDADES S.I. tnf, m
ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 3, '-ndf', 6)
```

NODOS, RESTRICCIONES DE NODOS, DIAFRAGMAS

```
[2]: # Nodos

ops.node(1, 0, 1.83, 0)
ops.node(2, 0, 2.63, 0)
ops.node(3, 0, 5.38, 0)
ops.node(4, 0, 8.93, 0)
ops.node(5, 0, 11.71, 0)
ops.node(6, 0, 12.51, 0)
ops.node(7, 1.00, 1.83, 0)
ops.node(8, 1.00, 12.51, 0)
ops.node(9, 5.95, 1.83, 0)
ops.node(10, 5.95, 5.38, 0)
ops.node(11, 5.95, 8.93, 0)
ops.node(12, 5.95, 12.51, 0)
ops.node(13, 10.35, 1.83, 0)
ops.node(14, 10.35, 5.38, 0)
ops.node(15, 10.35, 8.93, 0)
ops.node(16, 10.35, 12.51, 0)
ops.node(17, 15.30, 1.83, 0)
ops.node(18, 15.30, 12.51, 0)
ops.node(19, 16.30, 1.83, 0)
ops.node(20, 16.30, 2.63, 0)
ops.node(21, 16.30, 5.38, 0)
ops.node(22, 16.30, 8.93, 0)
ops.node(23, 16.30, 11.71, 0)
ops.node(24, 16.30, 12.51, 0)

ops.node(25, 0, 0, 3.0)
ops.node(26, 0, 1.83, 3.0)
ops.node(27, 0, 2.63, 3.0)
ops.node(28, 0, 5.38, 3.0)
ops.node(29, 0, 8.93, 3.0)
ops.node(30, 0, 11.71, 3.0)
ops.node(31, 0, 12.51, 3.0)
ops.node(32, 1.00, 1.83, 3.0)
ops.node(33, 1.00, 12.51, 3.0)
ops.node(34, 5.95, 0, 3.0)
ops.node(35, 5.95, 1.83, 3.0)
ops.node(36, 5.95, 5.38, 3.0)
ops.node(37, 5.95, 8.93, 3.0)
ops.node(38, 5.95, 12.51, 3.0)
ops.node(39, 10.35, 0, 3.0)
ops.node(40, 10.35, 1.83, 3.0)
ops.node(41, 10.35, 5.38, 3.0)
ops.node(42, 10.35, 8.93, 3.0)
ops.node(43, 10.35, 12.51, 3.0)
ops.node(44, 15.30, 1.83, 3.0)
ops.node(45, 15.30, 12.51, 3.0)
ops.node(46, 16.30, 0, 3.0)
ops.node(47, 16.30, 1.83, 3.0)
ops.node(48, 16.30, 2.63, 3.0)
ops.node(49, 16.30, 5.38, 3.0)
ops.node(50, 16.30, 8.93, 3.0)
ops.node(51, 16.30, 11.71, 3.0)
ops.node(52, 16.30, 12.51, 3.0)
```

```
ops.node(53, 0, 0, 6.0)
ops.node(54, 0, 1.83, 6.0)
ops.node(55, 0, 2.63, 6.0)
ops.node(56, 0, 5.38, 6.0)
ops.node(57, 0, 8.93, 6.0)
ops.node(58, 0, 11.71, 6.0)
ops.node(59, 0, 12.51, 6.0)
ops.node(60, 1.00, 1.83, 6.0)
ops.node(61, 1.00, 12.51, 6.0)
ops.node(62, 5.95, 0, 6.0)
ops.node(63, 5.95, 1.83, 6.0)
ops.node(64, 5.95, 5.38, 6.0)
ops.node(65, 5.95, 8.93, 6.0)
ops.node(66, 5.95, 12.51, 6.0)
ops.node(67, 10.35, 0, 6.0)
ops.node(68, 10.35, 1.83, 6.0)
ops.node(69, 10.35, 5.38, 6.0)
ops.node(70, 10.35, 8.93, 6.0)
ops.node(71, 10.35, 12.51, 6.0)
ops.node(72, 15.30, 1.83, 6.0)
ops.node(73, 15.30, 12.51, 6.0)
ops.node(74, 16.30, 0, 6.0)
ops.node(75, 16.30, 1.83, 6.0)
ops.node(76, 16.30, 2.63, 6.0)
ops.node(77, 16.30, 5.38, 6.0)
ops.node(78, 16.30, 8.93, 6.0)
ops.node(79, 16.30, 11.71, 6.0)
ops.node(80, 16.30, 12.51, 6.0)

ops.node(81, 0, 0, 9.0)
ops.node(82, 0, 1.83, 9.0)
ops.node(83, 0, 2.63, 9.0)
ops.node(84, 0, 5.38, 9.0)
ops.node(85, 0, 8.93, 9.0)
ops.node(86, 0, 11.71, 9.0)
ops.node(87, 0, 12.51, 9.0)
ops.node(88, 1.00, 1.83, 9.0)
ops.node(89, 1.00, 12.51, 9.0)
ops.node(90, 5.95, 0, 9.0)
ops.node(91, 5.95, 1.83, 9.0)
ops.node(92, 5.95, 5.38, 9.0)
ops.node(93, 5.95, 8.93, 9.0)
ops.node(94, 5.95, 12.51, 9.0)
ops.node(95, 10.35, 0, 9.0)
ops.node(96, 10.35, 1.83, 9.0)
ops.node(97, 10.35, 5.38, 9.0)
ops.node(98, 10.35, 8.93, 9.0)
ops.node(99, 10.35, 12.51, 9.0)
ops.node(100, 15.30, 1.83, 9.0)
ops.node(101, 15.30, 12.51, 9.0)
ops.node(102, 16.30, 0, 9.0)
ops.node(103, 16.30, 1.83, 9.0)
ops.node(104, 16.30, 2.63, 9.0)
ops.node(105, 16.30, 5.38, 9.0)
ops.node(106, 16.30, 8.93, 9.0)
ops.node(107, 16.30, 11.71, 9.0)
ops.node(108, 16.30, 12.51, 9.0)

ops.node(109, 0, 0, 12.0)
ops.node(110, 0, 1.83, 12.0)
ops.node(111, 0, 2.63, 12.0)
ops.node(112, 0, 5.38, 12.0)
ops.node(113, 0, 8.93, 12.0)
ops.node(114, 0, 11.71, 12.0)
ops.node(115, 0, 12.51, 12.0)
ops.node(116, 1.00, 1.83, 12.0)
ops.node(117, 1.00, 12.51, 12.0)
ops.node(118, 5.95, 0, 12.0)
ops.node(119, 5.95, 1.83, 12.0)
ops.node(120, 5.95, 5.38, 12.0)
ops.node(121, 5.95, 8.93, 12.0)
ops.node(122, 5.95, 12.51, 12.0)
```

```
ops.node(123, 10.35, 0, 12.0)
ops.node(124, 10.35, 1.83, 12.0)
ops.node(125, 10.35, 5.38, 12.0)
ops.node(126, 10.35, 8.93, 12.0)
ops.node(127, 10.35, 12.51, 12.0)
ops.node(128, 15.30, 1.83, 12.0)
ops.node(129, 15.30, 12.51, 12.0)
ops.node(130, 16.30, 0, 12.0)
ops.node(131, 16.30, 1.83, 12.0)
ops.node(132, 16.30, 2.63, 12.0)
ops.node(133, 16.30, 5.38, 12.0)
ops.node(134, 16.30, 8.93, 12.0)
ops.node(135, 16.30, 11.71, 12.0)
ops.node(136, 16.30, 12.51, 12.0)
```

```
ops.node(137, 0, 0, 15.0)
ops.node(138, 0, 1.83, 15.0)
ops.node(139, 0, 2.63, 15.0)
ops.node(140, 0, 5.38, 15.0)
ops.node(141, 0, 8.93, 15.0)
ops.node(142, 0, 11.71, 15.0)
ops.node(143, 0, 12.51, 15.0)
ops.node(144, 1.00, 1.83, 15.0)
ops.node(145, 1.00, 12.51, 15.0)
ops.node(146, 5.95, 0, 15.0)
ops.node(147, 5.95, 1.83, 15.0)
ops.node(148, 5.95, 5.38, 15.0)
ops.node(149, 5.95, 8.93, 15.0)
ops.node(150, 5.95, 12.51, 15.0)
ops.node(151, 10.35, 0, 15.0)
ops.node(152, 10.35, 1.83, 15.0)
ops.node(153, 10.35, 5.38, 15.0)
ops.node(154, 10.35, 8.93, 15.0)
ops.node(155, 10.35, 12.51, 15.0)
ops.node(156, 15.30, 1.83, 15.0)
ops.node(157, 15.30, 12.51, 15.0)
ops.node(158, 16.30, 0, 15.0)
ops.node(159, 16.30, 1.83, 15.0)
ops.node(160, 16.30, 2.63, 15.0)
ops.node(161, 16.30, 5.38, 15.0)
ops.node(162, 16.30, 8.93, 15.0)
ops.node(163, 16.30, 11.71, 15.0)
ops.node(164, 16.30, 12.51, 15.0)
```

```
ops.node(165, 0, 0, 18.0)
ops.node(166, 0, 1.83, 18.0)
ops.node(167, 0, 2.63, 18.0)
ops.node(168, 0, 5.38, 18.0)
ops.node(169, 0, 8.93, 18.0)
ops.node(170, 0, 11.71, 18.0)
ops.node(171, 0, 12.51, 18.0)
ops.node(172, 1.00, 1.83, 18.0)
ops.node(173, 1.00, 12.51, 18.0)
ops.node(174, 5.95, 0, 18.0)
ops.node(175, 5.95, 1.83, 18.0)
ops.node(176, 5.95, 5.38, 18.0)
ops.node(177, 5.95, 8.93, 18.0)
ops.node(178, 5.95, 12.51, 18.0)
ops.node(179, 10.35, 0, 18.0)
ops.node(180, 10.35, 1.83, 18.0)
ops.node(181, 10.35, 5.38, 18.0)
ops.node(182, 10.35, 8.93, 18.0)
ops.node(183, 10.35, 12.51, 18.0)
ops.node(184, 15.30, 1.83, 18.0)
ops.node(185, 15.30, 12.51, 18.0)
ops.node(186, 16.30, 0, 18.0)
ops.node(187, 16.30, 1.83, 18.0)
ops.node(188, 16.30, 2.63, 18.0)
ops.node(189, 16.30, 5.38, 18.0)
ops.node(190, 16.30, 8.93, 18.0)
ops.node(191, 16.30, 11.71, 18.0)
ops.node(192, 16.30, 12.51, 18.0)
```

```

# Nodos Maestros (Centro gravedad)
ops.node(193, 8.15, 6.255, 3.00)
ops.node(194, 8.15, 6.255, 6.00)
ops.node(195, 8.15, 6.255, 9.00)
ops.node(196, 8.15, 6.255, 12.00)
ops.node(197, 8.15, 6.255, 15.00)
ops.node(198, 8.15, 6.255, 18.00)

# Restricciones en base
ops.fix(1, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(2, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(3, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(4, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(5, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(6, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(7, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(8, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(9, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(10, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(11, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(12, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(13, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(14, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(15, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(16, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(17, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(18, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(19, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(20, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(21, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(22, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(23, 1, 1, 1, 1, 1)
ops.fix(24, 1, 1, 1, 1, 1)

# Restricciones en nudos de entrepiso ( 3 GDL)
for i in range (25,199):
    ops.fix(i, 0, 0, 1, 1, 1, 0)

# Diafragma Rigido GDL 3 es normal al plano del diafragma
# rigidDiaphragm GDL 3 | Nudo maestro | Nodos enlazados
ops.rigidDiaphragm(3, 193, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33,34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52)
ops.rigidDiaphragm(3, 194, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80)
ops.rigidDiaphragm(3, 195, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108)
ops.rigidDiaphragm(3, 196, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133)
ops.rigidDiaphragm(3, 197, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161)
ops.rigidDiaphragm(3, 198, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189,

```

TRANSFORMACIÓN ELEMENTOS

```

[3]: # El eje z del elmta (Local) con que eje global coincide
ops.geomTransf('Linear', 1001, 0, -1, 0); # Columnas
ops.geomTransf('Linear', 1002, 0, 0, 1); # Vigas en eje X

# ops.geomTransf('Linear', 1003, 0, 0, 0); # Vigas en eje Y REVISAAAR

```

SECCIONES

```

[4]: # Secciones Elásticas
Ec=2.17e6
# section('Elastic', secTag, E_mod, A, Iz, Iy, G_mod, Jxx, alphaY=None, alphaZ=None)
ops.section('Elastic', 1, Ec, 0.10, 0.000521, 0.001333, 0.9e6, 1.273e-3) # CV 0.25x0.40
ops.section('Elastic', 2, Ec, 0.10, 0.001333, 0.000521, 0.9e6, 1.273e-3) # CH 0.40x0.25 y VS 0.25x0.40
ops.section('Elastic', 4, Ec, 0.125, 0.002604, 0.000651, 0.9e6, 1.788e-3) # CZ 0.25x0.50 y VP( 0.25x0.50)
ops.section('Elastic', 5, Ec, 0.08, 0.001067, 0.000267, 0.9e6, 0.732e-3) # VB 0.20x0.40

```

ELEMENTOS

```

*($): # ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, Area, E_mod, G_mod, Jxx, Iy, Iz, transflag, <'mass', mass>, <'cMass'>)
G=0.9e6
Ec=2.17e6
A1=0.10
A2=0.125
A3=0.08

JxxCV=1.273e-3
IyCV=0.001333
IzCV=0.000521
JxxCHVS=1.273e-3
IyCHVS=0.000521
IzCHVS=0.001333
JxxCZVP=1.788e-3
IyCZVP=0.000651
IzCZVP=0.002604
JxxVB=0.732e-3
IyVB=0.000267
IzVB=0.001067

ops.element('elasticBeamColumn', 1, 3, 28, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 2, 4, 29, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 3, 9, 35, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 4, 10, 36, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 5, 11, 37, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 6, 12, 38, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 7, 13, 40, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 8, 14, 41, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 9, 15, 42, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 10, 16, 43, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 11, 21, 49, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 12, 22, 50, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)

ops.element('elasticBeamColumn', 13, 28, 56, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 14, 29, 57, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 15, 35, 63, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 16, 36, 64, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 17, 37, 65, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 18, 38, 66, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 19, 40, 68, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 20, 41, 69, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 21, 42, 70, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 22, 43, 71, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 23, 49, 77, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 24, 50, 78, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)

ops.element('elasticBeamColumn', 25, 56, 84, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 26, 57, 85, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 27, 63, 91, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 28, 64, 92, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 29, 65, 93, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 30, 66, 94, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 31, 68, 96, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 32, 69, 97, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 33, 70, 98, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 34, 71, 99, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 35, 77, 105, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 36, 78, 106, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)

ops.element('elasticBeamColumn', 37, 84, 112, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 38, 85, 113, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 39, 91, 119, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 40, 92, 120, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 41, 93, 121, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 42, 94, 122, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 43, 96, 124, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 44, 97, 125, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 45, 98, 126, A2, Ec, G, JxxCZVP, IyCZVP, IzCZVP, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 46, 99, 127, A1, Ec, G, JxxCHVS, IyCHVS, IzCHVS, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 47, 105, 133, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)
ops.element('elasticBeamColumn', 48, 106, 134, A1, Ec, G, JxxCV, IyCV, IzCV, 1001)

```



```

ops.element('elasticBeamColumn', 250, 109, 118, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)
ops.element('elasticBeamColumn', 251, 118, 123, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)
ops.element('elasticBeamColumn', 252, 123, 130, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)

ops.element('elasticBeamColumn', 253, 137, 146, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)
ops.element('elasticBeamColumn', 254, 146, 151, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)
ops.element('elasticBeamColumn', 255, 151, 158, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)

ops.element('elasticBeamColumn', 256, 165, 174, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)
ops.element('elasticBeamColumn', 257, 174, 179, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)
ops.element('elasticBeamColumn', 258, 179, 186, A3, Ec, G, JxxVB, IyVB, IzVB, 1002)

# Propiedades de material y sección
thickness = 0.25 # e de placa
nu = 0.125 # relación de poisson
Ec = 2.17e6

# Definir la sección elástica para la placa
sectionTag = 2005 #Etiqueta
ops.section('ElasticMembranePlateSection', sectionTag, Ec, thickness, nu)

# PLACAS
ops.element('ShellMITC4', 259, 1, 2, 27, 26, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 260, 5, 6, 31, 30, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 261, 19, 20, 48, 47, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 262, 23, 24, 52, 51, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 263, 1, 7, 32, 26, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 264, 6, 8, 33, 31, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 265, 17, 19, 47, 44, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 266, 18, 24, 52, 45, sectionTag)

ops.element('ShellMITC4', 267, 26, 27, 55, 54, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 268, 30, 31, 59, 58, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 269, 47, 48, 76, 75, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 270, 51, 52, 80, 79, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 271, 26, 32, 60, 54, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 272, 31, 33, 61, 59, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 273, 44, 47, 75, 72, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 274, 45, 52, 80, 73, sectionTag)

ops.element('ShellMITC4', 275, 54, 55, 83, 82, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 276, 58, 59, 87, 86, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 277, 75, 76, 104, 103, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 278, 79, 80, 108, 107, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 279, 54, 60, 88, 82, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 280, 59, 61, 89, 87, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 281, 72, 75, 103, 100, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 282, 73, 80, 108, 101, sectionTag)

ops.element('ShellMITC4', 283, 82, 83, 111, 110, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 284, 86, 87, 115, 114, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 285, 103, 104, 132, 131, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 286, 107, 108, 136, 135, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 287, 82, 88, 116, 110, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 288, 87, 89, 117, 115, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 289, 100, 103, 131, 128, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 290, 101, 108, 136, 129, sectionTag)

ops.element('ShellMITC4', 291, 110, 111, 139, 138, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 292, 114, 116, 143, 142, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 293, 131, 132, 160, 159, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 294, 135, 136, 164, 163, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 295, 110, 116, 144, 138, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 296, 115, 117, 145, 143, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 297, 128, 131, 159, 156, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 298, 129, 136, 164, 157, sectionTag)

ops.element('ShellMITC4', 299, 138, 139, 167, 166, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 300, 142, 143, 171, 170, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 301, 159, 160, 188, 187, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 302, 163, 164, 192, 191, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 303, 138, 144, 172, 160, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 304, 143, 145, 173, 171, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 305, 156, 159, 187, 184, sectionTag)
ops.element('ShellMITC4', 306, 157, 164, 192, 185, sectionTag)

```

MASAS

```

[8]: # masa(NODE_TAG, masa tnf sz/m), masx, masz, Jx, Jy, Jz)
ops.mass(193, 21.64, 21.64, 0, 0, 0, 758.51)
ops.mass(194, 21.64, 21.64, 0, 0, 0, 758.51)
ops.mass(195, 21.64, 21.64, 0, 0, 0, 758.51)
ops.mass(196, 21.64, 21.64, 0, 0, 0, 758.51)
ops.mass(197, 21.64, 21.64, 0, 0, 0, 758.51)
ops.mass(198, 12.65, 12.65, 0, 0, 0, 443.59)

```

```
[9]: ### MODAL
nn = 6 # Nro de niveles
N = 3*nn # Nro de GDL
landa = ops.eigen('-fullGenLapack', N) # Valores propios
landa = np.array(landa) # Convierte la lista en un array de NumPy, se puede realizar operaciones
wn = landa**0.5
Tn = 2*np.pi/wn
for i in range(N):
    print('Modo', i+1, 'T = ', round(Tn[i],3), 's', ' w =', round(wn[i],3))

Modo 1 T = 0.217 s w = 29.013
Modo 2 T = 0.211 s w = 29.779
Modo 3 T = 0.134 s w = 46.883
Modo 4 T = 0.074 s w = 85.066
Modo 5 T = 0.072 s w = 87.311
Modo 6 T = 0.046 s w = 135.333
Modo 7 T = 0.046 s w = 137.459
Modo 8 T = 0.045 s w = 138.905
Modo 9 T = 0.036 s w = 176.409
Modo 10 T = 0.035 s w = 181.065
Modo 11 T = 0.031 s w = 205.575
Modo 12 T = 0.03 s w = 211.002
Modo 13 T = 0.029 s w = 218.685
Modo 14 T = 0.028 s w = 221.321
Modo 15 T = 0.028 s w = 227.163
Modo 16 T = 0.022 s w = 285.061
Modo 17 T = 0.019 s w = 332.192
Modo 18 T = 0.018 s w = 357.641
```

CARGA AXIAL

```
[10]: # Crear el analisis
ops.constraints('Transformation') # Para 3D
ops.numberer('RCM') # Para 3D
ops.system('BandGeneral')
ops.test('EnergyIncr', 0.000001, 30)
ops.algorithm('Newton')
Nsteps = 30
ops.integrator('LoadControl', 1/Nsteps)
# determine the next time step for an analysis
# Analysis Type
ops.analysis('Static')
ok = ops.analyze(Nsteps) # apply gravity
if ok == 0:
    print('Carga axial aplicada')
else:
    print('Error al aplicar carga axial')
```

Carga axial aplicada

PLOTEO

```
[11]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d.art3d import Poly3DCollection

# Cargar nodos desde NODOS.txt
try:
    nodos = np.genfromtxt('NODOS.txt', delimiter=';', dtype=float)
    nodos_dict = {int(nodo[0]): nodo[1:] for nodo in nodos} # Diccionario {ID_NODO: [X, Y, Z]}
except Exception as e:
    print(f'Error al cargar NODOS.txt: {e}')
    exit()

# Cargar elementos tipo vigas y columnas
try:
    vigas_columnas = np.genfromtxt('VC_GN.txt', delimiter=';', dtype=float)
    if vigas_columnas.ndim == 1:
        vigas_columnas = vigas_columnas.reshape(1, -1)
except Exception as e:
    print(f'Error al cargar VC_GN.txt: {e}')
    exit()

# Cargar elementos tipo placas
try:
    placas = np.genfromtxt('PLACA_GN.txt', delimiter=';', dtype=float)
    if placas.ndim == 1:
        placas = placas.reshape(1, -1)
except Exception as e:
    print(f'Error al cargar PLACA_GN.txt: {e}')
    exit()

# Crear el diccionario de formas de los elementos
ele_shapes = {}

# Agregar vigas y columnas al diccionario
for elem in vigas_columnas:
    ele_id = int(elem[0]) # ID del elemento
    nodos_elemento = elem[1:] # ID de los nodos del elemento
    ele_shapes[ele_id] = ['linea', nodos_elemento]
```

```

# Cargar elementos tipo placas
try:
    placas = np.genfromtxt('PLACA_6N.txt', delimiter=';', dtype=float)
    if placas.ndim == 1:
        placas = placas.reshape(1, -1)
except Exception as e:
    print(f'Error al cargar PLACA_6N.txt: {e}')
    exit()

# Crear el diccionario de formas de los elementos
ele_shapes = {}

# Agregar vigas y columnas al diccionario
for elem in vigas_columnas:
    ele_id = int(elem[0]) # ID del elemento
    nodos_elemento = elem[1:] # ID de los nodos del elemento
    ele_shapes[ele_id] = ['line', nodos_elemento]

# Agregar placas al diccionario
for elem in placas:
    ele_id = int(elem[0]) # ID del elemento
    nodos_elemento = elem[1:] # ID de los nodos del elemento
    ele_shapes[ele_id] = ['quad', nodos_elemento] # quad para placas cuadradas

# Función para graficar
def plot_elements_3d(ele_shapes, nodos_dict, fig_wi_he=(10., 7.)):
    fig = plt.figure(figsize=fig_wi_he)
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    ax.set_title('MODELO 3D')
    ax.set_xlabel('X')
    ax.set_ylabel('Y')
    ax.set_zlabel('Z')

    # Configuración de los ticks del eje Z
    ax.set_zticks([3, 6, 9, 12, 15, 18])

    # Dibujar elementos
    for ele_id, shape_data in ele_shapes.items():
        shape_type, node_ids = shape_data
        coords = np.array([nodos_dict[int(nid)] for nid in node_ids])

        if shape_type == 'line': # Graficar vigas y columnas
            ax.plot(coords[:, 0], coords[:, 1], coords[:, 2], color='blue', lw=1)

        elif shape_type == 'quad': # Graficar placas
            verts = [coords]
            poly = Poly3DCollection(verts, alpha=0.8, edgecolor='black', facecolor='orange')
            ax.add_collection3d(poly)

    # Numeración de los nodos
    for node_id, coords in nodos_dict.items():
        ax.text(coords[0], coords[1], coords[2], f'{node_id}', color='red', fontsize=8)

    # Identificar nodos de la base (nodos del 1 al 24)
    base_nodos = [node_id for node_id in nodos_dict.keys() if 1 <= node_id <= 24]

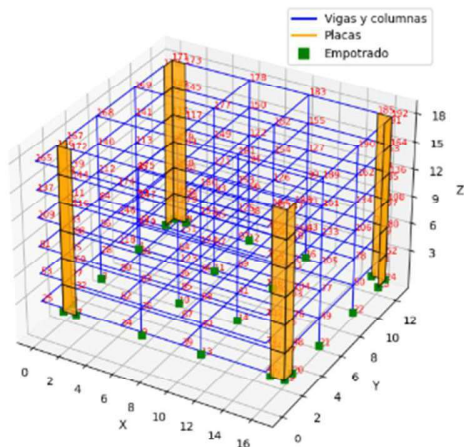
    # Dibujar restricciones en los nodos de la base (usando marcador cuadrado para empotrados)
    for node_id in base_nodos:
        coords = nodos_dict[node_id]
        ax.scatter(coords[0], coords[1], coords[2], color='green', marker='s', s=40) # Cambiado a 's' (cuadrado)

    # Leyenda simple
    ax.plot([], [], color='blue', lw=2, label='Vigas y columnas') # Leyenda para vigas y columnas
    ax.plot([], [], color='orange', lw=2, label='Placas') # Leyenda para placas
    ax.plot([], [], color='green', marker='s', linestyle='None', markersize=8, label='Empotrado') # Cambiado a 's' (cuadrado)
    plt.legend(loc='upper right') # Mostrar leyenda en la esquina superior derecha
    plt.show()

# Graficar
plot_elements_3d(ele_shapes, nodos_dict)

```

MODELO 3D



Anexo 8: Código para Obtención del Registro Sísmico de Dirección Máxima - Matlab

```

1  clc, clear,
2  % Script para calcular ACELERACIONES ROTADAS y encontrar el ÁNGULO DE MAYOR ACELERACIÓN
3  % (considerando valores absolutos)
4  % También guarda las aceleraciones rotadas usando el ángulo máximo en un archivo.
5
6  try
7  % Definir el nombre del archivo de entrada
8  filename = 'SISMO_16.txt'; % Cambia 'datos.txt' por el nombre de tu archivo si es diferente
9
10 % Cargar los datos del archivo
11 data = load(filename);
12
13 % Verificar que el archivo tenga exactamente dos columnas
14 if size(data, 2) ~= 2
15     error('El archivo debe contener exactamente dos columnas (a_x y a_y en cm/s²).');
16 end
17
18 % Extraer las columnas de aceleraciones a_x y a_y (en cm/s²)
19 a_x_cm = data(:, 1); % Aceleración en la dirección x
20 a_y_cm = data(:, 2); % Aceleración en la dirección y
21
22 % Convertir las aceleraciones de cm/s² a g
23 g_conversion = 981; % 1g = 981 cm/s²
24 a_x_g = a_x_cm / g_conversion; % Conversión a g
25 a_y_g = a_y_cm / g_conversion;
26
27 % Inicializar variables para encontrar el ángulo de mayor aceleración
28 max_accel = -Inf; % Valor máximo inicializado como muy pequeño
29 best_angle = 0; % Ángulo correspondiente al valor máximo
30
31 % Crear un rango de ángulos desde 0° hasta 180° (en pasos de 1°)
32 for theta_deg = 0:180
33     theta_rad = deg2rad(theta_deg); % Convertir el ángulo a radianes
34
35     % Calcular la aceleración rotada para el ángulo actual
36     a_rotado_g = a_x_g * cos(theta_rad) + a_y_g * sin(theta_rad);
37
38     % Evaluar el valor máximo considerando el valor absoluto
39     current_max = max(abs(a_rotado_g)); % Máximo absoluto en este ángulo
40     if current_max > max_accel
41         max_accel = current_max; % Actualizar el máximo global
42         best_angle = theta_deg; % Guardar el ángulo correspondiente
43     end
44 end
45
46 % Calcular las aceleraciones rotadas con el mejor ángulo encontrado
47 best_angle_rad = deg2rad(best_angle); % Convertir el mejor ángulo a radianes
48 a_rotado_best_angle = a_x_g * cos(best_angle_rad) + a_y_g * sin(best_angle_rad);
49

```

```

50 % Guardar las aceleraciones rotadas en un archivo de texto
51 output_accelerations_filename = 'aceleraciones_SISM016.txt';
52 fid = fopen(output_accelerations_filename, 'w');
53 fprintf(fid, 'Aceleraciones rotadas usando el ángulo máximo (%d°):\n', best_angle);
54 fprintf(fid, '%.6f\n', a_rotado_best_angle);
55 fclose(fid);
56
57 % Guardar los resultados generales en otro archivo
58 output_results_filename = 'resultados_maximosSISM016.txt';
59 fid = fopen(output_results_filename, 'w');
60 fprintf(fid, 'El ángulo de mayor aceleración (valor absoluto) es: %d°\n', best_angle);
61 fprintf(fid, 'El valor máximo de aceleración es: %.6f g\n', max_accel);
62 fclose(fid);
63
64 disp(['Cálculo completado. Los resultados se han guardado en: ', output_results_filename]);
65 disp(['Ángulo de mayor aceleración (valor absoluto): ', num2str(best_angle), '°']);
66 disp(['Valor máximo de aceleración: ', num2str(max_accel), ' g']);
67 disp(['Las aceleraciones rotadas se han guardado en: ', output_accelerations_filename]);
68 catch ME
69 % Manejo de errores para casos comunes
70 switch ME.identifier
71     case 'MATLAB:load:couldNotReadFile'
72         disp('Error: No se pudo cargar el archivo. Verifique que el nombre y la ubicación sean correctos.');
```

Anexo 9: Código para Obtención del Espectro de Dirección Máxima – Matlab

```

1  %% ESPECTRO DE DIRECCIÓN MÁXIMA - FRENTE AL SISMO 16(varia)
2  clc; clear; close all;
3  % Parámetros del sistema
4  m = 1; % Masa
5  xi = 0.05; % Coeficiente de amortiguamiento
6  dt = 0.005; % Incremento de tiempo (s)
7  c = 2 * m * xi; % Coeficiente de amortiguamiento (Ns/m)
8
9  %% Carga Dinámica discreta de un sismo
10 Acel = load('aceleraciones_SISMO16.txt'); % Carga el archivo con las aceleraciones en g
11 Pt = -m * Acel; % Fuerza dinámica discreta
12
13 %% Respuesta para diferentes Tn
14 n = length(Pt); % Número de puntos en el registro
15 t = (0:dt:(n-1)*dt); % Vector de tiempo
16
17 % Inicializar vectores de respuesta
18 ut = zeros(n, 1); % Desplazamiento
19 vt = zeros(n, 1); % Velocidad
20 at = zeros(n, 1); % Aceleración
21
22 % Inicializar vectores para almacenar los resultados
23 Tn_values = []; % Para almacenar los valores de Tn
24 maxAcel = []; % Para almacenar las máximas aceleraciones
25
26 % Iterar sobre los valores de Tn desde 0 hasta 5 con paso de 0.01
27 for Tn = 0:0.01:5
28     wn = 2 * pi / Tn; % Frecuencia natural (rad/s)
29     k = m * wn^2; % Rigidez (N/m)
30     wD = wn * sqrt(1 - xi^2); % Frecuencia amortiguada (rad/s)
31
32     %% Constantes de las fórmulas de recurrencia
33     % Cálculos adicionales
34     div1 = xi / sqrt(1 - xi^2);
35     wvart = wD * dt;
36     divart = 2 * xi / (wn * dt);
37     elev = exp(-xi * wn * dt);
38     seno = sin(wD * dt);
39     cose = cos(wD * dt);
40     rest = 1 - 2 * xi^2;
41     rest2 = 2 * xi^2 - 1;
42     div2 = wn / sqrt(1 - xi^2);
43
44     % Fórmulas de recurrencia Nigam Jennings
45     A = elev * (div1 * seno + cose);
46     B = elev * ((1 / wD) * seno);
47     C = (1 / k) * (divart + elev * (((rest / wvart) - div1) * seno - (1 + divart) * cose));
48     D = (1 / k) * (1 - divart + elev * ((rest2 / wvart) * seno + divart * cose));
49     A1 = -elev * (div2 * seno);
50     B1 = elev * (cose - div1 * seno);
51     C1 = (1 / k) * ((-1 / dt) + elev * ((div2 + div1 / dt) * seno + (1 / dt) * cose));
52     D1 = (1 / (k * dt)) * (1 - elev * (div1 * seno + cose));

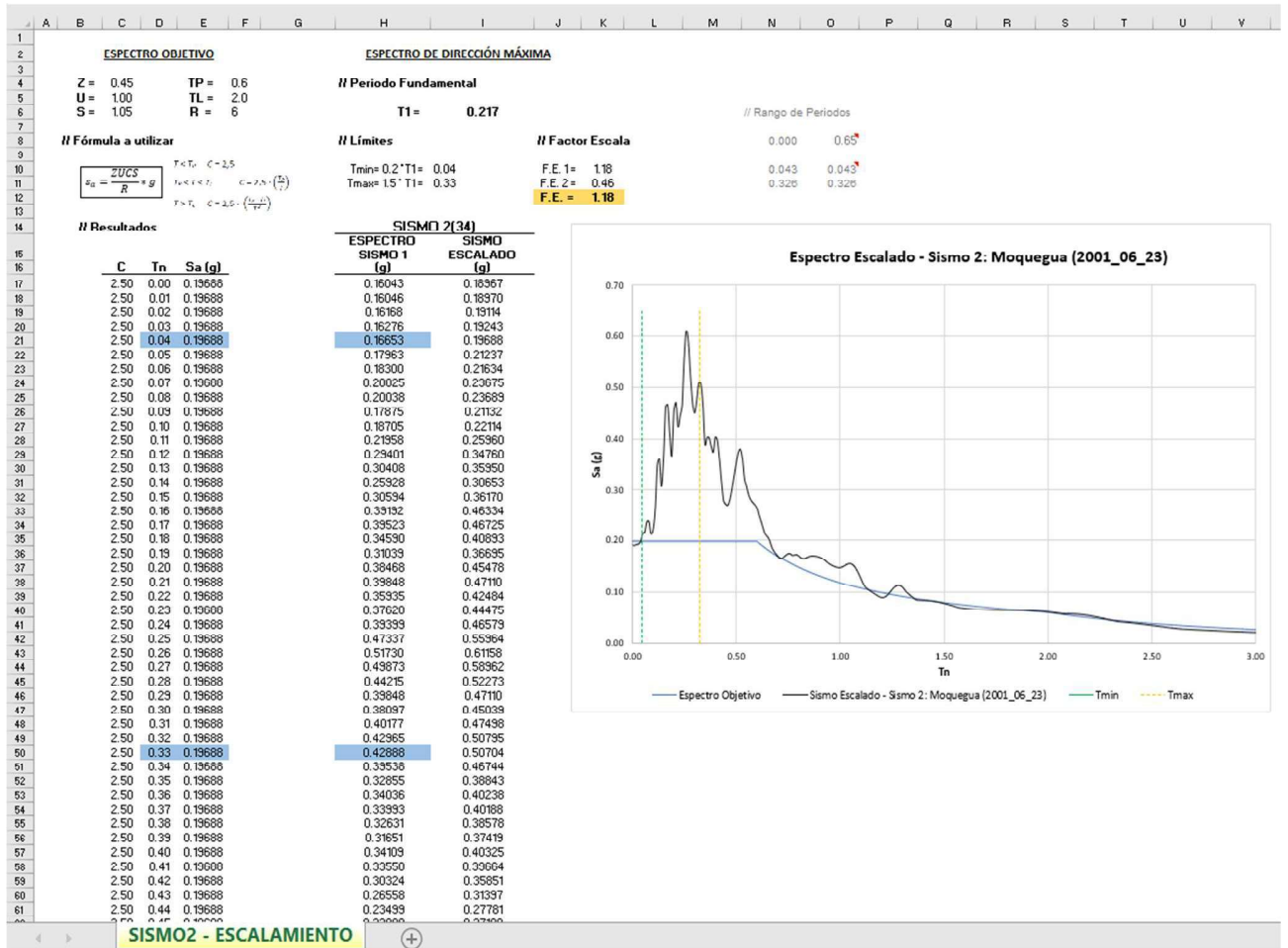
```

```

54     %% Bucle para calcular las respuestas
55     for i = 1:n-1
56         % Fórmulas de recurrencia
57         ut(i+1, 1) = A * ut(i, 1) + B * vt(i, 1) + C * Pt(i, 1) + D * Pt(i+1, 1);
58         vt(i+1, 1) = Δ1 * ut(i, 1) + B1 * vt(i, 1) + C1 * Pt(i, 1) + D1 * Pt(i+1, 1);
59         at(i+1, 1) = (Pt(i+1, 1) - c * vt(i+1, 1) - k * ut(i+1, 1)) / m + Acel(i+1,1);
60     end
61
62     %% Almacenar la máxima aceleración para este Tn
63     Tn_values = [Tn_values; Tn];           % Agregar Tn al vector
64     maxAcel = [maxAcel; max(abs(at))];     % Agregar la máxima aceleración al vector
65 end
66
67 % No es necesario convertir las aceleraciones dinámicas ya que están en g
68 % Solo convertimos las aceleraciones máximas a unidades de g (1g = 9.81 m/s^2)
69 maxAcel_g = maxAcel; % En unidades de g, no es necesario hacer la conversión
70
71 % Guardar los resultados en el archivo .txt con unidades de g
72 resultados = [Tn_values, maxAcel_g]; % Combinar Tn y aceleraciones en una matriz
73 writematrix(resultados, 'espectro_acel_16.txt', 'Delimiter', 'tab');
74 disp('Los resultados de Tn y aceleraciones en unidades de g han sido guardados en "espectro_acel.txt".');
75
76 % Graficar las aceleraciones vs Tn en unidades de g
77 figure;
78 plot(Tn_values, maxAcel_g, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
79 title('Aceleración Máxima vs Periodo Natural (Tn) en unidades de g');
80 xlabel('Periodo Natural (Tn) [s]');
81 ylabel('Aceleración Máxima [g]');
82 grid on;

```

Anexo 10: Escalamiento de un Sismo No Impulsivos (Sismo 2) – Excel



SISMO2 - ESCALAMIENTO

Anexo 11: Código Desarrollado para Hallar los Desplazamientos en OpenSeesPy

```

DESPLAZAMIENTOS

[10]: import numpy as np
import opensespy.opensees as ops
import matplotlib.pyplot as plt

# Amortiguamiento Rayleigh
zeta = 0.05
wi = wn[0]
Tj = 1.91 * Tn[0]
wj = 2 * np.pi / Tj
a0 = zeta * 2 * wi * wj / (wi + wj)
a1 = zeta * 2 / (wi + wj)

ops.rayleigh(a0, 0, 0, a1)
print("Coeficientes de Rayleigh (a0, a1):", a0, a1)

# Definir la función de aceleración (SISMO)
ops.timeSeries('Path', 2, '-filePath', 'aceleraciones_SISMO30.txt', '-dt', 0.005, '-factor', (3.00*9.81))
ops.pattern('UniformExcitation', 2, 1, '-accel', 2, '-factor', 1)

ops.wipeAnalysis()
ops.constraints('Transformation')
ops.numberer('RCM')
ops.system('UmfPack')
ops.test('NormDispIncr', 1e-9, 100)
ops.algorithm('KrylovNewton')
ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25)
ops.analysis('Transient')

# Definir las nodos por nivel usando rangos
nodos_por_nivel = {
    1: list(range(25, 52)) + [193], # Nivel 1
    2: list(range(53, 80)) + [194], # Nivel 2
    3: list(range(81, 108)) + [195], # Nivel 3
    4: list(range(109, 136)) + [196], # Nivel 4
    5: list(range(137, 164)) + [197], # Nivel 5
    6: list(range(165, 192)) + [198], # Nivel 6
}

desplazamientos_por_nivel = {nivel: [] for nivel in nodos_por_nivel.keys()}
nodo_especifico = 165
desplazamientos_nodo_especifico = []
time_vals = []

t = 0.0
dt = 0.005
Acel = np.loadtxt('aceleraciones_SISMO30.txt')
N_Acel = len(Acel)
Tfinal = (N_Acel - 1) * dt # Asegurar que el tiempo final sea correcto

while t <= Tfinal:
    ok = ops.analyze(1, dt)
    if ok != 0:
        print("El análisis Dinámico falló en t =", t)
        break

    time_vals.append(t)

    for nivel, nodos in nodos_por_nivel.items():
        despl_nivel = [ops.nodeDisp(nodo, 1) * 1000 for nodo in nodos]
        if despl_nivel:
            desplazamientos_por_nivel[nivel].append(np.max(np.abs(despl_nivel))) # Cambio aquí para valor absoluto

    desp_nodo = ops.nodeDisp(nodo_especifico, 1) * 1000
    if t == 0.0:
        desp_nodo = 0.0 # Forzar el primer desplazamiento a 0
    desplazamientos_nodo_especifico.append(desp_nodo)

    t += dt # Asegurar que el tiempo avanza correctamente

if ok == 0:
    print("Análisis Completado")

```

```

ops.wipeAnalysis()

# Guardar desplazamientos máximos absolutos por nivel
with open("desplazamientos_maximos_absolutos_SISM030.txt", "w") as file:
    file.write("Nivel DesplazamientoMaximoAbsoluto(mm)\n")
    for nivel, despl in desplazamientos_por_nivel.items():
        if despl:
            file.write(f"{nivel} {np.max(despl):.6f}\n") # Ya son valores absolutos

max_despl_absoluto_por_nivel = {nivel: np.max(despl) if despl else 0.0 for nivel, despl in desplazamientos_por_nivel.items()}

print("\nDesplazamientos máximos absolutos por nivel:")
for nivel in sorted(max_despl_absoluto_por_nivel.keys(), reverse=True):
    print(f"Desplazamiento Máximo Absoluto en el {nivel}: {max_despl_absoluto_por_nivel[nivel]:.6f} mm")

# Guardar desplazamientos vs tiempo para nodo específico
with open("desplazamientos_vs_tiempo_nodo_especifico.txt", "w") as file:
    file.write("Tiempo(s) Desplazamiento(mm)\n")
    for t, desp in zip(time_vals, desplazamientos_nodo_especifico):
        file.write(f"{t:.6f} {desp:.6f}\n")

# Gráfico de desplazamiento del nodo específico vs tiempo
plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.plot(time_vals, desplazamientos_nodo_especifico, label=f"Desplazamiento Nodo {nodo_especifico}", color="blue")
plt.xlabel("Tiempo (s)")
plt.ylabel("Desplazamiento (mm)")
plt.title(f"Desplazamiento del Nodo {nodo_especifico} vs Tiempo")
plt.grid()
plt.legend()
plt.show()

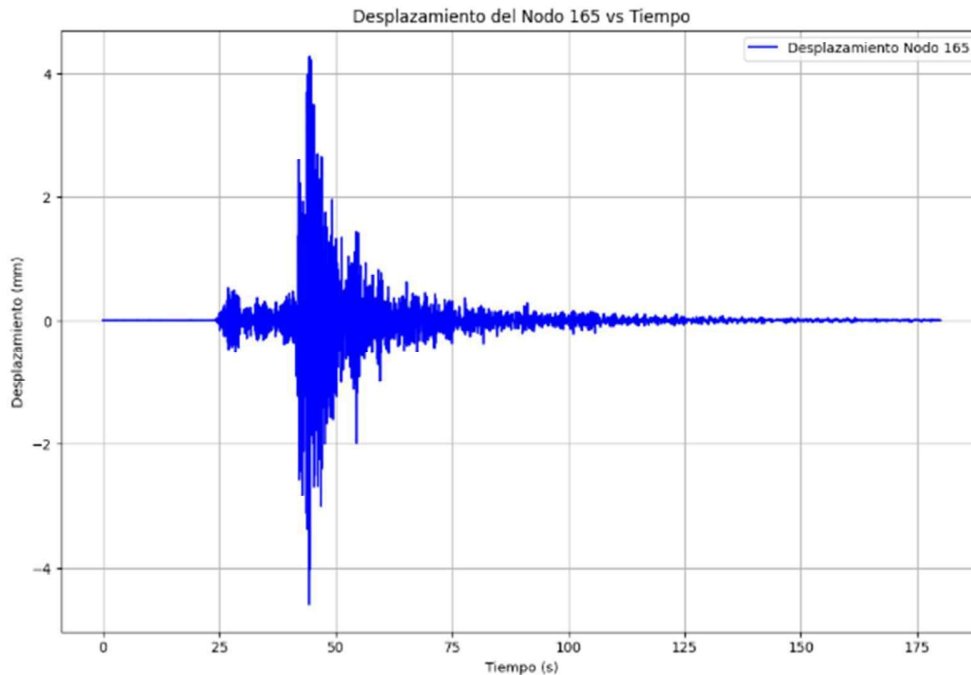
# Gráfico de desplazamientos máximos absolutos por piso
niveles_ordenados = sorted(max_despl_absoluto_por_nivel.keys(), reverse=False)
desplazamientos_ordenados = [max_despl_absoluto_por_nivel[nivel] for nivel in niveles_ordenados]

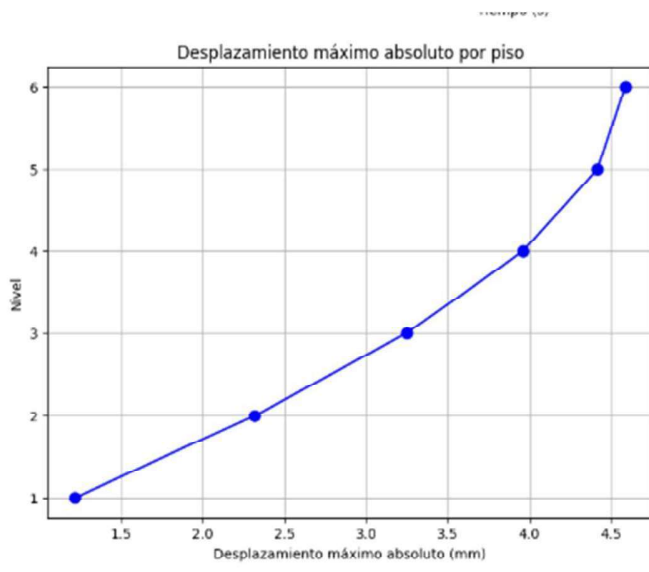
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(desplazamientos_ordenados, niveles_ordenados, marker='o', linestyle='-', color='b', markersize=8)
plt.xlabel("Desplazamiento máximo absoluto (mm)")
plt.ylabel("Nivel")
plt.title("Desplazamiento máximo absoluto por piso")
plt.grid(True)
plt.yticks(niveles_ordenados)
plt.show()

```

Coefficientes de Rayleigh (a0, a1): 0.9970241619559678 0.002262255777999025
Análisis Completado

Desplazamientos máximos absolutos por nivel:
Desplazamiento Máximo Absoluto en el 6: 4.587256 mm
Desplazamiento Máximo Absoluto en el 5: 4.415220 mm
Desplazamiento Máximo Absoluto en el 4: 3.958901 mm
Desplazamiento Máximo Absoluto en el 3: 3.246394 mm
Desplazamiento Máximo Absoluto en el 2: 2.317579 mm
Desplazamiento Máximo Absoluto en el 1: 1.217459 mm





Anexo 12: Código Desarrollado para Hallar las Derivas o Drifts en OpenSeesPy

```
[11]: ### DRIFTS

[12]: import matplotlib.pyplot as plt

# Configuración inicial
FACTOR_AMPLIFICACION = 0.75 * 6
ALTURA_ENTRE_PISOS_MM = 3000
ARCHIVO_DESPLAZAMIENTOS = "desplazamientos_maximos_absolutos_SISMO30.txt"

def leer_desplazamientos(archivo):
    desplazamientos = (0: 0.0) # Añadimos la base con desplazamiento 0
    with open(archivo, "r") as file:
        next(file) # Saltar encabezada
        for line in file:
            partes = line.strip().split()
            if len(partes) >= 2:
                nivel = int(partes[0])
                desplazamiento = float(partes[1])
                desplazamientos[nivel] = desplazamiento
    return desplazamientos

def calcular_drifts(desplazamientos):
    drifts = (0: 0.0) # Drift en la base = 0

    # Drift primer nivel
    drifts[1] = (desplazamientos[1] * FACTOR_AMPLIFICACION) / ALTURA_ENTRE_PISOS_MM

    # Drifts niveles superiores
    for nivel in range(2, 7):
        delta = (desplazamientos[nivel] - desplazamientos[nivel-1]) * FACTOR_AMPLIFICACION
        drifts[nivel] = delta / ALTURA_ENTRE_PISOS_MM

    return drifts

def graficar_drifts(drifts):
    niveles = sorted(drifts.keys())
    valores = [drifts[n] for n in niveles]

    plt.figure(figsize=(10, 6))

    # Gráfico principal
    plt.plot(valores, niveles, 's-', color='#1f77b4',
            linewidth=2, markersize=10, markerfacecolor='white',
            markeredgewidth=2)

    # Destacar punto de la base
    plt.plot([0], [0], 'o', color='red', markersize=10, label='Base (0,0)')

    # Configuración del gráfico
    plt.title("Derivas entre pisos", pad=20, fontsize=14)
    plt.xlabel("Deriva (drift)", fontsize=12, labelpad=10)
    plt.ylabel("Nivel", fontsize=12, labelpad=10)
    plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)

    # Añadir valores numéricos
    for i, val in enumerate(valores):
        if niveles[i] != 0: # No mostrar valor en la base
            plt.text(val, niveles[i], f" {val:.4f}", va='center', fontsize=10)

    # Configuración de ejes
    plt.axhline(y=0, color='gray', linestyle='-', linewidth=1)
    plt.axvline(x=0, color='gray', linestyle='-', linewidth=1)
    plt.yticks(niveles)
    plt.ylim(0, max(niveles)+0.5)
    plt.xlim(left=0) # Para que el 0 sea visible

    # Leyenda y ajustes
    plt.legend(loc='upper right')
    plt.tight_layout()
    plt.show()
```

```

# Procesamiento principal
if __name__ == "__main__":
    print(f"\nProcesando archivo: {ARCHIVO_DESPLAZAMIENTOS}")

    desplazamientos = leer_desplazamientos(ARCHIVO_DESPLAZAMIENTOS)
    drifts = calcular_drifts(desplazamientos)

    # Mostrar resultados
    print("\nRESULTADOS DE DRIFTS")
    print("-"*35)
    print("{:<8} {:<15}".format("Nivel", "Drift"))
    print("-"*25)
    for nivel in sorted(drifts.keys()):
        print(f"{nivel:>5}: {drifts[nivel]:.6f}")

    graficar_drifts(drifts)

```

Procesando archivo: desplazamientos_maximos_absolutos_SISMO30.txt

RESULTADOS DE DRIFTS

```

-----
Nivel  Drift
-----
0: 0.000000
1: 0.001826
2: 0.001650
3: 0.001393
4: 0.001069
5: 0.000684
6: 0.000258

```

