

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS SÍSMICO DINÁMICO NO LINEAL DE UNA EDIFICACIÓN
DE SEIS NIVELES CON DISIPADORES HISTERÉTICOS MEDIANTE
OPENSEESPY TACNA 2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. Luis Anibal Musaja Chura

Bach. Ronny Coaquira Huanca

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 SÍSMICO DINÁMICO NO LINEAL DE UNA EDIFICACIÓN
DE SEIS NIVELES CON DISIPADORES HISTERÉTICOS
MEDIANTE OPENSEESPY TACNA 2025”

Tesis sustentada y aprobada el día 21 de agosto del 2025 estando integrado
el Jurado Calificador por:


PRESIDENTE


:
Mtro. Ing. César José Avendaño Jihuallanga


SECRETARIO


:
Mag. Ing. Julia Cleila Laura Quispe

VOCAL


:
Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramirez

ASESOR DE TESIS

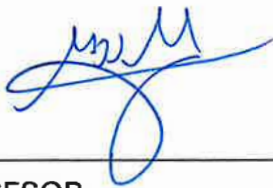

:
Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramirez

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Wilber Percy Mendoza Ramírez, en mi condición de ASESOR acreditado con Resolución de Facultad N° 110-2025-FIG/UNJBG del 11 de febrero del 2025, del Trabajo de Tesis titulado: **“ANÁLISIS SÍSMICO DINÁMICO NO LINEAL DE UNA EDIFICACIÓN DE SEIS NIVELES CON DISIPADORES HISTERÉTICOS MEDIANTE OPENSEESPY TACNA 2025”**. Presentado por los bachilleres: **RONNY COAQUIRA HUANCA** y **LUIS ANIBAL MUSAJA CHURA**. Para optar el 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 **6 %**. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciada líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional en Ingeniero Civil, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

Tacna, 18 de agosto del 2024.



FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos: WILBER PERCY MENDOZA RAMIREZ

DNI: 00520705



Huella dactilar



FIRMA AUTOR

Nombres y apellidos: LUIS ANIBAL MUSAJA CHURA

DNI:75341805



Huella dactilar



FIRMA AUTOR

Nombres y apellidos: RONNY COAQUIRA HUANCA

DNI:75630311



Huella dactilar

Dedicatoria

A mis padres, Luz y Hernán, por su amor incondicional y por ser siempre mi mayor fuente de fuerza y motivación. A mis hermanos, por su compañía; y a todas aquellas personas que, con pequeños gestos, me inspiraron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Ronny Coaquira Huanca

Esta tesis está dedicada con profundo amor y gratitud a mi madre, Maribel Chura Arce, quien ha sido la persona que más ha influido en mi vida. Su fortaleza, sabiduría y constante apoyo han sido la base de cada uno de mis logros. A mis hermanos, quienes son la alegría de mis días y mi mayor motivación para seguir adelante. Y finalmente, a Débora, mi adorada mascota, cuya compañía incondicional ha sido un refugio en los días difíciles, una fuente de alegría cotidiana y un recordatorio silencioso del amor más puro y leal.

Luis Anibal Musaja Chura

Agradecimiento

Queremos expresar, en primer lugar, nuestro más profundo agradecimiento a nuestros padres, quienes han sido el pilar fundamental a lo largo de este proceso. Su esfuerzo, sacrificio, comprensión y apoyo incondicional han sido esenciales para alcanzar esta meta. Gracias por creer en nosotros incluso en los momentos más difíciles.

Asimismo, extendemos nuestro sincero agradecimiento al Mtro. Ing. Wilber Mendoza, por su valiosa orientación, exigencia académica y constante disposición para guiarnos en esta etapa de formación profesional.

Finalmente, agradecemos a Dios por habernos brindado salud, paciencia y fortaleza para culminar esta importante etapa de nuestras vidas.

Resumen

La presente tesis, titulada *Análisis sísmico dinámico no lineal de una edificación de seis niveles con disipadores histeréticos mediante OpenSeesPy – Tacna 2025*, tiene como objetivo principal evaluar el desempeño sísmico de una edificación mediante la incorporación de disipadores histeréticos, empleando OpenSeesPy. La investigación se desarrolló bajo una metodología de tipo aplicada, con un enfoque exploratorio-descriptivo y un diseño cuasi-experimental, tomando como muestra una edificación de seis niveles con sistema estructural aporticado, ubicada en la ciudad de Tacna. Mediante el análisis dinámico no lineal tipo tiempo-historia, se observó que la incorporación de disipadores histeréticos redujeron en promedio un 49 % los desplazamientos de techo y las derivas, cumpliendo con lo establecido por la norma ASCE/SEI 7-22 y la Norma Técnica Peruana E.030. En conclusión, se valida que la implementación de disipadores histeréticos en edificaciones aporticadas contribuye significativamente a mejorar su desempeño sísmico frente a solicitaciones severas. Asimismo, se confirma que OpenSeesPy es una herramienta robusta y precisa para la simulación de comportamiento estructural no lineal, recomendándose su uso en estudios técnicos y académicos relacionados con la ingeniería sísmica en zonas de alta peligrosidad sísmica como Tacna.

Palabras clave: *Análisis sísmico dinámico no lineal, OpenSeesPy, disipadores histeréticos.*

Abstract

The main objective of this thesis, entitled *Nonlinear dynamic seismic analysis of a six-story building with hysteretic dampers using OpenSeesPy - Tacna 2025*, is to evaluate the seismic performance of a building by incorporating hysteretic dampers, using OpenSeesPy. The research was developed under an applied methodology, with an exploratory-descriptive approach and a quasi-experimental design, taking as a sample a six-story building with a framed structural system, located in the city of Tacna. Through nonlinear dynamic time-history analysis, it is supervised that the incorporation of hysteretic dampers reduced roof displacements and drifts by an average of 49%, complying with the provisions of the ASCE/SEI 7-22 standard and the Peruvian Technical Standard E.030. In conclusion, it is confirmed that the implementation of hysteretic dampers in framed buildings significantly contributes to improving their seismic performance under severe loads. Furthermore, it is confirmed that OpenSeesPy is a robust and accurate tool for simulating nonlinear structural behavior, recommending its use in technical and academic studies related to earthquake engineering in high-risk seismic zones such as Tacna.

Keywords: *Nonlinear dynamic seismic analysis, OpenSeesPy, hysteretic dampers.*

Introducción

El análisis sísmico no lineal de estructuras es fundamental para garantizar la seguridad y funcionalidad de los edificios ubicados en zonas de alta actividad sísmica, como la ciudad de Tacna. En este contexto, el uso de disipadores histeréticos representa una técnica efectiva para la mitigación de daños estructurales durante eventos sísmicos.

La herramienta OpenSeesPy, una interfaz en Python ha motivado la presente investigación debido a su versatilidad y confiabilidad, además de su mayor rapidez en comparación con programas tradicionales como SAP2000 y ETABS para análisis no lineales. Sin embargo, existe una limitada difusión y aplicación de esta herramienta en combinación con disipadores histeréticos, lo que convierte a esta tesis en un aporte significativo para el campo de la ingeniería estructural.

El presente trabajo está estructurado en cinco capítulos, que se mencionan a continuación.

El Capítulo I introduce al planteamiento del problema donde se comprende el problema de investigación, los objetivos planteados y las hipótesis propuestas.

El Capítulo II aborda el marco teórico donde se ven los antecedentes relevantes y se desarrolla la base teórica vinculada a los disipadores histeréticos y al análisis sísmico.

El Capítulo III describe en detalle la metodología adoptada, el tipo y diseño de investigación., así como la población y muestra.

El Capítulo IV se presenta los resultados obtenidos del análisis no lineal dinámico en OpenSeesPy en la edificación de seis niveles con disipadores histeréticos.

Finalmente, en el Capítulo V se muestra la discusión de resultados, seguido por las conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas. Adicionalmente a ello, en los anexos se adjuntan los planos y códigos desarrollados para el trabajo de investigación.

Índice de Contenido

Carátula.....	i
Aprobación	ii
Certificado de Similitud	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento	v
Resumen	vi
Abstract.....	vii
Introducción.....	viii
Índice de Contenido.....	ix
Índice de Tablas.....	xiii
Índice de Figuras	xiv
Capítulo I: Planteamiento del Problema.....	17
1.1. Descripción y Fundamentación del Problema	17
1.2. Formulación del Problema.....	18
1.2.1 Problema General	18
1.2.2 Problemas Específicos	18
1.3. Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4. Justificación e Importancia	19
1.5. Limitaciones y Alcances	21

1.6.	Hipótesis	22
1.6.1	Hipótesis General	22
1.6.2	Hipótesis Específicas	22
1.7.	Sistema de Variables, Dimensiones e Indicadores	23
1.7.1	Variable Independiente.....	23
1.7.2	Variable Dependiente	23
Capítulo II: Marco Teórico.....		25
2.1.	Antecedentes	25
2.1.1	Antecedentes Internacionales	25
2.1.2	Antecedentes Nacionales.....	26
2.1.3	Antecedentes Locales	27
2.2.	Bases Teóricas	28
2.2.1	Edificación de Seis Niveles	28
2.2.2	Análisis Sísmico Dinámico No Lineal	32
2.3.	Definición de Términos Básicos.....	51
Capítulo III: Metodología de la Investigación.....		53
3.1.	Metodología y Técnicas Utilizadas.....	53
3.1.1	Tipo y Nivel de Investigación	53
3.1.2	Nivel de Investigación	53
3.1.3	Diseño de Investigación.....	53
3.2.	Población y Muestra	54

3.2.1	Población	54
3.2.2	Muestra	54
Capítulo IV: Resultados		55
4.1.	Descripción del Modelo Estructural	55
4.1.1	Generalidades del proyecto	55
4.1.2	Características geométricas y estructurales	57
4.1.3	Propiedades Físicas del Material	58
4.1.4	Cargas gravitacionales	59
4.1.5	Peso Sísmico.....	59
4.2.	Análisis Modal	59
4.2.1	Análisis Modal Espectral.....	61
4.2.2	Derivas.....	62
4.3.	Análisis Dinámico No Lineal (OpenSeesPy).....	63
4.3.1	Propiedades no lineales de los materiales.....	63
4.3.2	Modelo sin disipadores	67
4.3.3	Modelo con disipadores	69
4.4.	Tratamiento de Registros Sísmicos.....	70
4.4.1	Selección de registros sísmicos	70
4.4.2	Filtrado y corrección de registros sísmicos	72
4.4.3	Determinación de dirección máxima de demanda.....	75
4.4.4	Escalado al espectro de diseño (Norma E.030)	79

4.5. Análisis Comparativo de Resultados	82
4.5.1 Desplazamientos de techo	82
4.5.2 Derivas.....	84
4.5.3 Validación parcial mediante modelo en SAP2000	88
Capítulo V: Discusión de Resultados	90
5.1. Hipótesis General.....	90
5.2. Hipótesis Específicas	91
5.2.1 Primera Hipótesis	91
5.2.2 Segunda Hipótesis	92
5.2.3 Tercera Hipótesis.....	93
Conclusiones.....	95
Recomendaciones o Sugerencias.....	96
Referencias Bibliográficas.....	97
Anexos.....	108

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Variables, Dimensiones e Indicadores</i>	24
Tabla 2 <i>Límites de Derivas de Entrepiso</i>	31
Tabla 3 <i>Modos de Vibración</i>	60
Tabla 4 <i>Resumen de Parámetros Sísmicos</i>	61
Tabla 5 <i>Registros sísmicos</i>	71
Tabla 6 <i>Ángulo de Máxima Dirección de Demanda</i>	77
Tabla 7 <i>Registros sísmicos escalados compatibles con el espectro objetivo</i>	80
Tabla 8 <i>Reducción de Respuesta en Techo por Efecto de Disipadores</i>	84
Tabla 9 <i>Desplazamientos Máximos y Mínimos - OpenSeesPy vs SAP2000</i>	89

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Edificación Típica de Vivienda Multifamiliar</i>	28
Figura 2 <i>Clasificación de los Sistemas estructurales en Concreto</i>	30
Figura 3 <i>Comparación de Ambos Métodos</i>	33
Figura 4 <i>Desplazamientos Residuales</i>	34
Figura 5 <i>Modelo de Sección por Fibras</i>	36
Figura 6 <i>Representación del Efecto P-Δ</i>	37
Figura 7 <i>Comportamiento de Unión Viga-Columna ante cargas dinámicas</i>	38
Figura 8 <i>Curva Esfuerzo - Deformación del Modelo de Hognestad</i>	39
Figura 9 <i>Curva Esfuerzo - Deformación del Modelo Bilineal del Acero</i>	39
Figura 10 <i>Clasificación de los Principales Tipos de Protección Sísmica</i>	41
Figura 11 <i>Esquema Típico de un Disipador Histerético de Tipo CRP</i>	42
Figura 12 <i>Configuraciones de Disipadores BRB</i>	43
Figura 13 <i>Desplazamientos de Techo</i>	44
Figura 14 <i>Modelo de Pórticos en OpenSeesPy</i>	45
Figura 15 <i>Comparación de los Modelos Desarrollados con OpenSeesPy y ETABS</i>	46
Figura 16 <i>Comportamiento del Disipador Tipo CRP en Configuración Diagonal</i>	47
Figura 17 <i>Ejemplo de Corrección por Línea Base</i>	49
Figura 18 <i>Variación del Ángulo de Rotación para el Espectro de Dirección Máxima</i>	50
Figura 19 <i>Espectros Escalados en el Rango de 0.2T y 1.5T</i>	51
Figura 20 <i>Plano de Distribución</i>	55
Figura 21 <i>Plano de Elevación</i>	56
Figura 22 <i>Plano de Estructuras</i>	57
Figura 23 <i>Modelo Estructural de la Edificación en SAP2000</i>	60
Figura 24 <i>Parámetros Sísmicos en SAP2000</i>	61

Figura 25 <i>Derivas Máximas en Dirección X-X</i>	62
Figura 26 <i>Derivas Máximas en Dirección Y-Y</i>	62
Figura 27 <i>Diagrama Esfuerzo – Deformación del Concreto</i>	63
Figura 28 <i>Modelo No Lineal para el Concreto en OpenSeesPy</i>	64
Figura 29 <i>Diagrama Esfuerzo - Deformación del Acero</i>	65
Figura 30 <i>Modelo No Lineal para el Acero en OpenSeesPy</i>	65
Figura 31 <i>Secciones Compuesta de Fibra para Columnas</i>	66
Figura 32 <i>Sección Compuesta de Fibra para Vigas Principales</i>	66
Figura 33 <i>Definición de Elementos Estructurales</i>	67
Figura 34 <i>Implementación del Método de Integración No Lineal</i>	68
Figura 35 <i>Modelo Tridimensional del Edificio en OpenSeesPy</i>	68
Figura 36 <i>Modelación Numérica de Disipadores de Energía en OpenSeesPy</i>	69
Figura 37 <i>Modelo Tridimensional del Edificio con Disipadores en OpenSeesPy</i>	69
Figura 38 <i>Filtrado y Corrección del Registro Sísmico N°1 al N°10</i>	73
Figura 39 <i>Filtrado y Corrección del Registro Sísmico N°11 al N°20</i>	74
Figura 40 <i>Variación de la Aceleración Máxima en Función del Ángulo de Rotación θ</i>	76
Figura 41 <i>Espectro de Aceleración Máxima para el Sismo N°12</i>	78
Figura 42 <i>Espectro Compatibilizado de Pseudo-Aceleraciones</i>	79
Figura 43 <i>Registro Acelerográfico Escalado, Sismo N°06</i>	80
Figura 44 <i>Registros Acelerográficos Originales vs. Escalados</i>	81
Figura 45 <i>Desplazamientos Máximos de Techo, Sismo N°06</i>	82
Figura 46 <i>Desplazamientos Máximos de Techo</i>	83
Figura 47 <i>Derivas de Entrepiso – Modelo sin Disipadores</i>	86
Figura 48 <i>Derivas de Entrepiso – Modelo con Disipadores</i>	87
Figura 49 <i>Historial de Desplazamiento de Techo – Modelo en OpenSeesPy</i>	88

Figura 50 *Historial de Desplazamiento de Techo – Modelo en SAP2000*89

Capítulo I: Planteamiento del Problema

1.1. Descripción y Fundamentación del Problema

Por su naturaleza, el Perú es un país con elevada actividad sísmica especialmente porque se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico (Tavera, 2020), el cual alberga numerosos límites de placas y zonas de subducción, lo que provoca frecuentes terremotos y erupciones volcánicas (Koketsu y Furumura, 1999), siendo responsable de aproximadamente el 90% de los terremotos en el mundo (Roqué et al. 2023).

El epicentro de la mayor cantidad de terremotos en Perú se localiza frente a la línea costera, desde Tumbes hasta Tacna, frecuentemente alcanzando magnitudes considerables que, en superficie, han provocado muerte y devastación (Tavera, 2020).

Esto en contraparte resulta de un peligro inminente, puesto que, según Goñi et al. (2019) más del 80% de las viviendas dentro del país son autoconstruidas, ocasionando diferentes errores constructivos que conllevan a que el 70% de estas viviendas no tengan garantías para soportar un gran sismo.

Debido a esto, Lewis (2003) reafirma la necesidad de mejorar el desarrollo de la construcción en los países propensos a terremotos, incluidos los edificios urbanos de varios pisos y los pequeños edificios autoconstruidos, esto acompañado de la concientización y microzonificación de riesgos.

Es por ello que, ante esa problemática resulta prudente reforzar las edificaciones mediante la aplicación de disipadores histeréticos, puesto que su aplicación en estructuras de concreto armado tienen un impacto significativo en el comportamiento sísmico.

Los estudios demuestran que los disipadores reducen considerablemente las características fundamentales de las estructuras, especialmente el cortante máximo de piso,

con reducciones superiores al 75% (Brito et al., 2022), esto resulta prudente puesto que dichos dispositivos actúan en el rango no lineal, previniendo daños estructurales al incursionar en el rango inelástico antes que los elementos principales (Caballero et al., 2023).

Además, se han identificado balances óptimos de rigidez que conducen a mecanismos últimos satisfactorios, donde los disipadores desarrollan su máxima ductilidad mientras el marco principal permanece elástico o con fluencias incipientes (Tena y Gama, 2017).

1.2. Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo realizar un análisis sísmico dinámico no lineal, incorporando disipadores histeréticos en una edificación de seis niveles, utilizando OpenSeesPy, en la ciudad de Tacna, 2025?

1.2.2 Problemas Específicos

- a) ¿Qué modelos constitutivos del concreto y el acero son adecuados para representar el comportamiento no lineal en un análisis dinámico sísmico?
- b) ¿Es posible desarrollar un código de análisis dinámico no lineal de una edificación de seis niveles en OpenSeesPy?
- c) ¿Es posible implementar un modelo numérico en OpenSeesPy que incorpore disipadores histeréticos y evalúe su impacto en el comportamiento sísmico de la edificación?

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño sísmico dinámico no lineal de una edificación de seis niveles mediante la implementación de disipadores histeréticos, utilizando OpenSeesPy, en la ciudad de Tacna, 2025.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar los modelos constitutivos del concreto y el acero, más adecuados para representar el comportamiento no lineal en un análisis dinámico sísmico.
- b) Desarrollar un modelo numérico para realizar el análisis dinámico no lineal de una edificación de seis niveles en OpenSeesPy.
- c) Implementar disipadores histeréticos en el modelo numérico y analizar su impacto en el comportamiento sísmico de la edificación.

1.4. Justificación e Importancia

La investigación presentada se justifica socialmente en base al hecho de que la región de Tacna, según Chura (2019), está situada en una zona de alta actividad sísmica, esto como consecuencia de la subducción de las placas de Nazca y Sudamericana, dicho fenómeno tectónico ha generado un riesgo sísmico significativo, evidenciado por terremotos históricos de gran magnitud, como el ocurrido en 1868, que alcanzó 8.5 en la escala de Richter. Es por ello que la implementación de disipadores sísmicos como sistema pasivo de disipación de energía, reducirá considerablemente la vulnerabilidad frente a estos fenómenos.

De igual forma, la presente investigación encuentra su justificación metodológica en las ventajas que ofrece el programa OpenSees. Según Guerrero y Maza (2020), este software se distingue por su menor tiempo computacional en comparación con otros programas

comerciales, lo que permite una mayor flexibilidad para modificar modelos matemáticos, propiedades de materiales, condiciones de análisis y obtener resultados adaptados a las necesidades específicas del usuario.

Finalmente, la investigación encuentra su justificación económica en el hecho de que los disipadores histeréticos, dentro de los diversos sistemas de protección sísmica disponibles, son una opción más económica en comparación con otras alternativas, lo que los hace asequibles para una variedad extensa de proyectos (Guerrero, 2020). Además, como destacan Pimiento et al. (2014), estos dispositivos tienen la capacidad de disipar la mayor parte de la energía generada por un sismo, minimizando los daños en la estructura principal. Esto se logra porque los disipadores absorben los efectos del sismo en sí mismos, facilitando su reemplazo y reduciendo significativamente los costos asociados a la reparación estructural tras un evento sísmico.

Importancia de la investigación

El presente trabajo de investigación es de gran relevancia, ya que busca realizar un análisis detallado sobre el comportamiento sísmico de edificaciones de 6 niveles con disipadores histeréticos en la región de Tacna, una zona con alta actividad sísmica. La importancia de esta investigación se fundamenta en los siguientes aspectos:

De importancia científico-social, esta investigación trata sobre la aplicación de tecnologías avanzadas como los disipadores histeréticos con el propósito de mejorar la resistencia sísmica de las edificaciones en Tacna, buscando reducir el riesgo de daños estructurales y pérdidas materiales durante sismos de alta magnitud, lo que tendría un impacto directo en la seguridad y calidad de vida de los habitantes, ya que al implementar estas tecnologías se contribuye a la protección de la comunidad frente a eventos sísmicos, fortaleciendo la capacidad de las edificaciones para resistir los efectos de un terremoto, lo

que a su vez favorece la mitigación de los impactos sociales y económicos que estos desastres pueden ocasionar.

De importancia académica, esta investigación tiene el potencial de convertirse en una base fundamental para futuras indagaciones sobre el comportamiento sísmico de edificaciones en zonas de alta actividad sísmica, además de proporcionar directrices clave para la implementación de soluciones innovadoras en el diseño y la construcción de estructuras resistentes a sismos, contribuyendo de este modo al desarrollo y expansión del conocimiento en ingeniería estructural, particularmente en la ingeniería sísmica, y facilitando la creación de nuevas estrategias y técnicas que fortalezcan la seguridad de las edificaciones frente a eventos sísmicos.

De importancia institucional, esta investigación es fundamental para la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, ya que refuerza su compromiso con el desarrollo científico y la resolución de problemas regionales, especialmente en Tacna, una ciudad ubicada en una de las zonas sísmicas más activas del país, al centrarse en edificaciones multifamiliares típicas de la región, el estudio respalda la misión de la universidad de formar profesionales que aborden las necesidades locales y promuevan el desarrollo sostenible, además, el uso de metodologías avanzadas, como el análisis no lineal, posiciona a la UNJBG como un referente en investigación estructural, fortaleciendo su prestigio académico y aportando soluciones aplicables tanto en el ámbito educativo como en el gubernamental.

1.5. Limitaciones y Alcances

Limitaciones

La representación precisa de los materiales, puesto que se utilizarán valores de fuentes confiables para las propiedades mecánicas de los materiales, como el módulo de

elasticidad, la resistencia a la compresión, la ductilidad y la resistencia al corte, además de que su alcance experimental está condicionado por limitaciones financieras.

El tipo de suelo, ya que se definirá utilizando un valor representativo, obtenido de los datos más actualizados de los planes de desarrollo urbano de Tacna, los cuales reflejan las condiciones geotécnicas actuales de la región.

El estudio se limita a una única edificación, dado que, según Tamayo (2003), cuando no es posible medir todas las entidades de una población, se selecciona una muestra de la población cuantificada, la cual se considera representativa de esta.

Alcances

El alcance de la investigación abarca la modelación y evaluación en OpenSeesPy de una edificación típica de concreto armado representativa de la región de Tacna, incorporando disipadores histeréticos.

1.6. Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

Mediante el uso de OpenSeesPy y siguiendo las normativas vigentes se realizará un análisis sísmico dinámico no lineal, incorporando disipadores histeréticos en una edificación de seis niveles, en la ciudad de Tacna, 2025.

1.6.2 Hipótesis Específicas

- a) Para representar el comportamiento no lineal de los materiales, se emplearán los modelos constitutivos de Hognestad para el concreto y el modelo bilineal para el acero de refuerzo.

- b) Mediante el lenguaje de programación Python se puede desarrollar un código confiable en OpenSeesPy para realizar análisis dinámico no lineal en edificaciones de seis niveles, con resultados consistentes.
- c) Mediante la implementación de disipadores histeréticos en un modelo numérico desarrollado en OpenSeesPy se puede mejorar significativamente el comportamiento sísmico de la edificación de seis niveles.

1.7. Sistema de Variables, Dimensiones e Indicadores

1.7.1 Variable Independiente

Edificación de seis niveles.

1.7.2 Variable Dependiente

Análisis sísmico dinámico no lineal.

La Tabla N° 1, muestra la operacionalización realizada a cada una de las variables.

Tabla 1*Variables, Dimensiones e Indicadores*

Variables	Definición	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Edificación de seis niveles	Es una obra construida por la actividad humana que emplea partes estructurales y arquitectónicas, con el propósito de satisfacer las necesidades del ser humano, su diseño consiste en principios de arquitectura e ingeniería.	Se determinará el sistema estructural de la edificación de seis niveles, mediante el porcentaje de fuerza cortante que se llevan las columnas, luego se obtendrá los modos de vibración de la variable mediante un Análisis Modal y las derivas mediante el Análisis Espectral.	Sistema Estructural Modos de Vibración y Derivas	Fuerza Cortante Análisis Modal Espectral
Análisis Dinámico No Lineal	Es un método empleado para analizar cómo es el comportamiento o estructural ante cargas dinámicas, como los sismos, teniendo en cuenta la no linealidad de los materiales.	El análisis dinámico no lineal se llevará a cabo mediante simulaciones computacionales utilizando OpenSeesPy, en las cuales se modelarán las características y tipología de los disipadores histeréticos, y se analizarán los desplazamientos, y las fuerzas internas, comparando los resultados obtenidos con y sin disipadores histeréticos para determinar su efectividad en la mejora del comportamiento sísmico de la edificación.	Características y Tipología de los Disipadores Histeréticos Implementación Computacional con OpenSeesPy Respuesta Estructural	Desplazamientos máximos, Derivas entrepisos, Fuerzas internas.

Nota. La definición operacional describe como se medirán cada una de las dimensiones correspondientes a las variables ya definidas.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Domínguez (2024), en su artículo titulada “Optimization and análisis of hysteretic energy dissipators in reinforced concrete frame structures of five, 10 and 15 stories”, tuvo como objetivo analizar el comportamiento de los disipadores en estructuras de pórticos de concreto armado de diferentes pisos. Para realizar la investigación el autor se centró en realizar un análisis no lineal estático y dinámico empleando dos registros diferentes, para posteriormente analizar cómo afecta el comportamiento estructural en las edificaciones con un número variable de pisos. Los resultados mostraron la efectividad de los disipadores histeréticos a medida que aumenta el número de pisos, además el uso de disipadores histeréticos disminuyó los desplazamientos. Este antecedente es relevante porque el empleo de disipadores ayuda notablemente a la estructura ante un eventual sismo.

Por su parte, Caballero et al. (2023), en su investigación titulada “Propuesta de Modelación Numérica de Disipadores Histeréticos Metálicos, en Edificaciones de Pórticos de Concreto y Acero”, tuvieron como objetivo proponer una metodología para modelar Disipadores Histeréticos metálicos en estructuras de pórticos resistentes a momento de concreto y acero. Para lo cual realizaron el modelo de la estructura y el análisis no lineal estático de plastificación continua de las edificaciones, utilizando el software SAP2000. De los resultados se ve que la implementación de disipadores en los pórticos mejoró el comportamiento de las estructuras ante cargas laterales. Este antecedente subraya la importancia de colocar estos dispositivos en pórticos.

Finalmente, Domínguez et al. (2024), en su investigación titulada “Vulnerability of reinforced concrete frames using anti-seismic hysteretic devices for the Lorca earthquake”, tuvieron como objetivo emplear el uso de disipadores histeréticos en edificaciones arriostradas en lugares que presentan una sismicidad baja a media. Para lo cual realizaron análisis no lineales empleando el registro del terremoto que sucedió en el año 2011 en Lorca, utilizando edificaciones que tengan un sistema estructural de pórticos. Los resultados de su investigación mostraron que el uso de disipadores histeréticos es una solución adecuada en la zona de estudio.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Saldaña y Scaletti (2022), en su artículo titulada “Eficiencia de los disipadores de energía en la respuesta sísmica de las edificaciones”, investigaron la eficiencia de los disipadores histeréticos como el de fluido viscoso para disminuir los desplazamientos laterales ante un sismo. El enfoque del estudio incluyó en realizar modelos simplificados de las edificaciones que consistían en masas y resortes con un comportamiento lineal. Para llevar a cabo el estudio tomaron como caso de estudio la edificación importante del aeropuerto de Lima. Como resultado obtuvieron que los modelos simplificados mostraban un comportamiento ideal en edificaciones que usan disipadores de energía.

Aquino y Patiño (2022), en su tesis titulada “Protección Sísmica de Edificios Educativos Peruanos Vulnerables con Disipadores Histeréticos”, evaluaron la vulnerabilidad de una edificación importante de dos pisos situada en una zona altamente sísmica. Para lo cual emplearon análisis no lineales estático y dinámico para un sismo de un periodo de retorno de 500 años. Plantearon dos opciones, la primera era en situar los disipadores histeréticos encima de un soporte de acero, la segunda opción consistió en quitar los muros de albañilería y poner los disipadores histeréticos encima de un soporte de acero

apoyado en las zapatas y vigas. Los resultados mostraron que ambas alternativas eran viables para evitar el colapso de la estructura. Este antecedente es relevante ya que el uso de disipadores histeréticos en edificaciones de categoría importante brinda seguridad a los ocupantes.

Fabian (2023), en su tesis titulada “Análisis de Efectos de Disipadores Histeréticos BRB en Respuestas Sísmicas en Edificación en jr. Paruro N°.1037 Lima”, evaluó el efecto de la incorporación de disipadores histeréticos BRB en las edificaciones que eran conformada por ocho galerías, tomando como muestra una de ellas. La metodología en su trabajo de investigación fue aplicada con un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental. Los resultados mostraron que el empleo de los disipadores histeréticos BRB redujo la irregularidad torsional. Finalmente, el autor concluye que las respuestas sísmicas estuvieron dentro de lo establecido en la normativa peruana de diseño sismorresistente.

2.1.3 Antecedentes Locales

Orocollo (2024), en su investigación titulada “Análisis comparativo del comportamiento sísmico de disipadores histeréticos SLB, TADAS y disipadores sísmicos de fluido viscoso aplicados en la infraestructura de la Universidad Tecnológica del Perú de Tacna-2024”, tuvo como objetivo analizar el comportamiento sísmico de disipadores histeréticos en la UTP situada en Tacna. Este trabajo aplicó la metodología de modelado en el software ETABS para analizar las derivas y fuerzas cortantes, mediante un análisis no lineal tiempo historia y un análisis modal espectral. Los resultados mostraron que los disipadores disminuyeron los periodos de vibración en un 26.90% y un 30.01%. El investigador concluyó que los disipadores SLB y TADAS son más accesibles debido a su bajo costo, siendo una opción más viable en proyectos que cuenten con bajo presupuesto.

Corazi y Fuentes (2023), en su tesis titulada “Análisis Comparativo de Sistemas de Protección Sísmica entre Aisladores Sísmicos y Disipadores SLB en el Hospital Hipólito Unanue de Tacna”, tuvieron como objetivo investigar la efectividad de los sistemas de protección sísmica aplicados al hospital, mediante un análisis no lineal y acelerogramas escogidos. Evaluaron indicadores como rotulas plásticas, derivas de entrepiso y costos de instalación. Los resultados indicaron que, aunque ambos sistemas cumplen con los estándares de desempeño sísmico, los disipadores SBL son la opción más razonable para garantizar protección al Hospital Hipolito Unanue ante un sismo.

2.2. Bases Teóricas

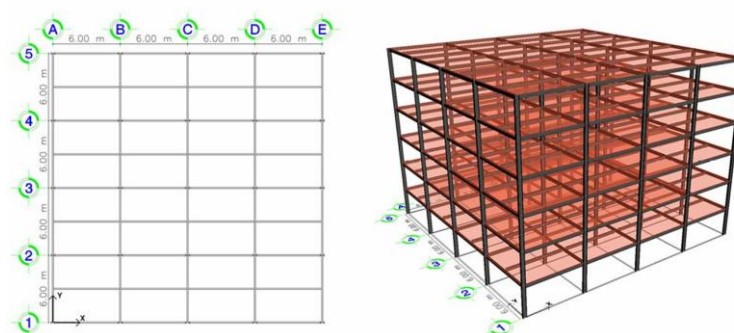
2.2.1 Edificación de Seis Niveles

2.2.1.1 Definición de Edificación.

Es una obra construida por la actividad humana que emplea partes estructurales y arquitectónicas, con el propósito de satisfacer las necesidades del ser humano, su diseño consiste en principios de arquitectura e ingeniería. (Paz, 2004). A continuación, en la Figura 1, se puede observar un ejemplo.

Figura 1

Edificación Típica de Vivienda Multifamiliar



Nota. La figura muestra la planta y modelo tridimensional de un sistema estructural aporricado. Tomado *Manual de diseño de estructuras equipadas con disipadores sísmicos* (p.43), por DAMPO Systems, 2024.

2.2.1.2 Edificaciones Sismorresistentes.

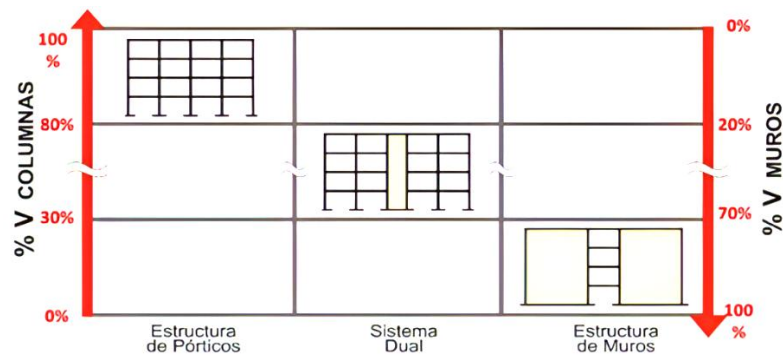
Las edificaciones sismorresistentes son aquellas que esta diseñadas para resguardar las vidas de los ocupantes brindándole seguridad ante un sismo (Paz, 2004).

Por otro lado, López (2008) define que la elección del sistema estructural de la edificación es importante para determinar el comportamiento global de la estructura, ya que podría reducir costos y mejorar las solicitantes bajo cargas estáticas y dinámicas.

2.2.1.3 Sistema Estructural.

Se refiere al conjunto de elementos estructurales que transmiten las cargas hacia la cimentación. La clasificación de los sistemas estructurales se muestra en la Figura 2.

- a) Sistema de muros estructurales: La norma Técnica E0.30 (2018) establece que para una edificación sea considerada de muros estructurales, la fuerza cortante en la base en los muros estructurales debe ser mayor al 70%.
- b) Sistema de pórticos: La norma Técnica E0.30 (2018) establece que para una edificación sea considerada de pórticos, la fuerza cortante en la base de las columnas debe ser mayor al 80%.
- c) Sistema Dual: La norma Técnica E0.30 (2018) establece que para una edificación sea considerada Dual, la fuerza cortante en la base de los muros debe ser mayor 30% y menor al 80%.

Figura 2*Clasificación de los Sistemas estructurales en Concreto*

Nota. Para esta investigación se utilizará un sistema estructural de pórticos, el cual se clasifica cuando la fuerza cortante de la edificación de las columnas se lleva el 80% a más. Adaptado de *Comentarios a la Norma Peruana E030 Diseño Sismorresistente* (p.22), por A. Muñoz, 2020.

2.2.1.4 Aceleración espectral

Según la Norma Técnica E.030 (2018), la aceleración espectral inelástica en las direcciones horizontales se determina mediante una expresión que incorpora factores sísmicos zonales, de uso, amplificación del suelo y reducción por comportamiento inelástico de la estructura, relacionando estos mediante la siguiente ecuación.

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

Donde:

- S_a es la aceleración espectral
- Z es el factor de zona
- U es el factor de uso
- C es el factor de amplificación sísmica
- S es el factor de suelo
- R es el coeficiente de reducción de fuerza sísmica

- g representa la aceleración de la gravedad

2.2.1.5 Modos de Vibración.

Son las formas de vibrar de la estructura cuando es sometida a cargas dinámicas, para cada modo de vibración le corresponde una frecuencia natural con un periodo único de vibración, el primero modo es el que cuenta con el periodo fundamental, la cual describe como se desplazara la estructura.

Según la Norma Técnica Peruana E.030 (2018), el análisis modal debe incluir una cantidad suficiente de modos de vibración que permitan acumular al menos el 90 % de la masa efectiva total de la estructura en cada una de las direcciones principales, considerando como mínimo los tres primeros modos predominantes.

2.2.1.6 Derivas.

También conocido como drifts o distorsiones son la relación entre los desplazamientos relativos con la altura de entresijos, las derivas son producto de cargas laterales, comúnmente en un evento sísmico, su unidad de medida es adimensional y está restringido por la Norma E.030, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Límites de Derivas de Entresijo

Material Predominante	(Δ_i/h_i)
Concreto Armado	0.007
Acero	0.010
Albañilería	0.005
Madera	0.010
Edificios de Concreto Armado con Muros de Ductilidad	0.005
Limitada	

Nota. En la siguiente tabla se muestra las derivas que son admisibles por la normativa peruana de acuerdo al material predominante. Tomado de (Norma E.030, 2018)

2.2.2 Análisis Sísmico Dinámico No Lineal

2.2.2.1 Análisis Dinámico No Lineal.

El análisis dinámico no lineal es una metodología avanzada para analizar el comportamiento de estructuras durante sucesos sísmicos. Este enfoque considera la respuesta no lineal de las estructuras, proporcionando estimaciones más precisas que los métodos lineales (Aracena y Germoso, 2019).

2.2.2.2 Análisis Dinámico Tiempo – Historia

El análisis dinámico tiempo-historia inelástico, según la Norma Técnica E.030 del RNE, es un método avanzado que permite simular con precisión la respuesta estructural ante sismos severos, mediante la integración directa de registros sísmicos representativos. Este procedimiento requiere modelar la distribución de masas, rigidez y el comportamiento no lineal de los elementos estructurales, considerando su capacidad resistente y comportamiento histerético. Puede utilizarse como complemento a los métodos estáticos o espectrales, y su correcta aplicación debe seguir lineamientos técnicos como los propuestos en la ASCE 41, FEMA 440 y FEMA P58.

Por otro lado, la norma ASCE/SEI 41-17 considera el análisis dinámico tiempo-historia como uno de los métodos más precisos para evaluar el desempeño sísmico estructural, ya que permite representar de forma detallada la respuesta inelástica de los materiales. Este tipo de análisis requiere un modelo estructural que incluya propiedades no lineales, comportamiento histerético y el uso de registros sísmicos representativos ajustados al espectro de diseño.

Asimismo, la norma permite realizar el análisis de historial de respuesta no lineal como parte del diseño de cualquier estructura, y lo exige de manera específica para aquellas que incorporen aislamiento sísmico o sistemas de disipación de energía (ASCE, 2017).

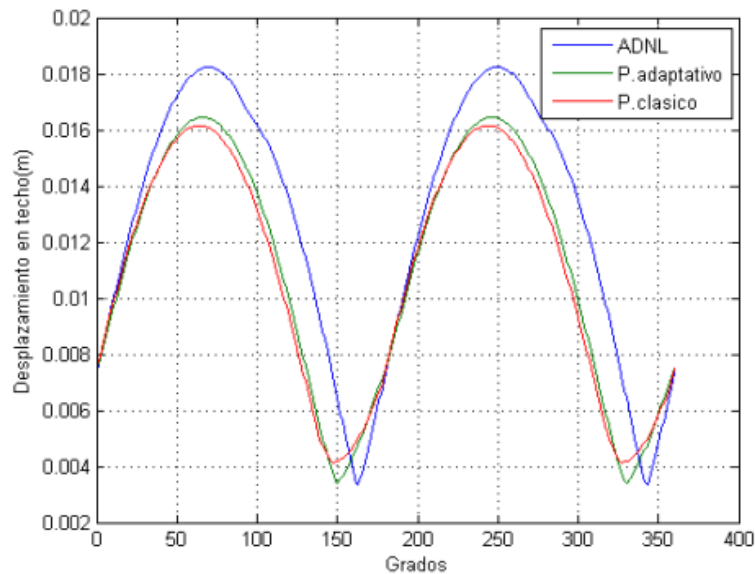
2.2.2.3 Comparación con otros métodos

Comparado con otras metodologías, como el Pushover tradicional y los procedimientos modales, el análisis dinámico no lineal ofrece ventajas en la predicción del comportamiento sísmico de estructuras de concreto armado (Mora et al., 2006).

Según un estudio realizado por Peralta (2012) en donde se comparan los análisis estáticos y dinámicos no lineales, se puede evidenciar una notable variación que existe entre los desplazamientos en el techo de la estructura, donde los resultados demostraron que el análisis dinámico no lineal representa una mayor precisión del comportamiento estructural de edificaciones irregulares, esto se puede apreciar en la Figura 3.

Figura 3

Comparación de Ambos Métodos



Nota. Las curvas roja y verde representan un análisis estático no lineal, mientras que la línea azul representa el análisis Dinámico no Lineal. Tomado de *Análisis Estático No Lineal y Análisis Dinámico No Lineal del Hospital de Vielha* (p.69), por M. Peralta 2020.

Se puede apreciar que los métodos estáticos difieren en gran magnitud con respecto al análisis dinámico no lineal.

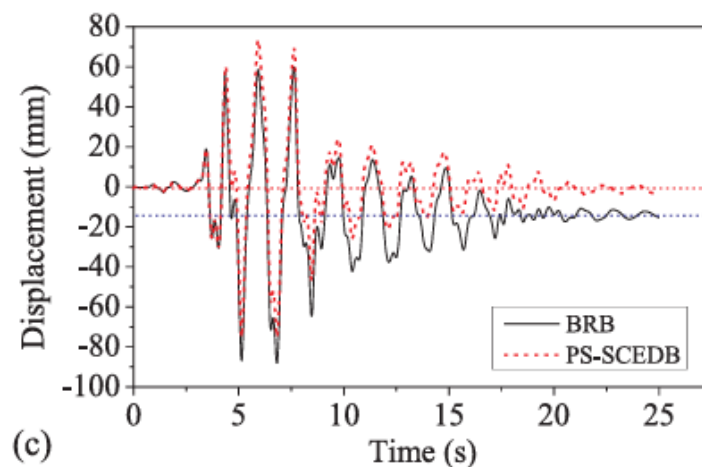
2.2.2.4 Comportamiento elástico vs. Inelástico

Estudios como Harikrishnan y Gupta (2020) muestran que las estructuras sometidas a comportamiento inelástico acumulan desplazamientos residuales permanentes, los cuales están relacionados con el desplazamiento espectral inelástico y no con el desplazamiento elástico.

Por su parte, Christopoulos et al. (2003) documentan cómo los desplazamientos residuales normalizados respecto al desplazamiento inelástico máximo, varían según el periodo del sistema y reflejan daños permanentes en la estructura, proponiendo su inclusión en evaluaciones de desempeño luego de eventos sísmicos. Asimismo, Ruiz-Garcia y Miranda (2006) encuentran que la estimación del desplazamiento residual en marcos regulares presenta una mayor variabilidad que la deriva inelástica máxima. Estas deformaciones permanentes pueden apreciarse en la Figura 4.

Figura 4

Desplazamientos Residuales



Nota. En esta figura, se observa que el desplazamiento lateral no retorna al origen tras el evento sísmico. Es decir, el piso queda con un cierto desplazamiento permanente, lo cual es una medida de daño acumulado. Tomado de “Seismic performance and damage analysis of RC frame–core tube building with self-centering braces” (p. 154), por S. Xiao et al., 2019, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120.

2.2.2.5 Representación del Comportamiento Inelástico

2.2.2.5.1. Rótulas Plásticas

Según Zehro y Jkhsi (2020), una rótula plástica en ingeniería estructural se refiere a una zona de una viga donde ocurre flexión plástica, permitiendo rotación sin resistencia adicional al momento flector, lo que simula el comportamiento de una articulación mecánica y resulta clave al analizar el colapso estructural.

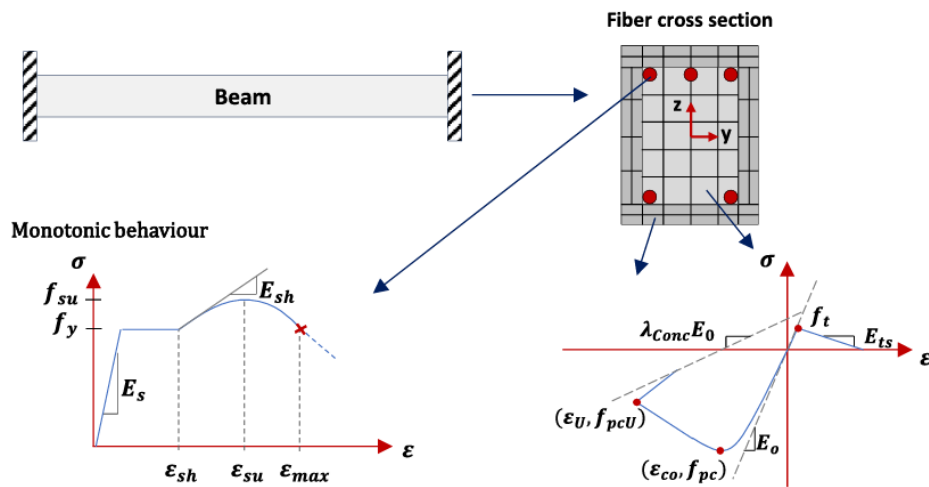
Por otro lado, Huras et al. (2019) indica que las rótulas plásticas se forman en los extremos de vigas y columnas durante excitaciones sísmicas, concentrando el comportamiento no lineal en dichas zonas, y su desempeño depende de múltiples factores como el refuerzo, confinamiento del concreto y geometría.

2.2.2.5.2. Fibras Distribuidas

Según Terrenzi et al. (2020), el modelo de sección por fibras consiste en discretizar la sección transversal de los elementos estructurales, como vigas o columnas, en un conjunto de fibras uniaxiales, cada una con su respectiva ley constitutiva. Esta formulación permite integrar las respuestas esfuerzo-deformación de las fibras a lo largo de la sección, lo que facilita capturar con mayor precisión el comportamiento no lineal del material. Como resultado, este enfoque ofrece una representación más realista de la respuesta estructural ante cargas sísmicas, especialmente en presencia de elevados niveles de carga axial, superando en precisión a los modelos que utilizan formulaciones fenomenológicas simplificadas. Estas secciones de fibras distribuidas pueden apreciarse en la Figura 5.

Figura 5

Modelo de Sección por Fibras

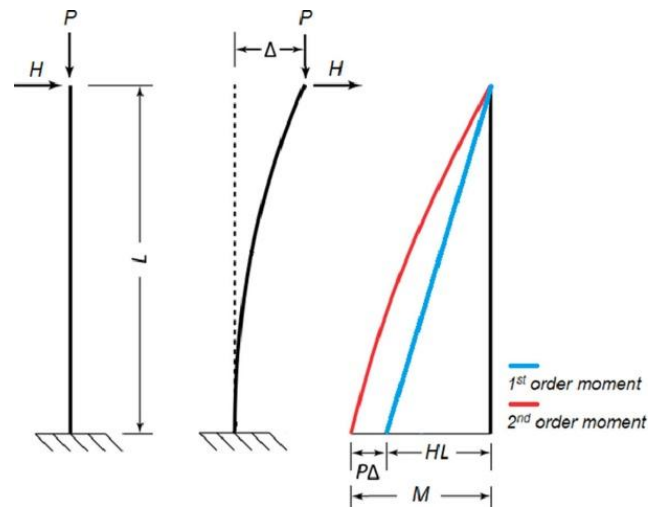


Nota. La figura muestra la discretización de la sección transversal de una viga y su distribución de materiales. Tomado de “Seismic optimization of buckling-restrained brace mid-rise frames by metaheuristics and machine learning surrogate models” (p.08), por L. Velasco et al., 2025, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 68(62).

2.2.2.6 No Linealidad Geométrica

Según Celigüeta (2009), la no linealidad geométrica surge cuando las deformaciones inducidas por las cargas son tan grandes que ya no puede asumirse que la posición deformada del sólido coincide con la inicial. En estos casos, las ecuaciones de equilibrio no pueden formularse sobre la geometría original, como se hace en el análisis lineal, sino que deben plantearse sobre la configuración final deformada.

Una manifestación particular de esta no linealidad geométrica es el efecto P- Δ , según lo describe Wilson (2004). Este fenómeno ocurre cuando una carga axial vertical (P) actúa sobre un desplazamiento lateral (Δ), generando un momento adicional $P * \Delta P$ que afecta el equilibrio de la estructura. Dicho efecto se aprecia en la Figura 6 y es especialmente relevante en estructuras altas o esbeltas, donde las cargas axiales son considerables.

Figura 6Representación del Efecto P- Δ 

Nota. Se ilustra el mecanismo del efecto P- Δ en una estructura idealizada de tipo voladizo. Al producirse desplazamientos laterales, los pesos gravitacionales generan momentos adicionales que contribuyen a la inestabilidad global de la estructura. Tomado de “Evaluation of the P- Δ (P-Delta) effect in columns and frames using the two-cycle method based on the solution of the beam-column differential equation” (p.3), por R. Bird y L. Encarnação, 2023, *MethodsX*, 11.

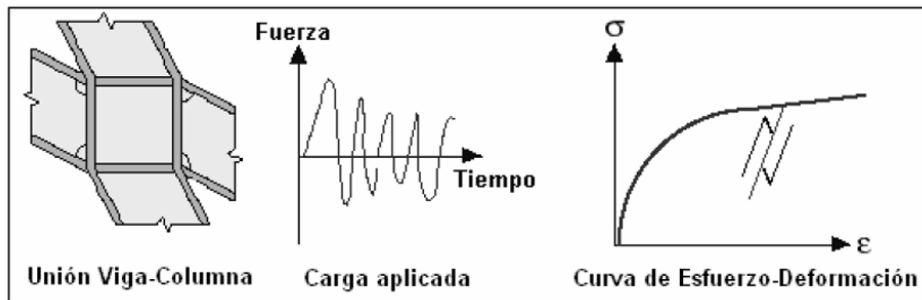
Cabe resaltar que, en esta investigación, se omitió la no linealidad geométrica con el fin de simplificar el modelo estructural, dado que el enfoque principal se centra en el comportamiento inelástico del material y no en las grandes deformaciones geométricas.

2.2.2.7 No Linealidad de Material

Jaramillo y Riveros (2011) indican que una importante causa de no linealidad en el análisis estructural es la relación no proporcional entre esfuerzo y deformación, que se presenta cuando el material deja de seguir la Ley de Hooke. Esta condición puede deberse a diversos factores, como la historia de cargas, la duración de la carga, o variaciones de temperatura. Asimismo, mencionan que ciertos materiales presentan comportamiento lineal solo bajo deformaciones pequeñas, mientras que otros exhiben respuestas no lineales desde etapas tempranas de carga. Un caso representativo es la plastificación de las uniones viga-columna durante un evento sísmico, el cual se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Comportamiento de Unión Viga-Columna ante cargas dinámicas



Nota. La imagen ilustra el efecto de las cargas dinámicas, como las originadas por sismos, sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de una estructura. Tomado de “*Análisis no lineal dinámico tridimensional de edificios en concreto reforzado sometidos a los registros del sismo de Quetame*” (p. 48), por R. Jaramillo y C. Riveros, 2011.

Por su parte, Wilson (2004) indica que las propiedades de los materiales estructurales deben determinarse mediante ensayos experimentales. Aunque muchas veces se observa que los materiales no son completamente isotrópicos ni homogéneos, en la práctica se suele asumir un comportamiento idealizado, como la isotropía, para facilitar el análisis. No obstante, esta simplificación puede llevar a ignorar ciertos efectos no lineales importantes, especialmente en situaciones donde las propiedades reales del material influyen significativamente en la respuesta estructural ante cargas extremas o ciclos repetidos.

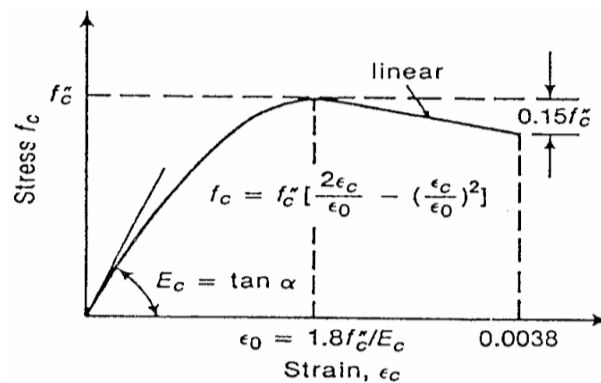
2.2.2.8 Modelos constitutivos de materiales

2.2.2.8.1. Modelo no lineal del concreto (modelo de Hognestad)

Según Ottazzi (2003), uno de los modelos más utilizados para representar el comportamiento del concreto no confinado en compresión es el propuesto por Hognestad en 1951. Este modelo define la relación esfuerzo-deformación mediante una curva parabólica hasta la resistencia máxima, seguida de un descenso controlado, adoptando valores típicos de deformación axial de $\varepsilon_0 = 0.002$ y ε_{cu} entre 0.003 y 0.004. El comportamiento del modelo se puede apreciar en la Figura 8.

Figura 8

Curva Esfuerzo - Deformación del Modelo de Hognestad



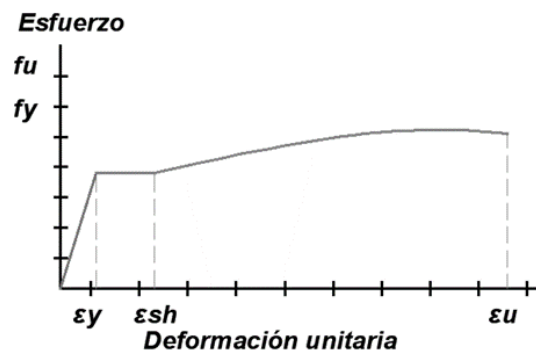
Nota. La figura muestra el comportamiento del concreto según el modelo de Hognestad, que incluye una fase parabólica ascendente hasta la resistencia máxima y un descenso suave que simula el ablandamiento del material. Adaptado de *A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members* (p.45), por E. Hognestad, 1951, University of Illinois.

2.2.2.8.2. Modelo bilineal del acero (Curva Bilineal)

Según Jaramillo y Riveros (2011), el comportamiento del acero puede representarse mediante una curva bilineal que incorpora un tramo de endurecimiento por deformación con forma parabólica, lo cual permite simular de manera más realista su respuesta frente a cargas crecientes, dicho comportamiento se puede apreciar en la Figura 9.

Figura 9

Curva Esfuerzo - Deformación del Modelo Bilineal del Acero



Nota. En la figura muestra el comportamiento del acero estructural a través de un tramo elástico, un punto de fluencia y una zona de endurecimiento por deformación con forma parabólica. Adaptado de *“Análisis no lineal dinámico tridimensional de edificios en concreto reforzado sometidos a los registros del sismo de Quetame”* (p. 52), por R. Jaramillo y C. Riveros, 2011.

Donde:

- f_y es el esfuerzo de fluencia
- ϵ_y es la deformación unitaria de fluencia
- ϵ_{sh} es la deformación unitaria de la fase de endurecimiento
- f_u es el esfuerzo último o de rotura
- ϵ_u es la deformación última del material

El comportamiento del modelo se representa por la siguiente ecuación:

$$f_s = f_u - (f_u - f_y) \frac{\epsilon_u - \epsilon}{\epsilon_u - \epsilon_{sh}}$$

2.2.2.9 Marco Normativo del Diseño Sismorresistente.

La Norma E.030 Diseño Sismorresistente define los criterios técnicos y metodológicos esenciales para el diseño estructural de construcciones que puedan resistir los impactos de terremotos, previniendo la pérdida de vidas humanas y asegurando la continuidad de los servicios fundamentales requeridos para la sociedad. Su implementación es obligatoria a lo largo de todo el país. (Muñoz, 2020).

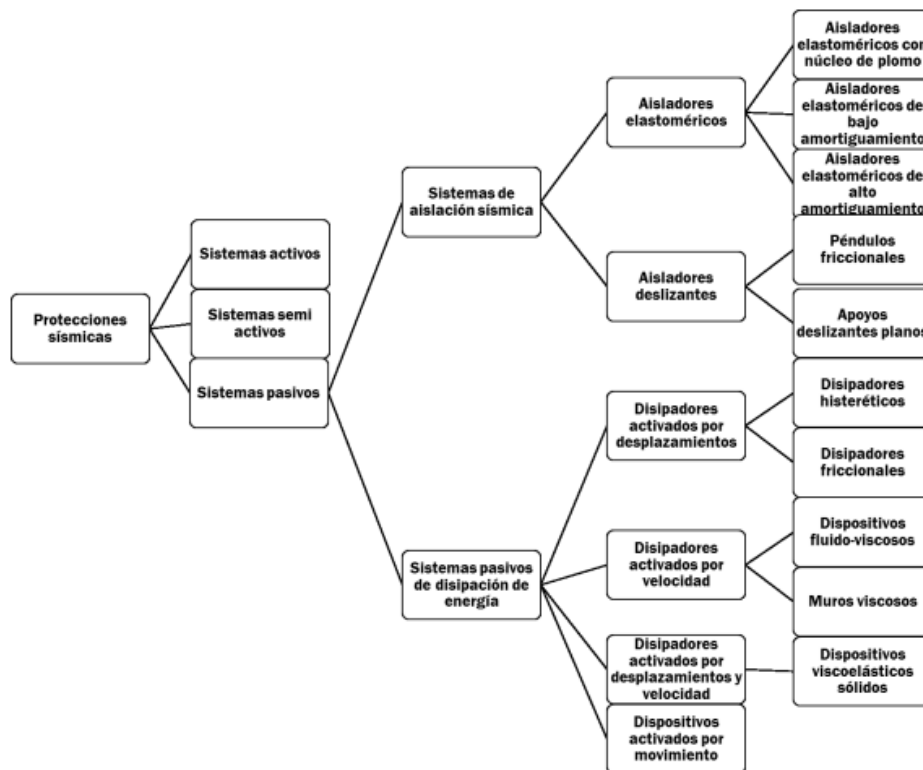
Si bien es cierto, la Norma peruana E.030 se actualiza constantemente en función de las experiencias sísmica más importantes a través de los años, es indispensable definir los parámetros sísmicos más influyentes en el diseño sismorresistente (De la cruz y Yoctun, 2022). Entre estos parámetros se incluyen: el factor de zona (Z), factor de uso (U), factor de suelo (S), coeficiente sísmico (S) y el coeficiente de reducción (R).

2.2.2.10 Disipadores Histeréticos.

Los disipadores, son parte del Sistema Pasivo de Disipación de Energía, puesto que su objetivo principal es disipar la energía adquirida de la estructura por distintos fenómenos presentes en la naturaleza. Estos dispositivos tal como se muestran en la Figura N° 10, se clasifican según su forma de activación, que puede depender de la velocidad, el desplazamiento u la combinación resultante de ambos. Encontrando a los disipadores histeréticos dentro de la clasificación de los disipadores activados por desplazamientos relativos en sus extremos, es por ello que son comúnmente fabricados con metales, materiales que resultan ideales para esta aplicación debido a su capacidad de fluencia (Bustos, 2019).

Figura 10

Clasificación de los Principales Tipos de Protección Sísmica

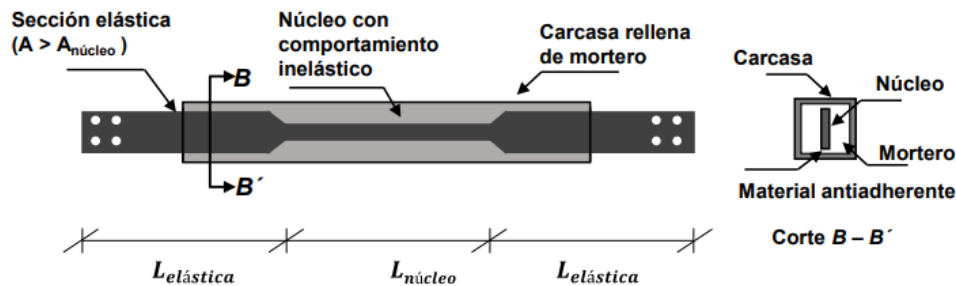


Nota. La figura muestra la clasificación de los tipos de protección sísmica, destacando los disipadores histeréticos para los fines de esta investigación. Tomado de *Diseño de Disipadores Histeréticos de Energía Sísmica para un Pórtico de 5 Plantas* (p.12), por F. Bustos, 2019.

Dentro de la clasificación existe una variedad de disipadores histeréticos existentes, para fines de esta investigación se utilizarán los disipadores de barras de pandeo restringido, también denominados como CRP (del inglés buckling-restrained braces), su sección se presenta en la Figura N° 11. Este es un dispositivo diagonal, generalmente tubular, hecho de acero, que está expuesto tanto a cargas axiales de tracción como a las de compresión. Su núcleo puede ser de acero, plomo o resinas, y si se deforma transversalmente debido a las variaciones de sección que experimenta el tubo, disipará la energía (Bustos, 2019).

Figura 11

Esquema Típico de un Disipador Histerético de Tipo CRP



Nota. El gráfico representa un esquema típico de disipador CRP. Tomado de *Diseño Óptimo del Refuerzo Estructural, mediante Disipadores CRP, para la Adecuación del Desempeño Sísmico de Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado* (p.6), por L. Velasco, 2021.

En la actualidad existe una amplia variedad de trabajos de investigación publicados sobre el comportamiento estructural de estructuras que utilizan disipadores histeréticos.

De los cuales, en términos generales, concluyeron que este es un sistema de protección eficaz y económico que permite regular las distorsiones de entrepiso que surgen durante un terremoto (Velasco, 2021).

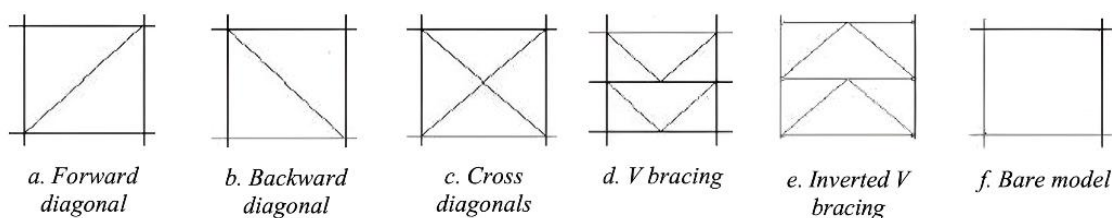
2.2.2.11 Configuración de los Disipadores CRP

En el estudio realizado por Deulkar et al. (2010), se evaluó el comportamiento sísmico de un edificio de acero de cinco niveles mediante la incorporación de disipadores tipo BRB (Buckling Restrained Braces) en distintas configuraciones estructurales, como arriostres en V, en X, invertidos, y otros. Cada configuración fue analizada mediante un modelo no lineal bajo el sismo de El Centro, permitiendo observar diferencias significativas en el desempeño estructural.

Los resultados mostraron variaciones notables en parámetros como el desplazamiento de entrepiso, deriva y fuerzas internas, lo que evidencia que la disposición de los disipadores influye directamente en la eficiencia del sistema frente a cargas sísmicas. En la Figura 12 se ilustran las diferentes configuraciones estructurales evaluadas durante el desarrollo de su estudio.

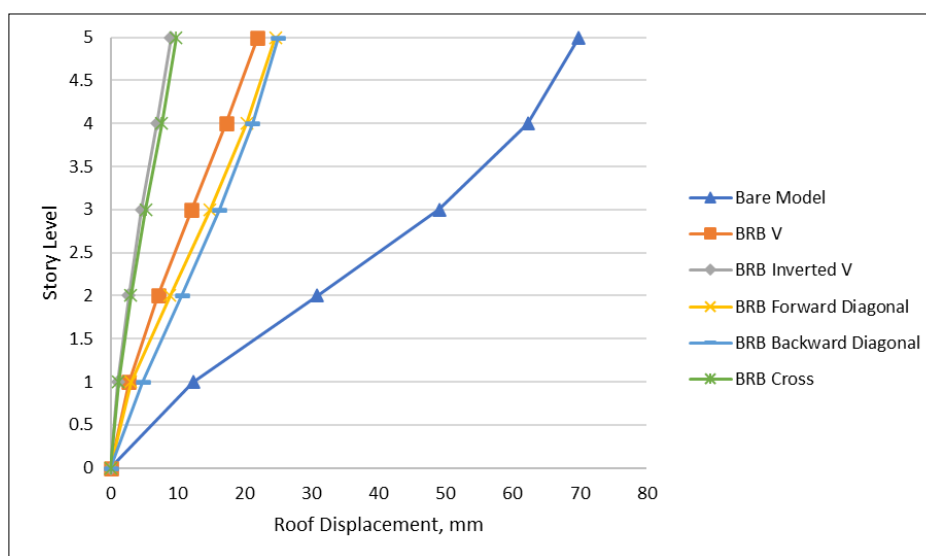
Figura 12

Configuraciones de Disipadores BRB



Nota. Las configuraciones mostradas fueron analizadas para evaluar su influencia en la respuesta sísmica de un edificio de acero de cinco niveles. Cada disposición produjo resultados diferentes en términos de desplazamiento, deriva y fuerzas internas. Tomado de “Buckling restrained braces for vibration control of building structure” (p.368), por W. Deulkar, et al., 2010, *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 4(4).

En la Figura 13 se presentan los desplazamientos de techo obtenidos para cada configuración analizada por Deulkar et al. (2010), permitiendo comparar el efecto de los diferentes esquemas de disipación en la respuesta estructural.

Figura 13**Desplazamientos de Techo**

Nota. La tabla muestra el porcentaje de reducción del desplazamiento relativo entre pisos para cada nivel de una edificación de cinco pisos, considerando distintas configuraciones de arriostramiento con amortiguadores tipo BRB. Adaptado de “Buckling restrained braces for vibration control of building structure” (p.368), por W. Deulkar, et al., 2010, *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 4(4).

Se observa que todas las configuraciones presentan una mejora significativa respecto al modelo sin arriostramientos (Bare Model), siendo las configuraciones "Cross Bracing" y "BRB Inverted V" las que logran las mayores reducciones en los niveles superiores, para los fines de esta investigación se utilizó la configuración BRB Forward Diagonal.

2.2.2.12 Implementación Computacional con OpenSeesPy

OpenSeesPy, es la interfaz de Python para OpenSees, este es un potente software de código abierto para simulaciones de ingeniería sismorresistente utilizando métodos de elementos finitos (Cortés, 2011).

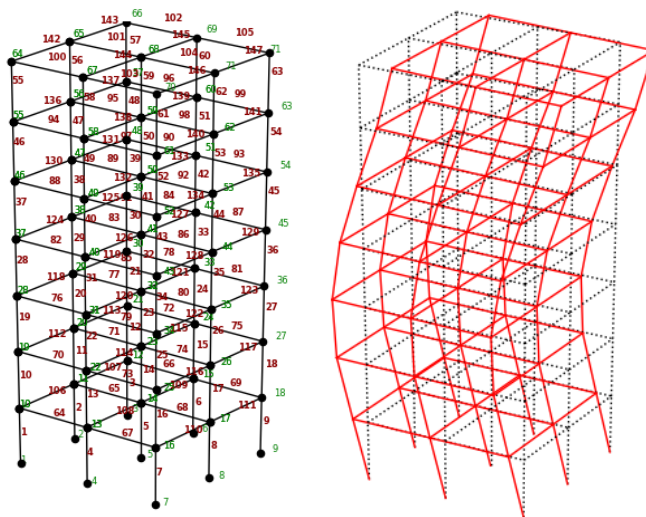
Este software facilita el modelado y análisis de estructuras de gran envergadura, para posteriormente evaluar su comportamiento bajo distintas circunstancias sísmicas. Así mismo, se emplea ampliamente en estudios de estructuras de concreto armado y acero,

consiguiendo una eficiencia elevada en los análisis sísmicos de diversas construcciones (Mendez y Olivares, 2024).

La versatilidad de OpenSees, combinada con la integración continua de los últimos avances en investigación, la convierte en una herramienta fundamental para que los ingenieros especializados desarrollen aplicaciones de elementos finitos en ambientes de procesamiento, secuenciales, de alto rendimiento y distribuidos (McKenna, 2011). Por su parte, OpenStereo es un software libre y de código abierto que ofrece capacidades para la proyección estereográfica y el análisis de datos estructurales, utilizando bibliotecas de Python como Numpy y Matplotlib (Grohmann et al., 2014). Estas funcionalidades complementan las capacidades de OpenSees en el análisis estructural, permitiendo modelar comportamientos elásticos e inelásticos de estructuras sometidas a cargas estáticas y dinámicas (Guerrero y Velasco, 2020), los cuales se muestran en la Figura 14.

Figura 14

Modelo de Pórticos en OpenSeesPy

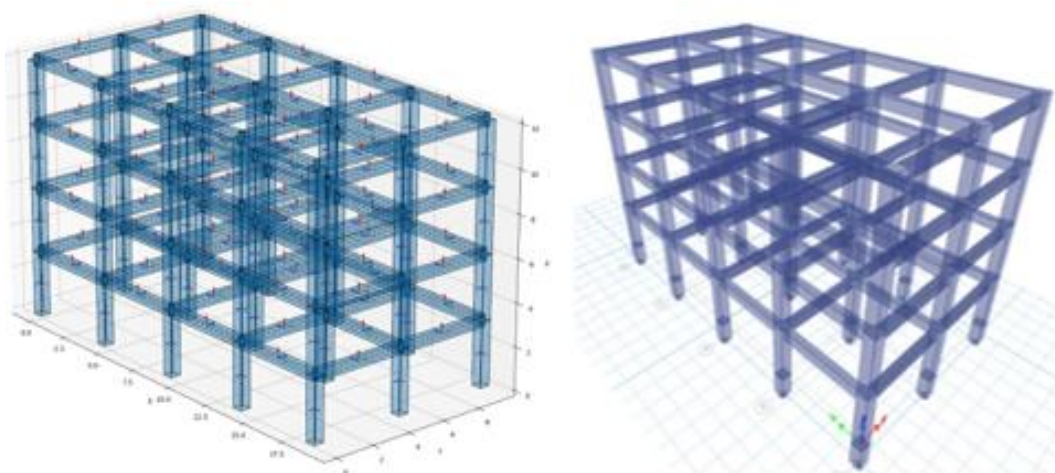


Nota. En la figura se observa un modelo estructural del sistema apórticado renderizado en OpenSeesPy mediante el módulo VFO. Tomado de *Vfo* -Visualization for OpenSees [Imagen], por A. Upadhyay, s.f., vfo.readthedocs.io (<https://vfo.readthedocs.io>). CC BY 2.0.

Estos avances en la integración de OpenSees se alinean con la tendencia más amplia de utilizar Python para la computación científica y la visualización, como lo ejemplifica Matplotlib, un poderoso paquete de gráficos 2D (Hunter, 2007). Estos desarrollos destacan colectivamente el creciente énfasis en la integración de potentes herramientas de análisis con visualización accesible y opciones de interfaz de usuario nada envidiables comparados a otros softwares de diseño como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Comparación de los Modelos Desarrollados con OpenSeesPy y ETABS



Nota. De izquierda a derecha se representan los modelos desarrollados en OpenSeesPy y ETABS respectivamente. Tomado de *Análisis Dinámico de una Estructura de Concreto Armado de 4 Niveles de Sistema Aporticado con la Aplicación del Software OpenSees* (p. 87 y p.109), por L. Mendez y E. Olivares, 2024.

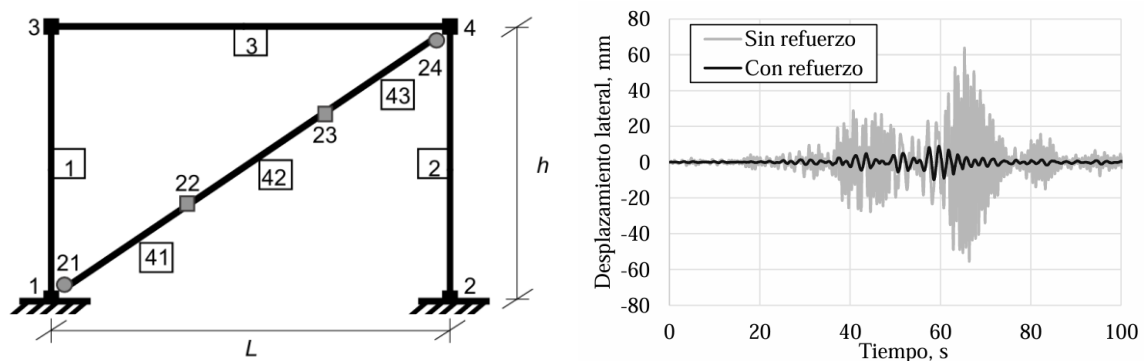
Según un estudio comparativo realizado por Contreras et al. (2021), al modelar una estructura en los programas SAP2000 y OpenSees y someterla a un análisis no lineal tiempo-historia, se obtuvieron periodos fundamentales prácticamente idénticos y respuestas estructurales similares, registrándose diferencias menores al 8.5 % en la mayoría de los elementos. Estos resultados respaldan la fiabilidad del uso de OpenSees como herramienta válida para la simulación precisa del comportamiento sísmico de diferentes estructuras.

2.2.2.13 Respuesta Estructural

Estudios recientes han explorado la efectividad de los sistemas de disipación de energía en estructuras apertadas de concreto armado sometidas a cargas sísmicas. La investigación ha demostrado que los amortiguadores histeréticos pueden mejorar significativamente el rendimiento estructural, reduciendo los desplazamientos, las derivas y las fuerzas internas en comparación con los diseños convencionales que no poseen ningún sistema de disipación de energía, esto gracias a la focalización de los esfuerzos para generar una falla controlada (Cano et al., 2017). La Figura 16 ilustra el comportamiento estructural del disipador tipo BRB dispuesto en configuración diagonal.

Figura 16

Comportamiento del Disipador Tipo CRP en Configuración Diagonal



Nota. La figura muestra de izquierda a derecha, la configuración y la respuesta estructural del disipador con restricción de pandeo (CRP) dispuesto en diagonal bajo acción sísmica, modelado en OpenSees. Tomado de *Introducción al análisis estructural con OpenSees* (p.78 y p.80), por L. Velasco y H. Guerrero, 2020, *Instituto de Ingeniería, UNAM*.

Se puede observar que la incorporación del disipador mejora significativamente el comportamiento estructural del marco, alcanzando una disminución superior al 60 % en la respuesta máxima en relación con el modelo sin reforzamiento.

2.2.2.14 Selección y tratamiento de registros sísmicos

2.2.2.14.1. Fuentes confiables de registros sísmicos

Para realizar análisis dinámicos no lineales que representen con precisión la respuesta estructural ante eventos sísmicos reales, es fundamental contar con registros sísmicos confiables y técnicamente documentados. Entre las bases de datos más reconocidas a nivel internacional se encuentra el PEER Ground Motion Database, desarrollado por el *Pacific Earthquake Engineering Research Center* de la Universidad de California.

Esta plataforma proporciona una colección exhaustiva de acelerogramas tridimensionales obtenidos de distintos eventos sísmicos alrededor del mundo. En total, reúne más de 3,500 registros provenientes de 173 terremotos captados por 1,456 estaciones, y cuenta con información detallada sobre magnitud, tipo de mecanismo de falla, distancia a la fuente, condiciones del suelo, entre otros parámetros críticos para el análisis estructural. Además, ha incorporado registros de eventos significativos como el terremoto de Tohoku (2011), con una magnitud de 9.0 Mw, lo cual amplía su aplicabilidad en estudios de ingeniería sísmica avanzada (Lin et al., 2012).

2.2.2.14.2. Filtrado y procesamiento de registros

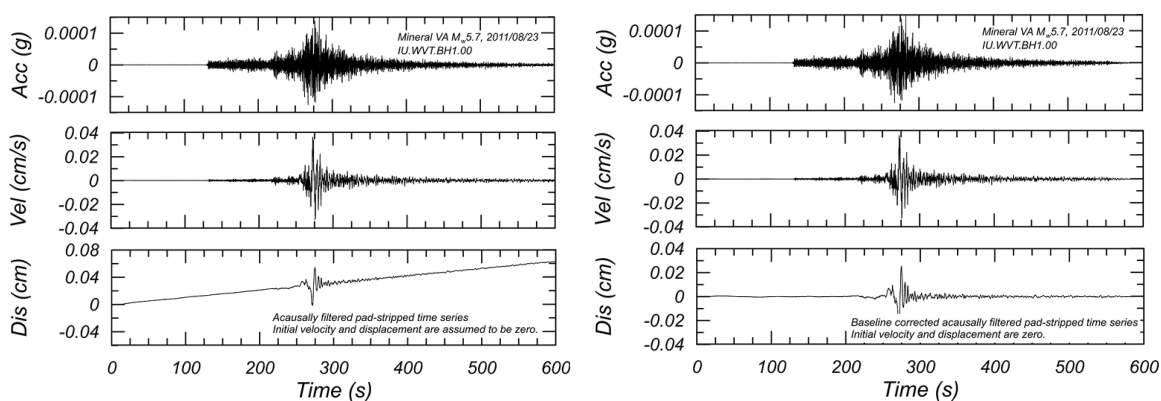
El filtrado de registros sísmicos es un proceso fundamental en el tratamiento de señales de aceleración, cuyo objetivo principal es eliminar el ruido no deseado y conservar únicamente el contenido útil del movimiento. Este procedimiento permite obtener registros más representativos y confiables para el análisis estructural, especialmente en estudios donde se requiere precisión en la evaluación de la respuesta dinámica de estructuras. En el caso de la base de datos NGA-East, desarrollada por el PEER, se utilizan filtros Butterworth, tanto causales como acausales, para suprimir frecuencias fuera del rango de interés. Las frecuencias de corte se determinan considerando la relación señal-ruido (SNR), con el fin de

asegurar que las señales tengan un nivel aceptable de calidad y que su contenido espectral sea válido dentro de un rango frecuencial útil (Goulet et al., 2021).

La corrección por línea base se hace después del filtrado y evita errores al convertir la aceleración en velocidad y desplazamiento. Boore et al. (2012) explican que, si no se corrige, pueden aparecer derivas falsas por culpa del filtrado, lo que afecta los resultados del análisis. En la Figura 17 se muestra un ejemplo de la corrección mencionada en este párrafo.

Figura 17

Ejemplo de Corrección por Línea Base



Nota. La figura muestra las series de aceleración, velocidad y desplazamiento antes y después de la corrección por línea base. En la señal de desplazamiento se observa una oscilación simétrica respecto al eje horizontal, evidenciando una corrección efectiva. Tomado de “PEER NGA-East database” (p.1345 y p.1346), por C. Goulet et al., 2021, *Earthquake Spectra*, 37(S1).

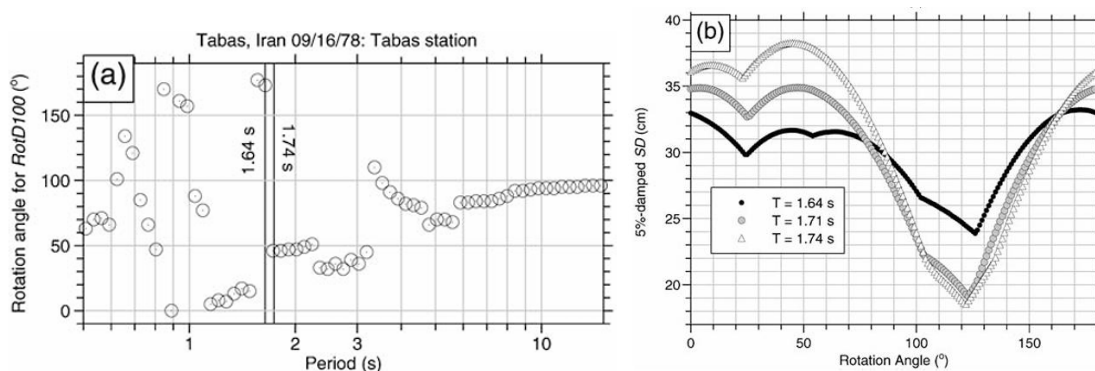
2.2.2.14.3. Espectro de dirección máxima

Huff (2020) señala que el espectro de dirección máxima, también conocido como RotD100, es empleado en la norma ASCE 7-16 para representar la mayor demanda sísmica posible en cualquier dirección horizontal, siendo especialmente útil para análisis no lineales. Este espectro se obtiene a partir de la rotación de las componentes horizontales del movimiento del suelo a través de múltiples ángulos, registrando el valor máximo de aceleración espectral para cada período. Boore (2010) detalla que este procedimiento implica rotar las componentes norte-sur y este-oeste del registro sísmico en incrementos

pequeños (por ejemplo, cada 1°), de modo que se capture la máxima respuesta espectral sin depender de una orientación específica. La Figura 18 presenta un ejemplo de aplicación desarrollado por Boore, con el fin de ilustrar la implementación práctica del modelo propuesto.

Figura 18

Variación del Ángulo de Rotación para el Espectro de Dirección Máxima



Nota. La figura muestra que el ángulo que genera la mayor aceleración cambia según el período del sismo. Esto significa que el valor máximo no siempre está en la misma dirección, sino que hay que rotar el acelerograma en varios ángulos para encontrarlo. Tomado de “Orientation-Independent, Nongeometric-Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion” (p.1831), por D. Boore, 2010, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4).

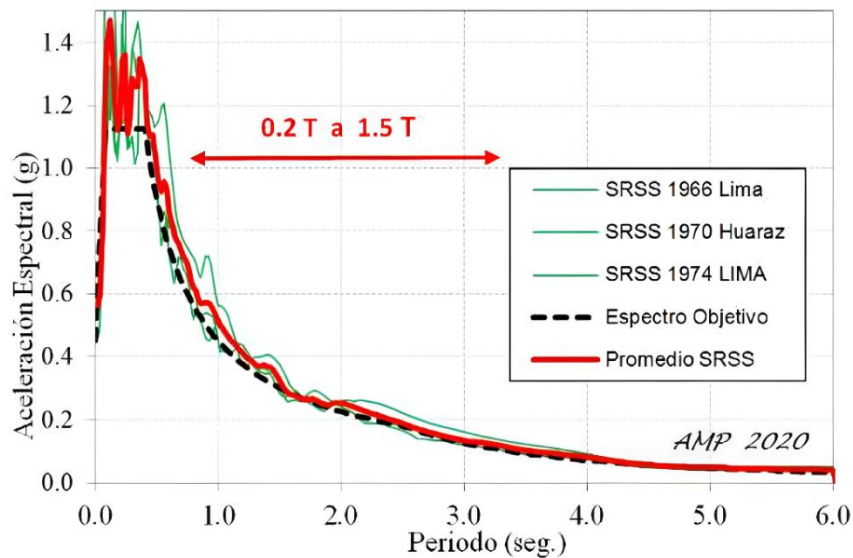
2.2.2.14.4. Escalamiento de registros

En los análisis dinámicos no lineales tipo tiempo-historia, la norma ASCE 7-22 establece que los pares de registros sísmicos deben escalarse de manera que el promedio del espectro de dirección máxima resultante iguale o supere el espectro de diseño objetivo (MCER) dentro del rango de periodos de interés. El escalamiento se realiza aplicando un mismo factor a ambos componentes horizontales de cada par, asegurando que las respuestas sean representativas de la demanda sísmica esperada (ASCE, 2022).

La Figura 19 muestra el proceso de escalamiento aplicado a diferentes señales acelerográficas dentro del rango de periodos definido por la Norma Técnica E.030 (2018).

Figura 19

Espectros Escalados en el Rango de 0.2T y 1.5T



Nota. La figura muestra que el promedio de los espectros sísmicos supera al espectro objetivo entre 0.2 T y 1.5 T, cumpliendo con el criterio de escalamiento. Tomado de *Comentarios a la Norma E.030 Diseño Sismorresistente* (p.45), por A. Muñoz, 2020, SENCICO.

2.3. Definición de Términos Básicos

- a) **Disipadores Histeréticos:** Dispositivos empleados en una estructura para optimizar el rendimiento ante las cargas dinámicas que interactúan sobre ellas ante la presencia de un sismo. Chopra (2020) define los disipadores histeréticos como dispositivos que absorben y disipan la energía acumulada durante un sismo.
- b) **Análisis No Lineal:** Método para la obtención de un modelo más realista del comportamiento estructural ante cargas sísmicas, empleando la no linealidad de los materiales. (Chopra, 2020).
- c) **OpenSeesPy:** Según Tejada (2022), OpenSeesPy es un programa estadounidense, cuyo objetivo principal es poder representar las estructuras mediante un modelo para evaluar respuestas sísmicas, su aplicación es para fines de trabajos de investigación en el tema de sismo-resistencia.

- d) **Respuesta Sísmica:** Comportamiento de la estructura ante la presencia de un sismo considerando la excitación de las ondas, esta involucra aceleraciones, desplazamientos, fuerzas internas y modos de vibración (Chopra, 2020).
- e) **Derivas:** Relación entre la altura de dos niveles sucesivos de una estructura y el desplazamiento relativo de esos niveles durante un sismo. (UpCommons, 2023).
- f) **Modos de Vibración:** Los modos de vibración son esenciales para comprender cómo responde una estructura ante diferentes frecuencias, en especial durante eventos sísmicos, ya que describen los desplazamientos relativos entre sus componentes frente a dichas acciones. Cada modo corresponde a una frecuencia natural específica y presenta un patrón distintivo de movimiento dentro de la estructura. (Riofrío, 2024)
- g) **Espectro de Diseño:** Es una representación gráfica que se utiliza comúnmente en la ingeniería sismorresistente la cual relaciona la respuesta máxima de una estructura asegurando que la estructura logre resistir las cargas dinámicas como la de un sismo según Salas (2021).
- h) **Energía Disipada:** Se refiere a la energía que generalmente se transforma en calor por medio de disipadores. Esto es importante porque ayuda a disminuir las vibraciones de la estructura ante un eventual sismo (Chen y Guo, 2022).

Capítulo III: Metodología de la Investigación

3.1. Metodología y Técnicas Utilizadas

3.1.1 *Tipo y Nivel de Investigación*

La investigación se encuentra enmarcada dentro del tipo aplicada, ya que busca generar conocimiento con aplicación directa a problemas sociales, conectando la teoría con la práctica (Lozada, 2014).

Asimismo, se considera también una investigación del tipo descriptiva, ya que durante el análisis se va a describir el comportamiento dinámico de la estructura bajo diferentes escenarios sísmicos, lo cual implica una observación detallada de cómo varían las respuestas de la estructura con la inclusión de los disipadores.

3.1.2 *Nivel de Investigación*

La investigación se enmarca dentro de un enfoque exploratorio-descriptivo, ya que tiene como objetivo profundizar en el análisis sísmico dinámico no lineal de una edificación de 6 niveles con disipadores histeréticos, utilizando el software OpenSeesPy.

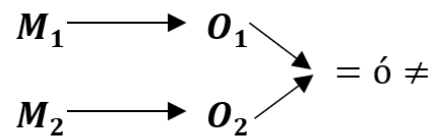
Adicionalmente, la investigación presenta un componente explicativo, ya que, mediante simulaciones dinámicas no lineales, se pretende comprender los efectos de la incorporación de disipadores histeréticos en la respuesta estructural frente a eventos sísmicos, contribuyendo a la explicación de los mecanismos que modifican dicha respuesta.

3.1.3 *Diseño de Investigación*

La investigación adopta un diseño cuasi-experimental, pues su objetivo es probar la existencia de una correlación causal entre sus variables, estos diseños permiten estimar los impactos de un tratamiento o programa, siempre que se establezca una base de comparación adecuada (Bono, 2012).

Este enfoque permite evaluar el efecto del empleo de disipadores histeréticos en la respuesta estructural. Al definir claramente ambas condiciones, se pueden realizar simulaciones controladas que generen una base de comparación válida para analizar los efectos de este tipo de dispositivos.

La investigación es representada con el modelo que se muestra a continuación:



Donde:

- M1: Objeto de estudio (Análisis Sísmico Dinámico no Lineal sin Disipadores Histeréticos en una edificación de seis niveles)
- M2: Objeto de estudio (Análisis Sísmico Dinámico no Lineal con Disipadores Histeréticos en una edificación de seis niveles)
- O_i : Observaciones

3.2. Población y Muestra

3.2.1 Población

Todas las edificaciones multifamiliares de concreto armado con sistema aporticado de seis niveles ubicadas en la región de Tacna.

3.2.2 Muestra

Una edificación modelo aporticada de seis niveles diseñada con y sin disipadores histeréticos, empleando un modelo numérico en OpenSeesPy.

Capítulo IV: Resultados

4.1. Descripción del Modelo Estructural

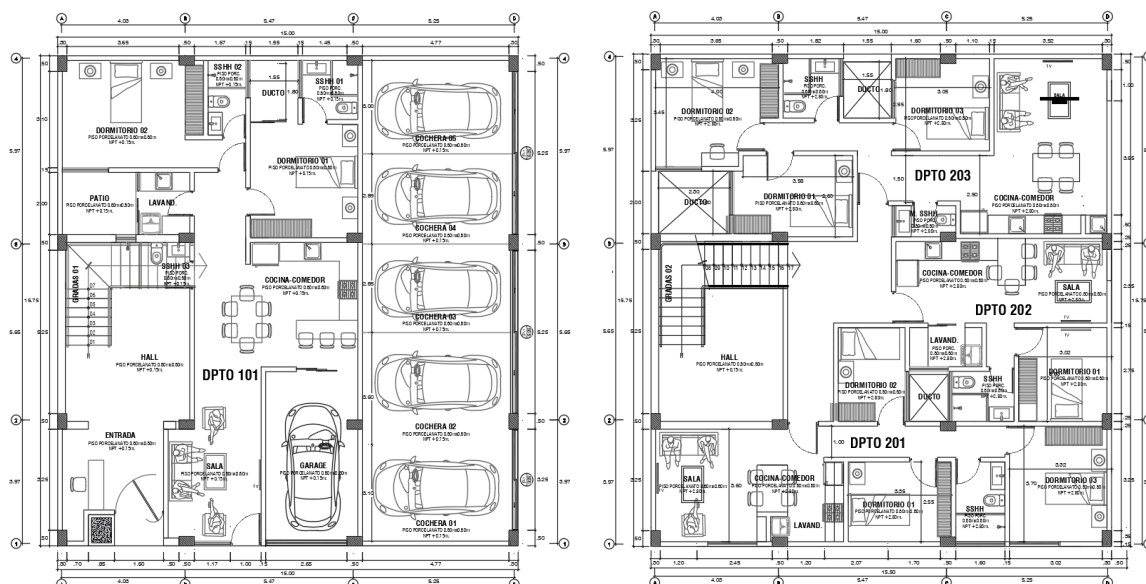
4.1.1 Generalidades del proyecto

El presente estudio se realiza sobre un edificio multifamiliar de 6 niveles ya construido, destinado a vivienda, ubicado en la urbanización Santa María I etapa, en Tacna, con frente a la Av. Circunvalación Oeste. El lote, inscrito bajo la partida N.º 11032061, se encuentra en una zona urbana habilitada con acceso a todos los servicios básicos.

En la Figura 20 se observa que el primer nivel alberga el hall de ingreso, cinco cocheras y un departamento, mientras que, desde el segundo al sexto nivel, los departamentos presentan una distribución típica con sala, cocina-comedor, dormitorios, baños y lavandería.

Figura 20

Plano de Distribución



Nota. La figura de la izquierda muestra la distribución arquitectónica del primer nivel, mientras que la figura de la derecha corresponde a la distribución típica de los niveles del segundo al sexto piso, el plano completo se podrá observar en el Anexo B.

Por su parte, la Figura 21 muestra las elevaciones arquitectónicas del edificio.

Figura 21

Plano de Elevación



Nota. La figura de la izquierda muestra la elevación interior de los espacios de la vivienda, mientras que la figura de la derecha corresponde a la elevación de la fachada, el plano completo se presenta en el Anexo B.

La altura entre pisos es de 2.6 metros para cada nivel, lo que responde a un diseño funcional y eficiente para un uso habitacional. La edificación cuenta con un área construida total de 1,417.20 m², distribuidos aproximadamente en 236.20 m² por nivel.

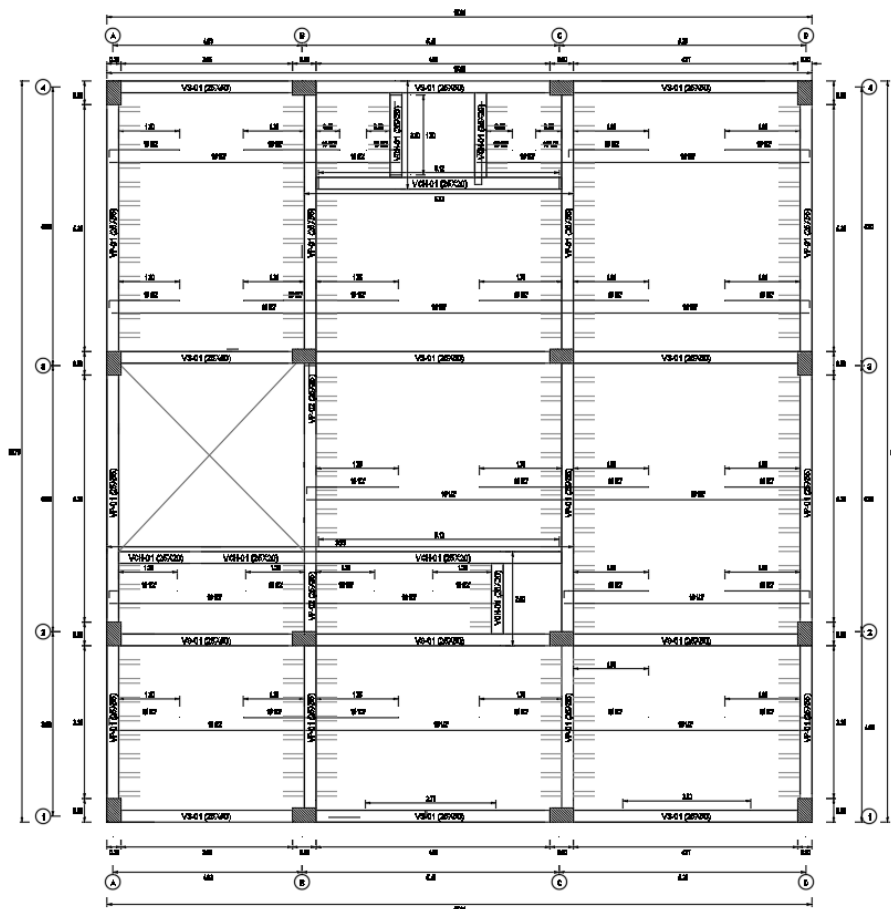
El edificio tiene una configuración estructural de concreto armado utilizando el sistema aporticado, y está compuesto por seis niveles sobre el nivel del suelo. El acceso a los distintos niveles se realiza mediante una escalera interior, asegurando conectividad vertical para todos los departamentos. El sistema constructivo empleado es de tipo convencional, basado en elementos estructurales como columnas, vigas de amarre y losa aligerada, junto con el uso de materiales como ladrillo y concreto reforzado.

4.1.2 Características geométricas y estructurales

El edificio presenta un sistema estructural aporcionado de concreto armado, construido con un sistema convencional que incluye columnas, vigas peraltadas, vigas de amarre y losas aligeradas, elementos que se ilustran en la Figura 22.

Figura 22

Plano de Estructuras



Nota. La figura muestra el sistema estructural de la edificación, compuesto por columnas, vigas y losa aligerada, para visualizar los detalles, estos se muestran en el Anexo B.

A partir del plano estructural, se reconocen las características geométricas de los componentes estructurales más representativos, los cuales se detallan a continuación:

- Altura de losa aligerada : $h = 0.2 \text{ m}$
- Columna eje X : $Cx = 0.30 \times 0.50 \text{ m}$

- Columna eje Y : $Cy = 0.50 \times 0.30 \text{ m}$
- Viga Principal : $VP = 0.25 \times 0.55 \text{ m}$
- Viga Secundaria : $Vs = 0.25 \times 0.50 \text{ m}$
- Viga de Techo : $Vr = 0.25 \times 0.35 \text{ m}$

4.1.3 Propiedades Físicas del Material

Para el desarrollo del modelo estructural lineal, se han considerado las propiedades físicas de los materiales que conforman la edificación, de acuerdo con las especificaciones de diseño y los valores típicos utilizados en la práctica estructural. A continuación, se detallan los valores adoptados para el concreto y el acero de refuerzo, en función de su resistencia, rigidez y peso específico.

Concreto

- Resistencia a la compresión (f^c) : 210 kg/cm²
- Módulo de elasticidad (E_c) : 217370.65 kg/cm²
- Módulo de corte ($G_c = E_c / 2(\mu_c + 1)$) : 94508.98 kg/cm²
- Módulo de poisson (μ_c) : 0.15
- Peso unitario : 2400 kg/m³

Acero

- Esfuerzo de fluencia (f_y) : 4200 kg/cm²
- Módulo de elasticidad (E_s) : 2 000 000 kg/cm²

Estos valores permiten estimar el comportamiento elástico de la estructura bajo cargas moderadas, donde la relación entre esfuerzos y deformaciones sigue la ley de Hooke.

4.1.4 Cargas gravitacionales

Conforme a lo estipulado en la Norma Técnica Peruana de Edificaciones E.020 – Cargas, se han considerado las distintas cargas que actúan sobre la edificación, las cuales son fundamentales para garantizar un diseño estructural seguro y eficiente.

Carga Muerta

- P. ladrillo de techo : 0.07 tonf/m²
- Acabados : 0.12 tonf/m²
- Peso Tabiquería : 0.15 tonf/m²

Carga Viva

- Sobrecarga en vivienda : 0.20 tonf/m²
- Sobrecarga en azotea : 0.10 tonf/m²
- Sobrecarga en escaleras : 0.20 tonf/m²

4.1.5 Peso Sísmico

La edificación a analizar pertenece a la categoría C, por lo cual el peso estimado de la edificación se calculará mediante $P_T = 100\%P_{CM} + 25\%P_{CV}$, esto es de acuerdo a la norma técnica peruana E030.

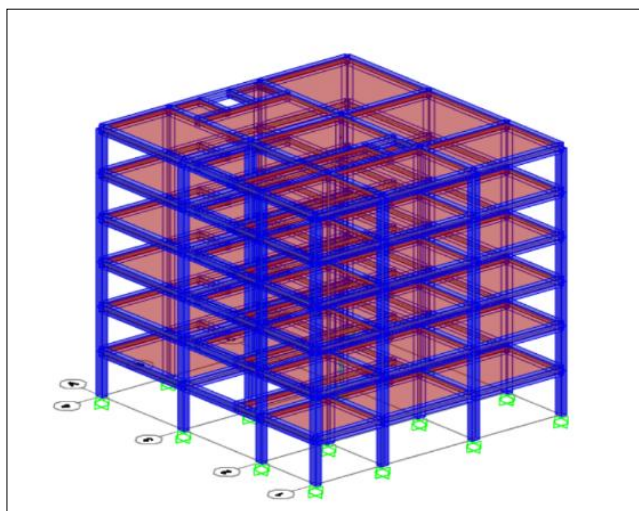
4.2. Análisis Modal

En esta fase inicial, se busca analizar el estado actual de la edificación que se muestra en la Figura 23, mediante un análisis lineal dinámico modal espectral. Este procedimiento es importante para comprender cómo reacciona la estructura frente a los distintos modos de vibración provocados por un sismo, permitiendo así detectar posibles debilidades y

oportunidades de mejora. Para ello, se empleará el software SAP2000, con el cual se modelará la estructura y se evaluará su desempeño ante eventos sísmicos, con el fin de sustentar la implementación de disipadores.

Figura 23

Modelo Estructural de la Edificación en SAP2000



Nota. El gráfico muestra el modelo estructural a la cual se le asignaron las cargas muertas y cargas vivas. En el caso de las escaleras, estas no se modelaron directamente, sino en su lugar se asignó un peso equivalente en la losa donde se apoya, con el objetivo de evitar efectos de torsión.

Para realizar el análisis modal, se consideró 3 modos de vibración por nivel de tal forma teniendo 18 modos de vibración para la estructura tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Modos de Vibración

Modo	Periodo (s)	Modo	Periodo (s)	Modo	Periodo (s)
1	0.608	7	0.111	13	0.060
2	0.594	8	0.110	14	0.058
3	0.501	9	0.092	15	0.051
4	0.196	10	0.076	16	0.049
5	0.192	11	0.076	17	0.048
6	0.161	12	0.063	18	0.041

Nota. Los modos de vibración son obtenidos asegurando que en cada dirección principal (X y Y), la masa modal acumulada que contribuye significativamente a la respuesta estructural represente como mínimo el 90% de la masa total en dicha dirección.

4.2.1 Análisis Modal Espectral

Para el análisis dinámico modal espectral se ingresó el espectro de la norma peruana al programa SAP2000 como se muestra en la Figura 24, asignándole los parámetros sísmicos que se observan en la Tabla 4.

Tabla 4

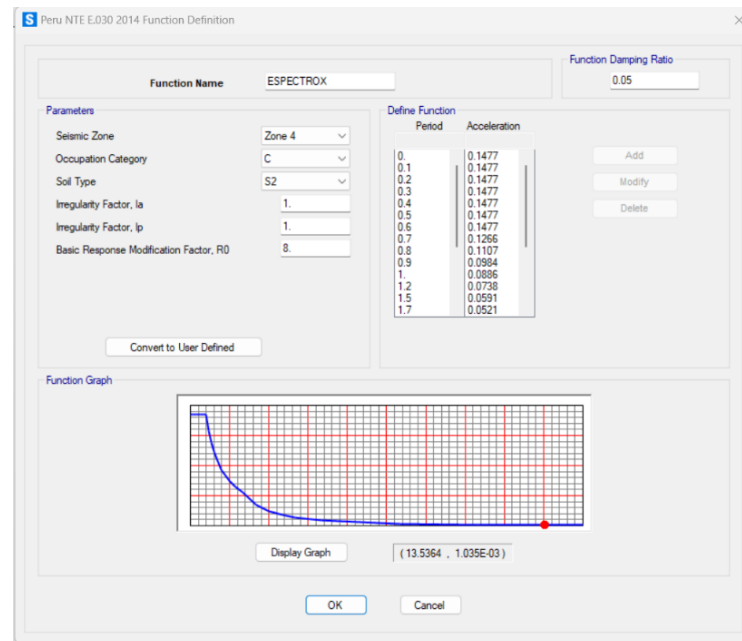
Resumen de Parámetros Sísmicos

Resumen de parámetros sísmicos	
Factor de Zona	$Z = 0,45$
Factor de Uso	$U = 1,00$
Factor de Suelo	$S = 1,05$
Periodo de Transición	$TP = 0.6 \text{ s}$
Periodo Largo	$TL = 2,00 \text{ s}$
Pórticos de C.A.	$R_x = 8,00$
Pórticos de C.A.	$R_y = 8,00$

Nota. La tabla indica los parámetros sísmicos considerados para la edificación de estudio.

Figura 24

Parámetros Sísmicos en SAP2000



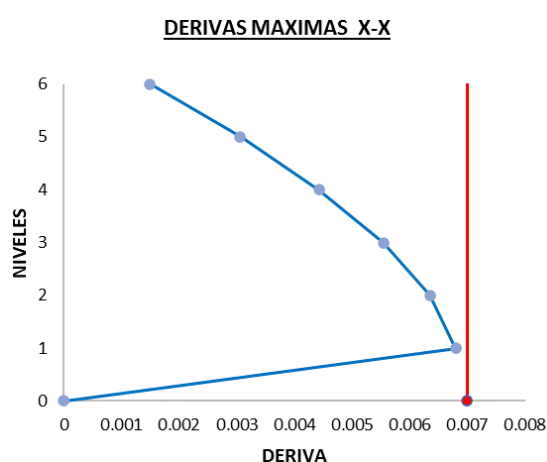
Nota. La figura muestra el espectro con los parámetros sísmicos de la estructura, considerando un amortiguamiento del 5%.

4.2.2 Derivas

La verificación de derivas obtenidas a partir del análisis modal espectral se presenta a continuación en las Figuras 25 y 26, donde se muestra el comportamiento lateral del edificio ante la acción sísmica considerada

Figura 25

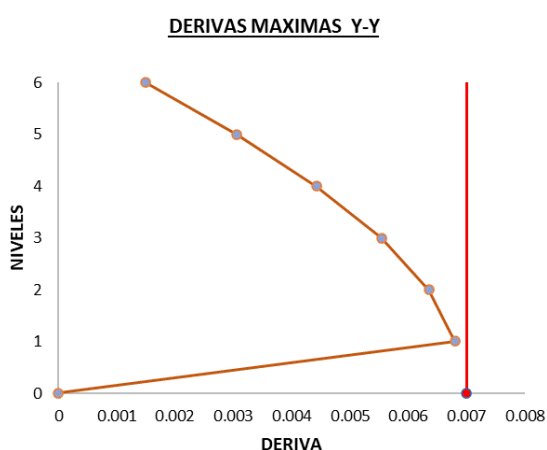
Derivas Máximas en Dirección X-X



Nota. Para la estructura de concreto armado el límite de deriva es de 0,007 según la norma Peruana E.030. En la gráfica se observa que la deriva máxima es de 0.0068 lo cual está dentro del límite.

Figura 26

Derivas Máximas en Dirección Y-Y



Nota. Dado que la estructura presenta simetría geométrica y una distribución equilibrada de rigidez lateral en ambas direcciones, las derivas obtenidas en los análisis en X e Y son prácticamente iguales, lo cual confirma el comportamiento estructural esperado.

4.3. Análisis Dinámico No Lineal (OpenSeesPy)

4.3.1 Propiedades no lineales de los materiales

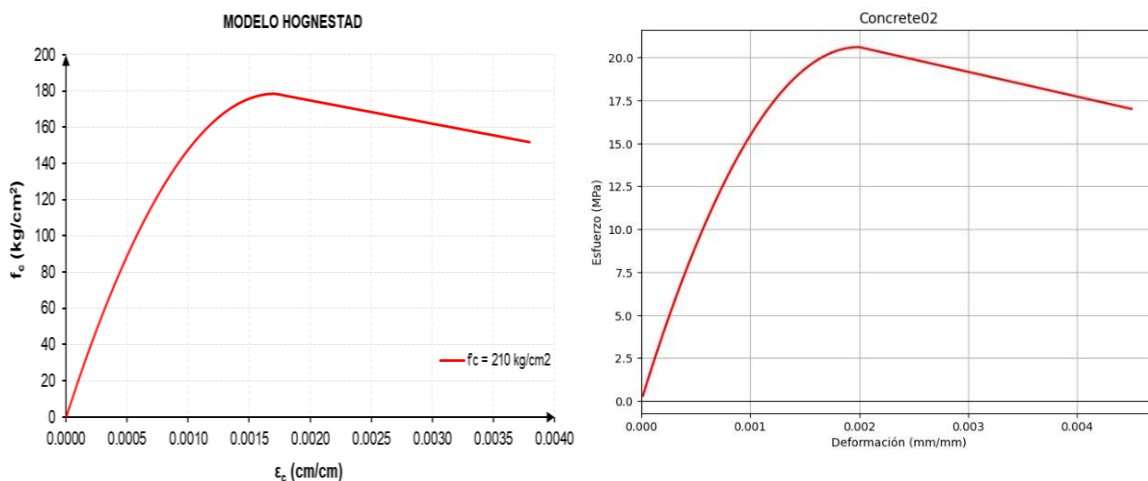
Para realizar el análisis no lineal en el presente estudio, se busca evaluar la respuesta de la estructura más allá del rango elástico, permitiendo que los materiales experimenten deformaciones permanentes. En este contexto, es necesario utilizar modelos constitutivos que representen de manera más realista el comportamiento del concreto y el acero bajo carga extrema, los cuales se muestran a continuación:

4.3.1.1 Concreto

En el caso del concreto, se utilizó el modelo propuesto por Hognestad para representar el comportamiento en compresión, el cual se muestra en la Figura 27. Este modelo describe una curva parabólica ascendente hasta el esfuerzo máximo f'_c seguido de un descenso lineal hasta alcanzar la deformación última.

Figura 27

Diagrama Esfuerzo – Deformación del Concreto



Nota. La curva representa el comportamiento a compresión del concreto según el modelo de Hognestad, utilizado en el análisis no lineal del presente estudio. A la izquierda se observa la hoja de cálculo en Excel utilizada para el procesamiento de datos en SAP2000, mientras que a la derecha se presenta la representación gráfica del modelo de Concrete02 obtenida mediante OpenSees.

Este modelo de compresión del concreto proporciona una aproximación realista del comportamiento del concreto bajo carga axial y fue implementado en OpenSeesPy utilizando el modelo Concrete02, el cual permite representar de forma simplificada pero efectiva el comportamiento no lineal del material. En la Figura 28 se presenta el fragmento del código correspondiente a la definición de este modelo en el análisis.

Figura 28

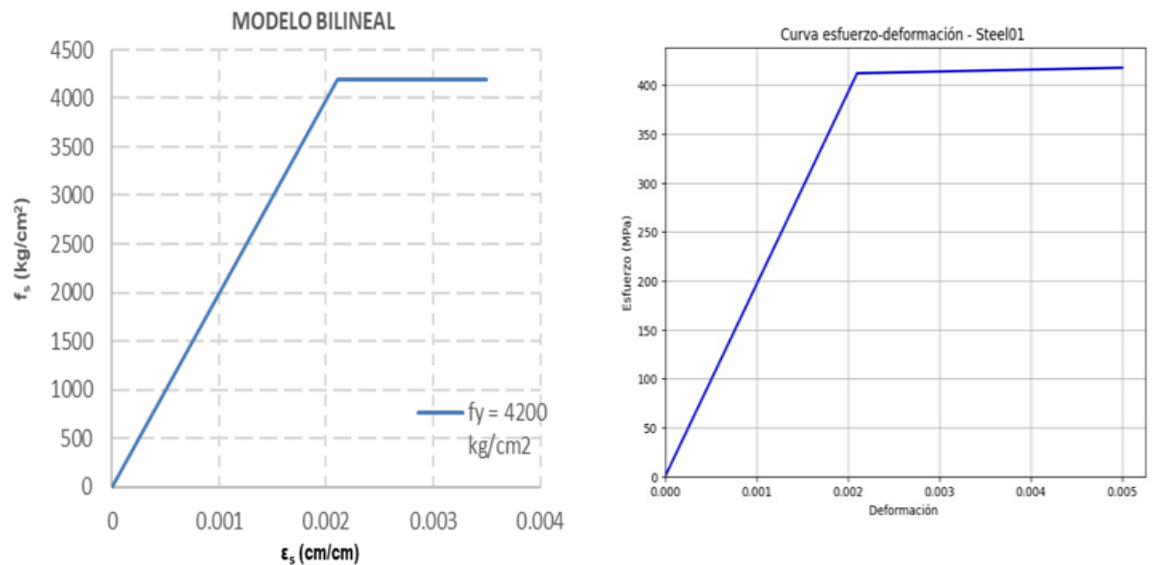
Modelo No Lineal para el Concreto en OpenSeesPy

```
# CONCRETO: Modelo No Lineal Tipo Hognestad
fpc = -20.60 # En MPA
epsc0 = -0.002 # Deformación para f'c (0.002)
Ec = 2*fpc/epsc0
fpcu = -0.85*fpc
epsU = -0.0045 # Deformación para la tensión de rotura confinado (conservador)
# uniaxialMaterial('Concrete02', matTag, fpc, epsc0, fpcu, epsU, lambda, ft, Ets)
ops.uniaxialMaterial('Concrete02', 1, fpc, epsc0, fpcu, epsU, 0.3, 2.83, 0.04*fpc/(2.0*fpc/Ec))
```

Nota. Fragmento del código en OpenSeesPy que define el comportamiento no lineal del concreto mediante el modelo Concrete02, basado en la formulación de Hognestad. Este modelo permite simular la degradación del esfuerzo con el aumento de la deformación a compresión, hasta alcanzar la deformación última del material.

4.3.1.2 Acero

Para la simulación del comportamiento no lineal del acero de refuerzo se adoptó un modelo bilineal con endurecimiento por deformación parabólica, el cual representa adecuadamente la respuesta elasto-plástica del material frente a cargas cíclicas. Tal como se aprecia en la Figura 29, este modelo contempla una fase elástica lineal hasta el esfuerzo de fluencia f_y , seguida de un ramal plástico con pendiente reducida controlada por un coeficiente de endurecimiento que permite reflejar la rigidez post-fluencia del material.

Figura 29*Diagrama Esfuerzo - Deformación del Acero*

Nota. La curva muestra el comportamiento esfuerzo-deformación del acero estructural modelado mediante el modelo bilineal con endurecimiento. A la izquierda se observa la hoja de cálculo en Excel utilizada para el procesamiento de datos en SAP2000, mientras que a la derecha se presenta la gráfica del modelo de Steel01 obtenida mediante OpenSees.

La implementación del modelo bilineal en el código se realizó mediante el comando Steel01 de OpenSeesPy, tal como se muestra en la Figura 30. Esta formulación permitió representar de forma adecuada los efectos de plastificación y la disipación de energía en los elementos estructurales del modelo.

Figura 30*Modelo No Lineal para el Acero en OpenSeesPy*

```
#ACERO: Modelo Bilineal con Endurecimiento
Fy = 412           # Límite elástico (Mpa)
Es = 196200       # Módulo elástico (Mpa)
shr = 0.01        # Pendiente post fluencia
ops.uniaxialMaterial('Steel01', 2, Fy, Es, shr)
```

Nota. Captura del código de OpenSeesPy correspondiente a la definición del acero de refuerzo utilizando el modelo Steel01, el cual representa un comportamiento bilineal con endurecimiento cinemático. Este modelo permite capturar la respuesta elasto-plástica del acero bajo cargas cíclicas.

4.3.1.3 Secciones Fibra

Como se aprecia en la Figura 31, las secciones de las columnas, fueron discretizadas utilizando el comando `section('Fiber')`, donde el concreto se definió mediante un parche rectangular subdividido en 10×10 fibras.

Figura 31

Secciones Compuesta de Fibra para Columnas

```
G = 8945.83; J1 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ1 = G*J1
# section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 1, '-GJ', GJ1)
# patch('rect', matTag, numSubdivY, numSubdivZ, *crdsI, *crdsJ)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -250], *[150, 250])
# layer('straight', matTag, numFiber, areaFiber, *start, *end)
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[-100, -200], *[-100, 200])
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[100, -200], *[100, 200])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -200], *[0, 200])
```

Nota. Las columnas se definieron con secciones tipo fibra, incorporando un parche de concreto que representa el recubrimiento y capas rectas de acero longitudinal distribuidas simétricamente.

Como se aprecia en la Figura 32, el refuerzo longitudinal se modeló con el comando `layer('straight')`, ubicando fibras de acero en las zonas extremas y en el centro de la sección, de acuerdo con una disposición simétrica. Se consideró un área de fibra acorde con barras de diámetro comerciales.

Figura 32

Sección Compuesta de Fibra para Vigas Principales

```
# Viga Principal 250x550
G = 8945.83; J7 = 2.047e9; # N/mm2; mm4
GJ7 = G*J7
ops.section('Fiber', 7, '-GJ', GJ7)
# Concreto
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -275], *[125, 275])
# Acero Superior
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, 225], *[75, 225]) #5/8
ops.layer('straight', 2, 1, 127, *[0, 225], *[0, 225]) #1/2
ops.layer('straight', 2, 2, 71, *[-75, 150], *[75, 150]) #3/8
# Acero Inferior
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, -225], *[75, -225])
ops.layer('straight', 2, 1, 127, *[0, -225], *[0, -225])
ops.layer('straight', 2, 2, 71, *[-75, -150], *[75, -150])
```

Nota. Las vigas principales del sistema estructural fueron modeladas utilizando secciones de fibra que combinan un parche de concreto y varias capas de acero tanto en la parte superior como inferior.

4.3.2 Modelo sin disipadores

Para capturar el comportamiento no lineal de los elementos estructurales del edificio, se utilizaron elementos del tipo `forceBeamColumn` en `OpenSeesPy`. Este tipo de elemento permite representar de manera eficiente la formación de rótulas plásticas en los extremos de vigas y columnas. En la Figura 33 se muestra el fragmento del código empleado para su definición e implementación en el modelo estructural.

Figura 33

Definición de Elementos Estructurales

```
# Elementos Est. Principal
for i in range(1, num_elementos + 1):
    if i <= 32:
        if i == [2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 22, 23, 26, 27, 30, 31]:
            #Columnas centrales C1 nivel 1 y 2 # Columna Horizontal
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 2)
        else:
            #Columnas Perimetrales C1 nivel 1 y 2 # Columnas Verticales
            # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transfTag, integrationTag,
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 1)
            .
            .
            .
            .
            .
    if 168 < i and i <= 240 :
    if i == [229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240]:
        # viga Vertical Roof nivel 6
        ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 102, 6)
    else:
        #Viga Vertical nivel 1 2 3 4 5
        # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transfTag, integrationTag,
        ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 102, 3)
```

Nota. Se muestra la asignación de los elementos estructurales mediante el comando `forceBeamColumn`, en el cual se especifican nodos extremos, sistema de coordenadas locales y el tipo de integración previamente definido.

Con el fin de reflejar con mayor precisión el comportamiento plástico de los elementos estructurales, se adoptó el esquema de integración `HingeRadau`. Este enfoque permite distribuir la no linealidad de manera realista, concentrándola en los extremos del elemento (longitud de rótula plástica), donde se espera la formación de rótulas plásticas mientras que la parte central permanece predominantemente elástica. En la Figura 34 se presenta el fragmento del código correspondiente a esta configuración.

Figura 34*Implementación del Método de Integración No Lineal*

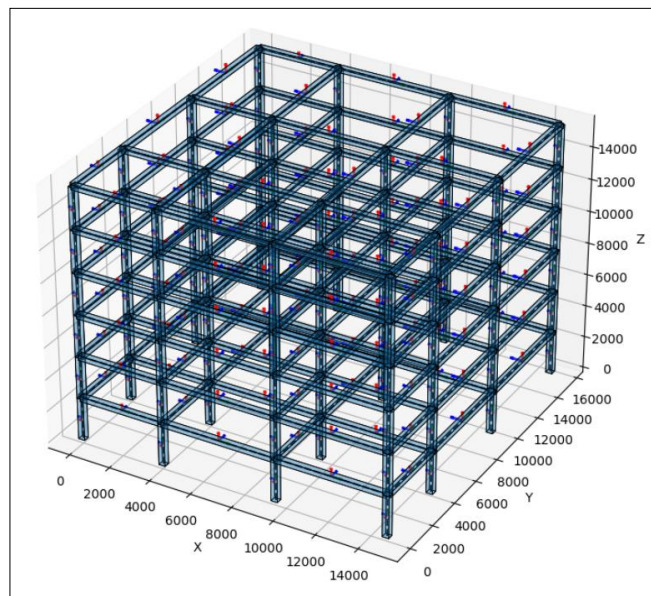
```

elementos = np.loadtxt('elementor.txt', delimiter = ',')
num_elementos = len(elementos)
# beamIntegration('HingeRadau', tag, secI, lpI(d/2), secJ, lpJ, secE(seccion central))
ops.beamIntegration('HingeRadau', 1, 1, 250, 1, 250, 11)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 2, 2, 250, 2, 250, 12)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 3, 3, 250, 3, 250, 13)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 4, 4, 250, 4, 250, 14)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 5, 5, 250, 5, 250, 15)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 6, 6, 250, 6, 250, 16)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 7, 7, 275, 7, 275, 17) # Viga P vertical 250x550 1 2 3 4 5 nivel
ops.beamIntegration('HingeRadau', 8, 8, 250, 8, 250, 18) # Viga S horizontal 250x500 1 2 3 4 5 nivel
ops.beamIntegration('HingeRadau', 10, 10, 200, 10, 200, 19) # Viga Roof 250x350 6 nivel

```

Nota. La imagen muestra la asignación del método HingeRadau para integrar los elementos tipo forceBeamColumn, permitiendo modelar zonas plásticas concentradas en los extremos de vigas y columnas, lo cual es fundamental para capturar el comportamiento inelástico.

Una vez completada la definición de secciones, materiales, elementos y condiciones de borde, se procedió al ploteo del modelo estructural, el cual se puede observar en la Figura 35, donde se aprecia la configuración tridimensional completa del edificio.

Figura 35*Modelo Tridimensional del Edificio en OpenSeesPy*

Nota. La figura representa la estructura tridimensional final del edificio multifamiliar modelado en OpenSeesPy. Esta visualización permite validar la correcta definición geométrica y estructural.

4.3.3 Modelo con disipadores

Para evaluar el efecto de los disipadores en la respuesta sísmica del edificio, se incorporaron elementos adicionales mediante el comando `forceBeamColumn`, tal como se aprecia en el fragmento de código presentado en la Figura 36.

Figura 36

Modelación Numérica de Disipadores de Energía en OpenSeesPy

```
# Elementos Est. Disip
elmtoDisip = np.loadtxt('elementosdferchi.txt', delimiter = ',')
for i in range(len(elmtoDisip)):

    # Las conexiones

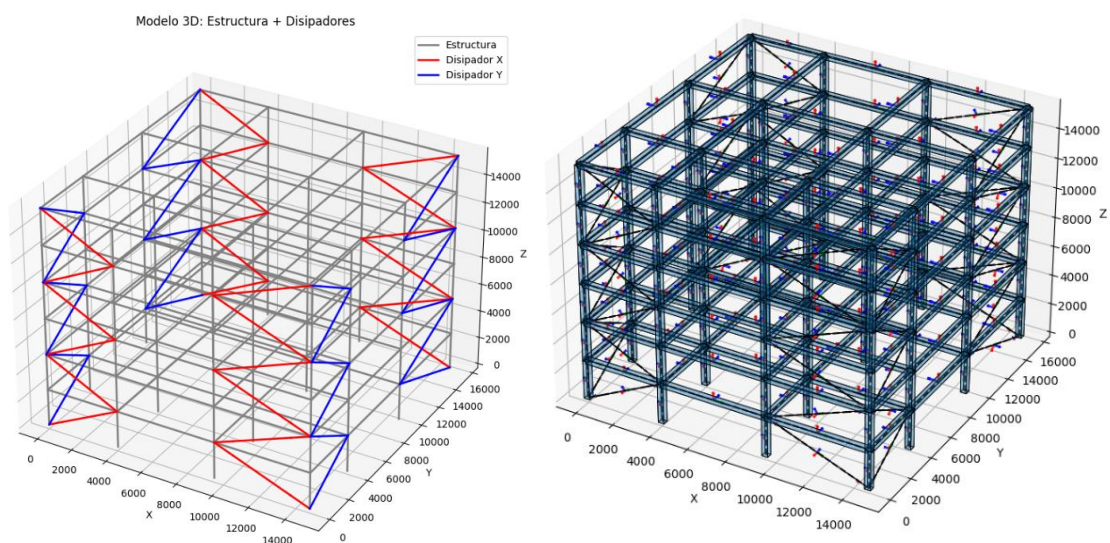
    # Disipadores Primer nivel
    if i <= 16:
        # ops.element('elasticBeamColumn', eLeTag, *eLeNodes, secTag, transfTag)
        ops.element('forceBeamColumn', 5000+i, int(elmtoDisip[i-1, 1]), int(elmtoDisip[i-1, 2]), 101, 17, '-mass', 7.79e-05*a1c*b1c/9810)
```

Nota. El código muestra la implementación de los disipadores en los distintos niveles del edificio mediante elementos tipo `forceBeamColumn`.

A continuación, en la Figura 37, se presenta el modelo tridimensional del edificio con la incorporación de disipadores de energía en los distintos niveles.

Figura 37

Modelo Tridimensional del Edificio con Disipadores en OpenSeesPy



Nota. La imagen muestra la configuración estructural del edificio ya modelado con la inclusión de los disipadores del tipo CRP para los diferentes niveles.

4.4. Tratamiento de Registros Sísmicos

4.4.1 Selección de registros sísmicos

Para el desarrollo del análisis dinámico no lineal tipo tiempo-historia, la Norma Técnica E.030 establece como requisito mínimo el uso de tres registros sísmicos. Sin embargo, con el propósito de obtener resultados estadísticamente más representativos y confiables, se seleccionó un conjunto ampliado de 20 registros acelerográficos provenientes del repositorio del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER Ground Motion Database).

La selección de los registros sísmicos se realizó aplicando criterios específicos que garantizan la compatibilidad con las condiciones sismológicas del sitio de estudio y el entorno tectónico regional, siendo estos los siguientes:

- Magnitudes momento (M_w) comprendidas entre 6.0 y 8.0 grados.
- Velocidades de propagación de onda de corte (V_{s30}) comprendidas entre 180 a 500 m/s, compatibles con suelos tipo S2 según la clasificación establecida por la Norma Técnica E.030.
- Mecanismos focales de tipo transcurrente (strike-slip), congruentes con las fallas de desplazamiento de rumbo características de la región de Tacna.

Las características principales de los registros seleccionados, incluyendo sus parámetros sismológicos correspondientes, se presentan detalladamente en la Tabla 5.

Tabla 5*Registros sísmicos*

No	Nombre de Terremoto	Año	Nombre de Estación	Magnitud (Mw)	Mecanismo	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/s)	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)
1	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	6.95	strike slip	6.09	6.09	213.44	174.70	8.61
2	Parkfield	1966	Cholame - Shandon Array #5	6.19	strike slip	9.58	9.58	289.56	143.01	7.10
3	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	6.61	Reverse	0.00	1.81	216.13	674.14	59.23
4	Managua Nicaragua 01	1972	Managua_ ESSO	6.24	strike slip	3.51	4.06	288.77	300.59	19.12
5	Friuli Italia 01	1976	Tolmezzo	6.50	Reverse	14.97	15.82	505.23	271.68	10.50
6	Imperial Valley 06	1979	Delta	6.53	strike slip	22.03	22.03	242.05	139.43	15.28
7	Imperial Valley 06	1979	El Centro Array #11	6.53	strike slip	12.56	12.56	196.25	141.02	11.59
8	Kobe Japan	1995	OSAJ	6.90	strike slip	21.35	21.35	256.00	64.52	7.07
9	Tabas Iran	1978	Tabas	7.35	Reverse	1.79	2.05	766.77	629.09	40.92
10	Cape Mendocino	1992	Cape Mendocino	7.01	Reverse	0.00	6.96	567.78	724.48	58.07
11	Landers	1992	Coolwater	7.28	strike slip	19.74	19.74	352.98	173.12	9.99
12	Kocaeli Turkey	1999	Duzce	7.51	strike slip	13.60	15.37	281.86	202.31	21.13
13	Chi-Chi Taiwan	1999	CHY028	7.62	Reverse Oblique	3.12	3.12	542.61	336.73	31.06
14	Denali Alaska	2002	TAPS Pump Station #10	7.90	strike slip	0.18	2.74	329.40	233.65	51.10
15	Mammoth Lakes 01	1980	Convict Creek	6.06	Normal Oblique	1.10	6.63	382.12	379.41	21.11
16	Victoria Mexico	1980	Cerro Prieto	6.33	strike slip	13.80	14.37	471.53	286.82	11.80
17	Irpinia Italy 01	1980	Sturno (STN)	6.90	Normal	6.78	10.84	382.00	230.41	24.02
18	Corinto Grecia	1981	Corinth	6.60	Normal Oblique	10.27	10.27	361.40	108.91	7.21
19	Niigata Japón	2004	NIG019	6.63	Reverse	0.21	9.88	372.33	785.95	27.44
20	El Mayor Mexico	2010	Calipatria Fire Station	7.20	strike slip	54.77	55.01	205.78	40.46	7.26

Nota: La siguiente tabla muestra los 30 registros acelerográficos seleccionados y descargados de la base de datos del PEER Ground Motion Database con el objetivo de llevar a cabo un análisis dinámico no lineal tipo Tiempo-Historia.

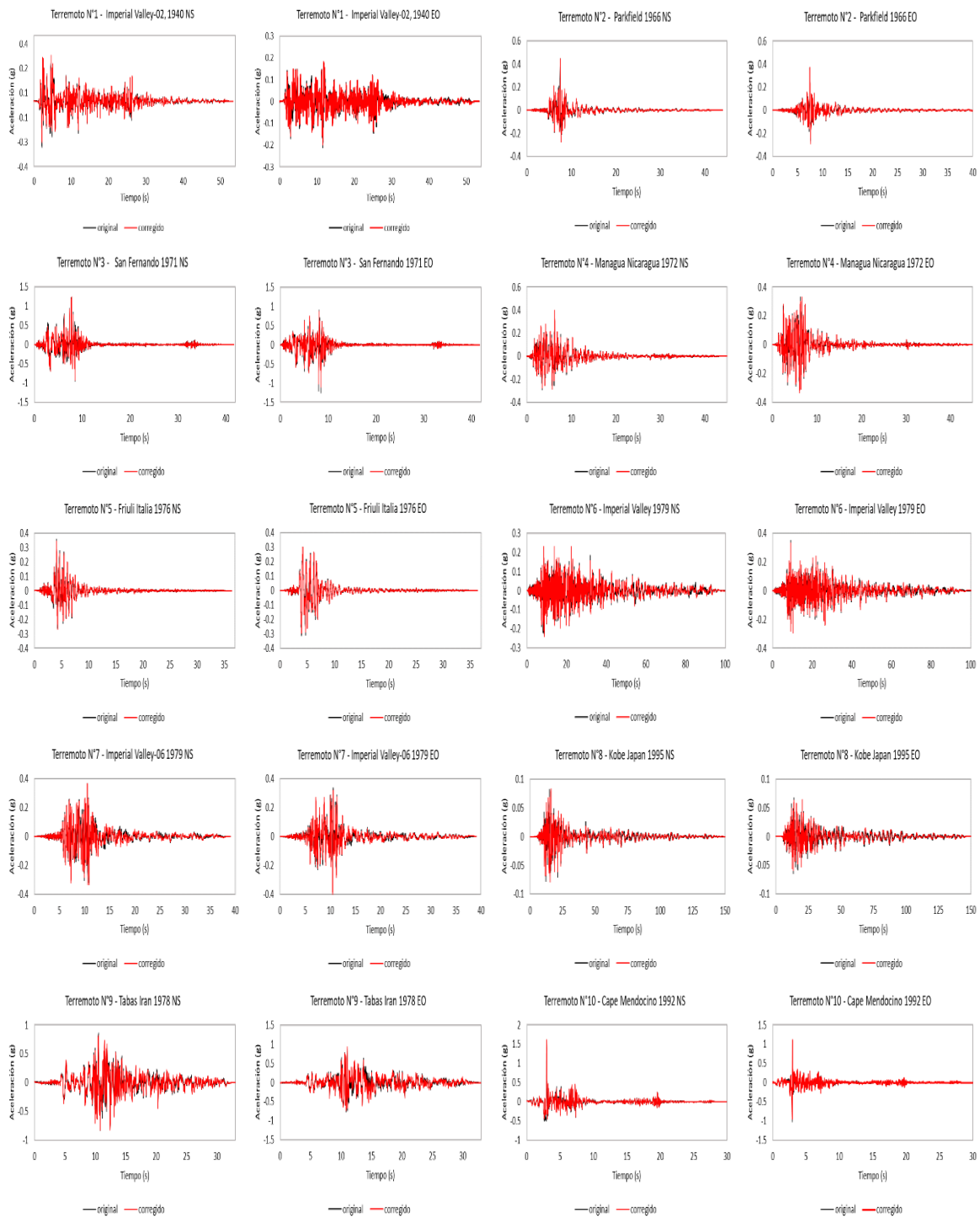
4.4.2 Filtrado y corrección de registros sísmicos

Los registros sísmicos extraídos de la base de datos del PEER pueden presentar señales de baja frecuencia ajenas al movimiento sísmico principal, asociadas a efectos de sitio o condiciones instrumentales. Para corregir estas distorsiones, se aplicó un ajuste por línea base utilizando un polinomio de segundo orden, mediante el software SeismoSignal.

En las Figuras 38 y 39 se presentan comparaciones entre las señales acelerográficas originales y las corregidas de ambas componentes del sismo, evidenciándose una mayor estabilidad y coherencia en la respuesta tras el proceso de filtrado.

Figura 38

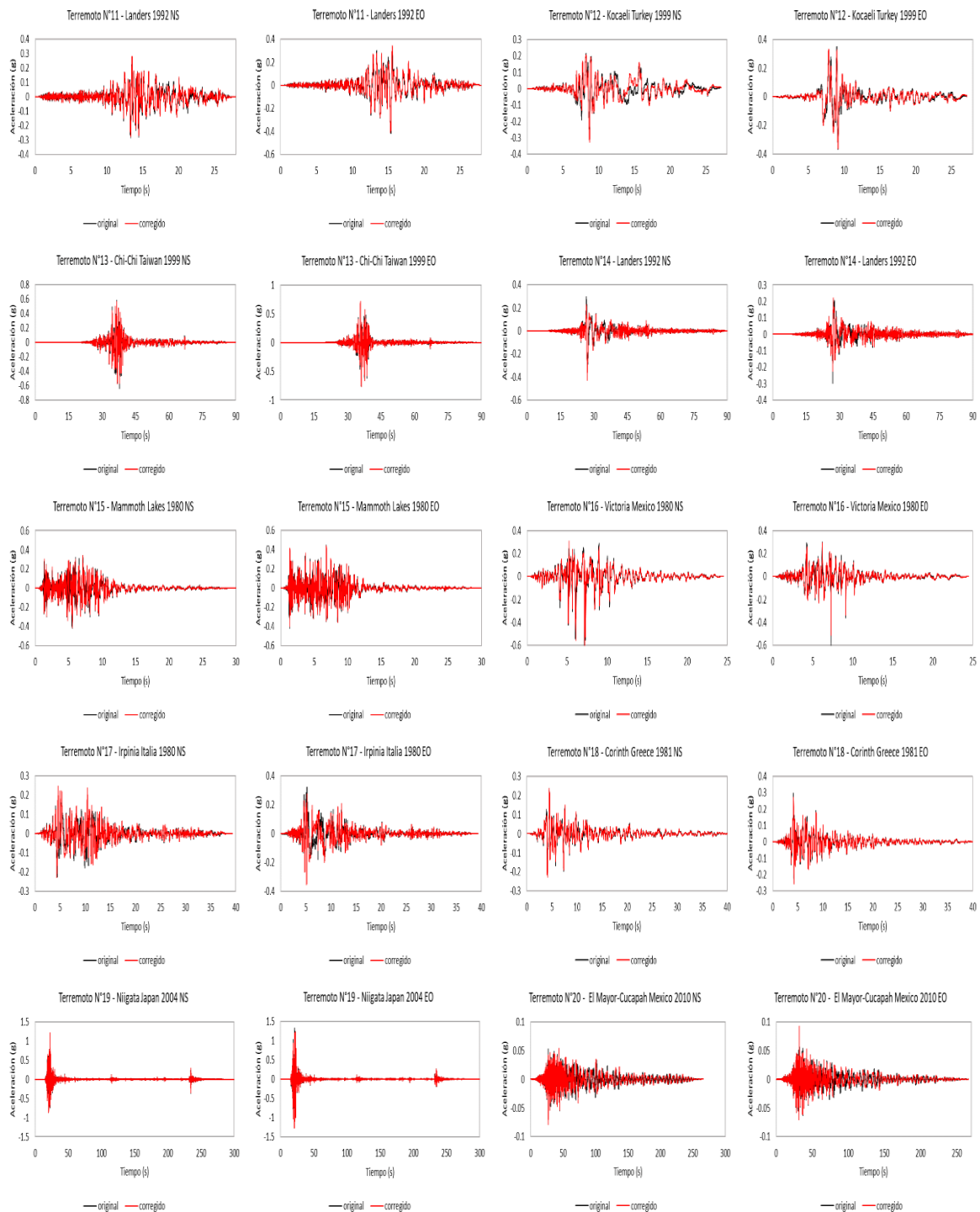
Filtrado y Corrección del Registro Sísmico N°1 al N°10



Nota. La figura presenta el proceso de filtrado y corrección de los Registros Sísmicos N°1 al N°10, aplicado para eliminar componentes de ruido de baja y alta frecuencia.

Figura 39

Filtrado y Corrección del Registro Sísmico N°11 al N°20



Nota. La figura presenta el proceso de filtrado y corrección de los Registros Sísmicos N° 11 al N°20, aplicado para eliminar componentes de ruido de baja y alta frecuencia.

4.4.3 *Determinación de dirección máxima de demanda*

La norma americana ASCE 7-22 en el Artículo 16.2.3.2, indica que, en lugar de usar por separado los espectros de los dos componentes ortogonales del sismo, se combine su efecto para obtener un espectro único que representa la mayor respuesta posible en cualquier dirección horizontal. A eso se le llama espectro de dirección máxima, y se obtiene evaluando cuál es la respuesta más alta combinada de los dos componentes para cada período.

Para construir dicho espectro de dirección máxima primero es necesario obtener el registro de aceleración en la máxima dirección, la cual se calcula con la siguiente expresión matemática.

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

Donde:

$a_x(t)$ = Componente de aceleración en la dirección X

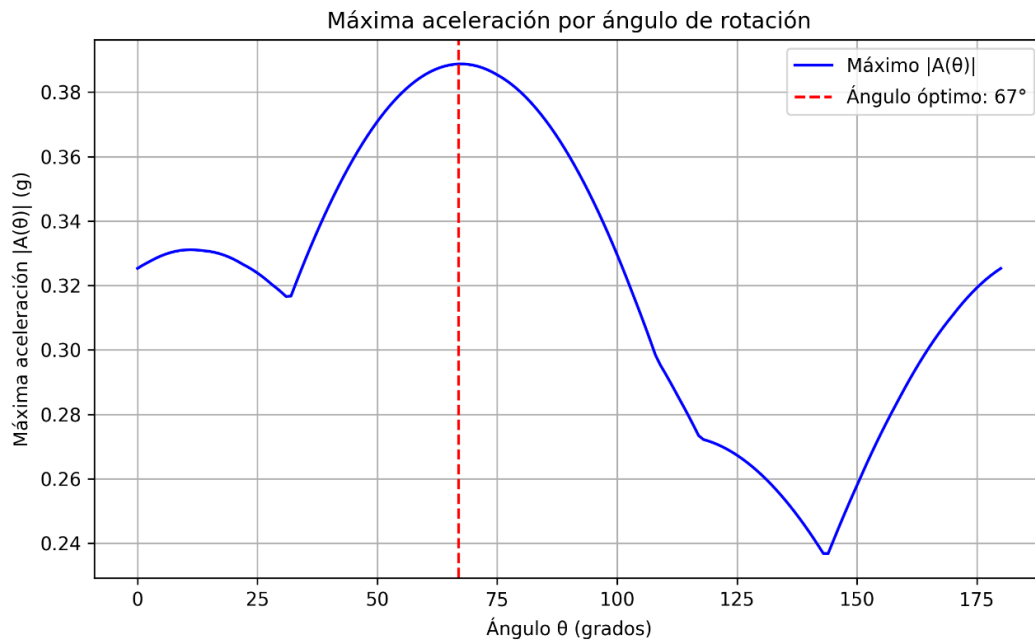
$a_y(t)$ = Componente de aceleración en la dirección Y

θ = Angulo de rotacion desde el eje X

Para determinar la dirección máxima de cada registro sísmico, se implementó un código en OpenSeesPy (ver Anexo D), que calcula la aceleración máxima resultante al rotar los dos componentes ortogonales del movimiento sísmico. Este análisis se realiza variando el ángulo θ entre 0° y 180° , combinando ambas componentes en cada dirección para evaluar la respuesta total. Los resultados se muestran en la Figura 40, donde se observa cómo varía la aceleración máxima con respecto al ángulo, permitiendo identificar la dirección que genera la mayor demanda sísmica sobre la estructura, de acuerdo con lo establecido por la norma ASCE/SEI 7-22.

Figura 40

Variación de la Aceleración Máxima en Función del Ángulo de Rotación θ



Nota. La figura muestra la variación de la aceleración máxima obtenida al rotar los componentes horizontales del registro sísmico en diferentes ángulos θ , desde 0° hasta 180° . El valor máximo indica la dirección en la que el sismo genera la mayor demanda sobre la estructura, siendo utilizada para construir el espectro de dirección máxima conforme a la norma ASCE/SEI 7-22.

La Tabla 6 presenta los ángulos de rotación asociados a la aceleración máxima registrada en cada uno de los 20 sismos analizados.

Tabla 6*Ángulo de Máxima Dirección de Demanda*

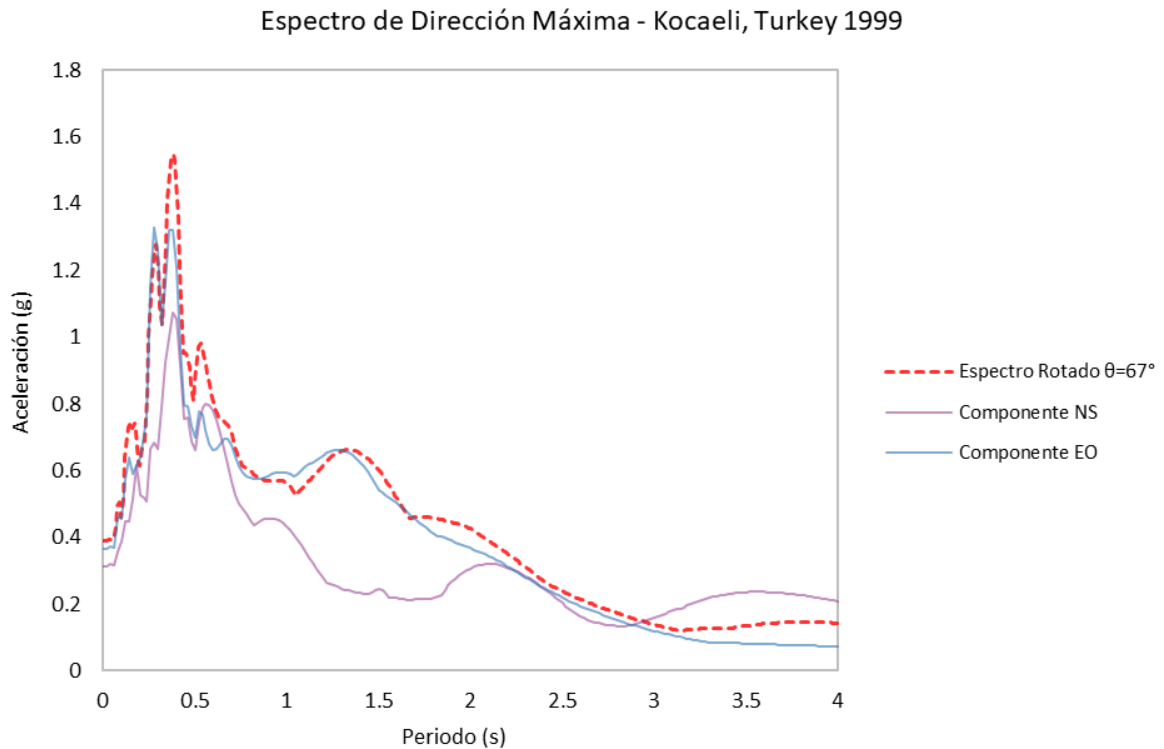
No	Nombre de Terremoto	Año	Nombre de Estación	Ángulo (°)	Aceleración máxima (g)
1	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	173	0.28303
2	Parkfield	1966	Cholame - Shandon Array #5	167	0.4565
3	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	50	1.4399
4	Managua Nicaragua-01	1972	Managua ESSO	29	0.45365
5	Friuli Italy-01	1976	Tolmezzo	34	0.40786
6	Imperial Valley-06	1979	Delta	87	0.33377
7	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	40	0.47265
8	Kobe Japan	1995	OSAJ	14	0.08583
9	Tabas Iran	1978	Tabas	93	0.92915
10	Cape Mendocino	1992	Cape Mendocino	36	1.88787
11	Landers	1992	Coolwater	87	0.41119
12	Kocaeli Turkey	1999	Duzce	67	0.38875
13	Chi-Chi Taiwan	1999	CHY028	66	0.83532
14	Denali Alaska	2002	TAPS Pump Station #10	172	0.42954
15	Mammoth Lakes-01	1980	Convict Creek	54	0.51318
16	Victoria Mexico	1980	Cerro Prieto	168	0.63132
17	Irpinia Italia -01	1980	Sturno (STN)	84	0.35733
18	Corinth Greece	1981	Corinth	128	0.33817
19	Niigata Japan	2004	NIG019	141	1.5834
20	El Mayor-Cucapah Mexico	2010	Calipatria Fire Station	96	0.09234

Nota. La tabla presenta los valores del ángulo de rotación θ correspondientes a la dirección máxima de cada registro sísmico, definidos como aquellos que generan la aceleración máxima a partir de la combinación de los dos componentes horizontales del movimiento del suelo.

Una vez identificada la dirección que genera la respuesta sísmica más crítica, se procedió a rotar cada uno de los registros sísmicos mediante una combinación lineal de sus componentes ortogonales proyectadas en dicha dirección. A partir de estos historiales rotados, se construyó el espectro de respuesta correspondiente a la dirección máxima, el cual se muestra en la Figura 41.

Figura 41

Espectro de Aceleración Máxima para el Sismo N°12



Nota. La figura presenta el espectro de respuesta correspondiente a un ángulo de rotación de 67° , identificado como la dirección que genera la máxima aceleración combinada a partir de los dos componentes horizontales del sismo. Considerando un amortiguamiento del 5%, este espectro representa la dirección máxima exigida por la norma ASCE/SEI 7-22 para el escalamiento de registros, y sirve como base para comparar con el espectro de diseño objetivo.

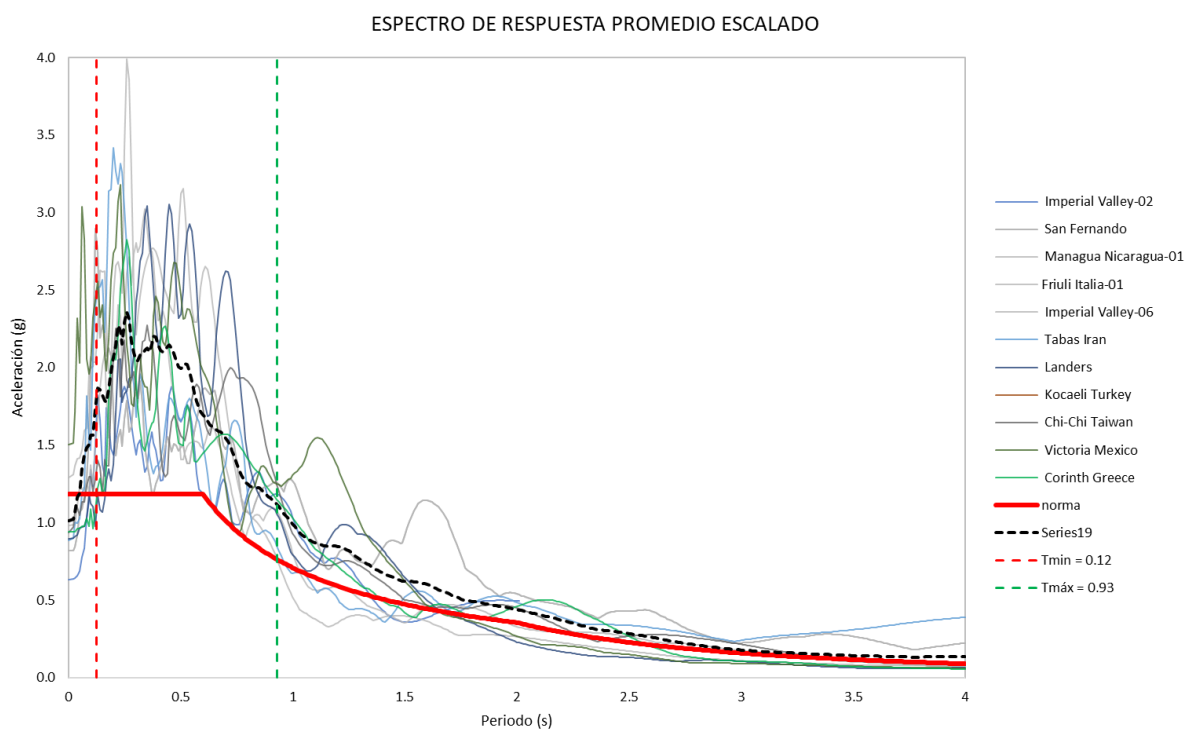
En cumplimiento de lo establecido por la norma, se construyó un espectro de dirección máxima para cada par de componentes horizontales de los registros sísmicos utilizados, identificando el ángulo de rotación θ que maximiza la respuesta estructural, es decir, la orientación específica en la que la combinación de ambos componentes genera la mayor aceleración posible.

4.4.4 Escalado al espectro de diseño (Norma E.030)

Los espectros de pseudo-aceleración de los registros sísmicos rotados, fueron escalados de forma que su respuesta espectral se aproxime al espectro de diseño establecido por la Norma Técnica Peruana E.030. En la Figura 42 se observa que, en el intervalo de periodos entre 0.12 s y 0.93 s, los registros escalados presentan una buena compatibilidad con el espectro objetivo.

Figura 42

Espectro Compatibilizado de Pseudo-Aceleraciones



Nota. El gráfico representa la comparación de los espectros de pseudo-aceleración correspondientes a los 11 registros sísmicos seleccionados y el espectro objetivo elástico ($R=1$), definido según la NTP E.030.

De los 20 registros sísmicos iniciales, se seleccionaron 11 con los menores factores de escala requeridos para ajustarse al espectro de diseño, lo que permitió conservar mejor las características originales del movimiento. La Tabla 7 presenta los factores de escala aplicados a los espectros de dirección máxima, compatibles con el espectro objetivo en el

rango de períodos entre 0.12 y 0.93 s, cumpliendo con el criterio normativo de que el promedio no sea inferior al 90 % del espectro en dicho intervalo.

Tabla 7

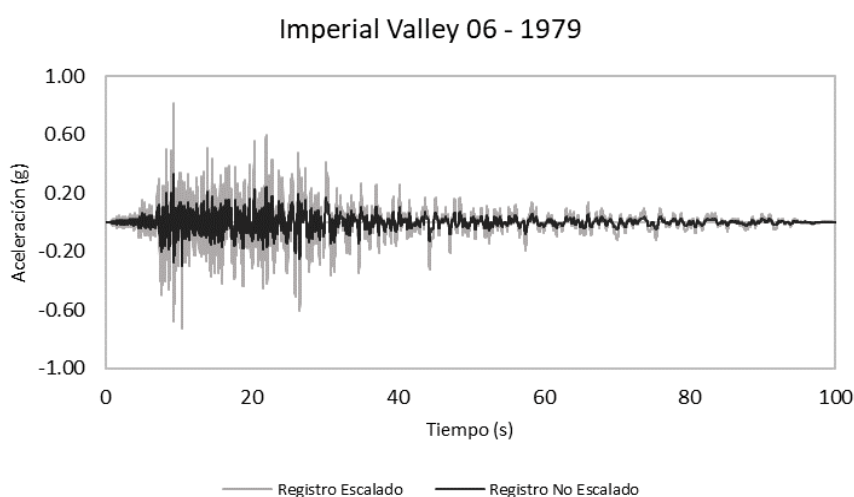
Registros sísmicos escalados compatibles con el espectro objetivo

No	Nombre de Terremoto	Año	Nombre de Estación	Factor Escala
1	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	2.23
3	San Fernando	1971	Pacoima Dam (upper left abut)	1.04
4	Managua Nicaragua-01	1972	Managua ESSO	2.16
5	Friuli Italia-01	1976	Tolmezzo	3.17
6	Imperial Valley-06	1979	Delta	2.45
9	Tabas Iran	1978	Tabas	0.95
11	Landers	1992	Coolwater	2.18
12	Kocaeli Turkey	1999	Duzce	1.92
13	Chi-Chi Taiwan	1999	CHY028	1.12
16	Victoria Mexico	1980	Cerro Prieto	2.38
18	Corinth Greece	1981	Corinth	2.78

Nota. Los 11 registros sísmicos representan los registros sísmicos con los menores factores de escala además de una buena coincidencia con el espectro objetivo definido por la norma peruana.

Figura 43

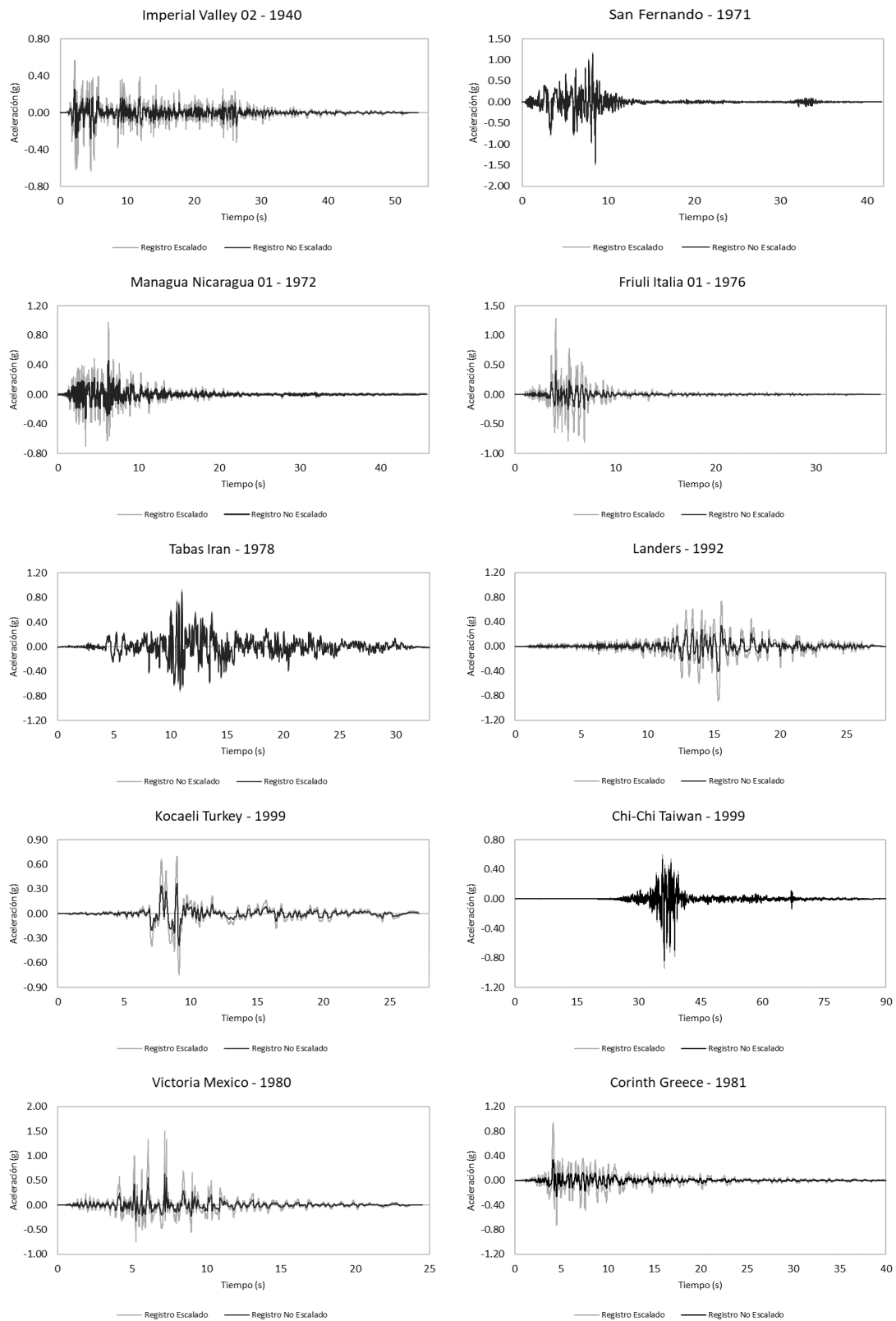
Registro Acelerográfico Escalado, Sismo N°06



Nota. La figura muestra la comparación entre el registro sísmico original y el registro escalado del sismo Imperial Valley 06 (1979), los demás registros se presentarán la Figura 44.

Figura 44

Registros Acelerográficos Originales vs. Escalados



Nota. La figura muestra la comparación entre los registros sísmicos originales y sus versiones escaladas, destacando el ajuste realizado en la amplitud de las señales.

4.5. Análisis Comparativo de Resultados

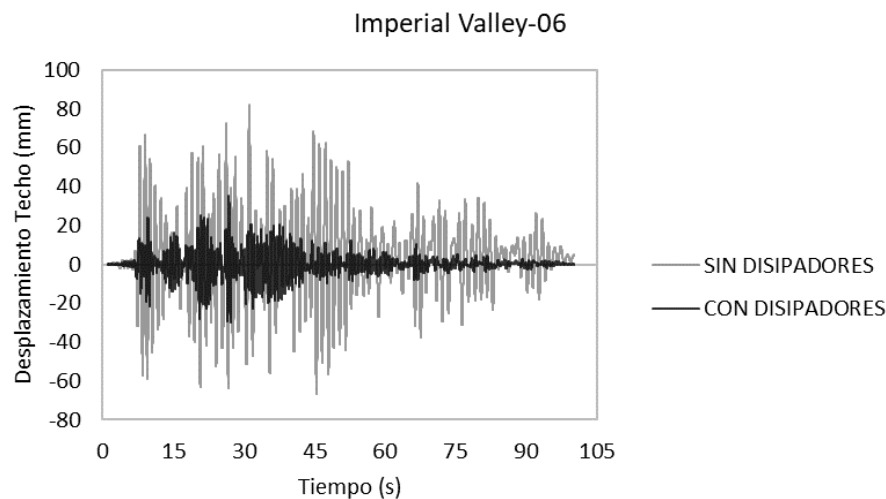
4.5.1 Desplazamientos de techo

Los desplazamientos fueron monitoreados a partir del nodo maestro 118, ubicado en el nivel superior (nivel 06) de la edificación. El análisis dinámico no lineal tiempo-historia se realizó considerando únicamente la dirección de máxima aceleración para cada registro, obtenida previamente a través de la rotación de los componentes horizontales del movimiento del suelo

La Figura 45 y 46 presentan el historial de desplazamientos del nodo maestro a lo largo del tiempo, comparando la respuesta estructural del edificio con y sin la implementación de disipadores de energía. Para cada caso se aplicaron distintos registros sísmicos rotados en la dirección de máxima aceleración.

Figura 45

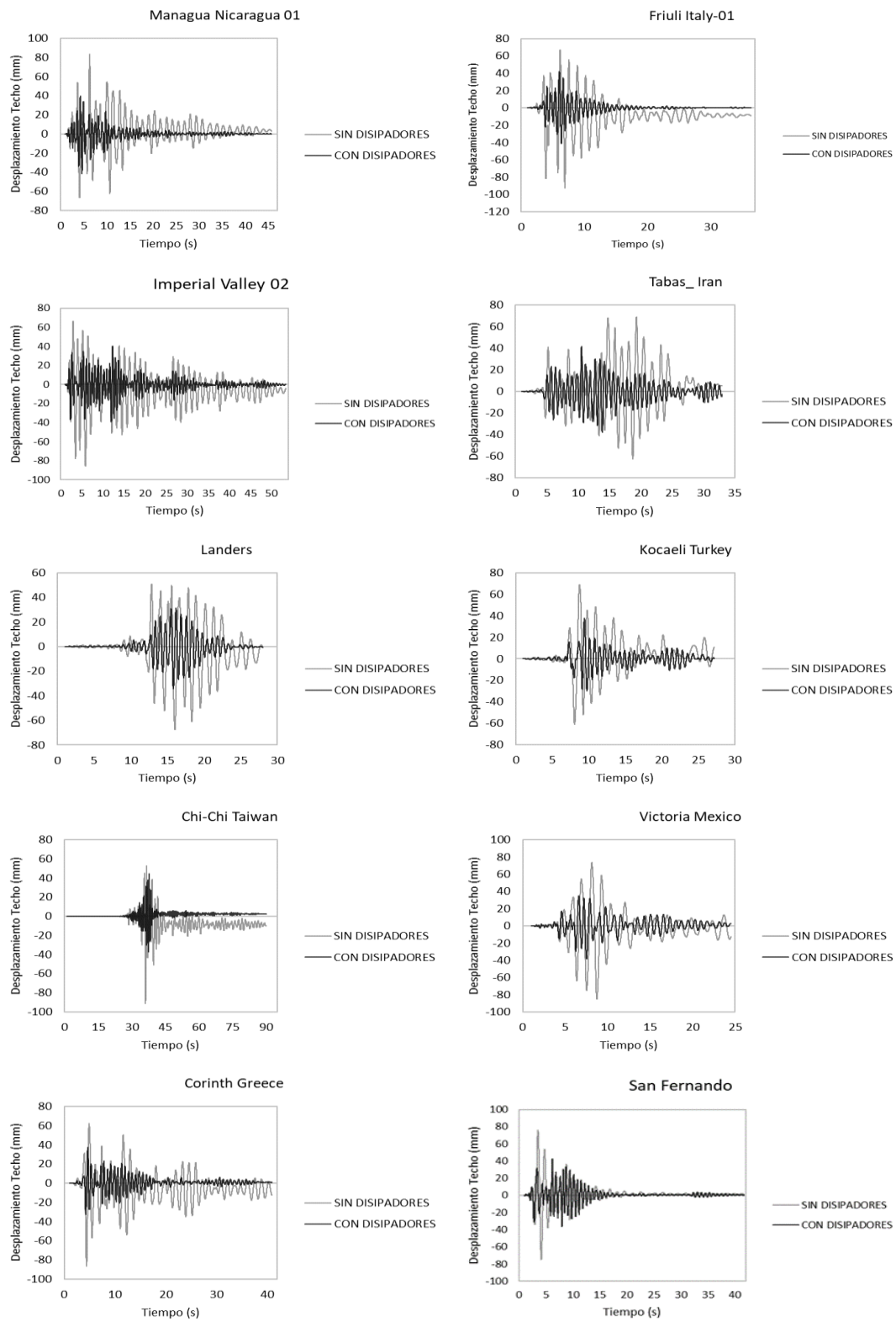
Desplazamientos Máximos de Techo, Sismo N°06



Nota. La figura muestra los desplazamientos dinámicos en el nivel superior de la edificación ante el sismo Imperial Valley 06, comparando el comportamiento de los modelos estructurales con y sin disipadores de energía.

Figura 46

Desplazamientos Máximos de Techo



Nota: La figura muestra los desplazamientos dinámicos en el nivel superior de la edificación, comparando la respuesta estructural de los modelos con y sin disipadores de energía.

Del análisis de las figuras presentadas, se evidencia una reducción significativa en los desplazamientos máximos del nivel superior cuando se incorporan disipadores de energía. Esta reducción se aprecia mejor en la Tabla 8.

Tabla 8

Reducción de Respuesta en Techo por Efecto de Disipadores

N°	TERREMOTO	Sin Disipadores (mm)	Con Disipadores (mm)	Reducción (%)
1	Imperial Valley 02	66.3819	40.1786	39.47%
3	San Fernando	75.8437	42.2193	44.33%
4	Managua Nicaragua 01	83.5878	41.8242	49.96%
5	Friuli Italy 01	92.3606	42.0809	54.44%
6	Imperial Valley 06	82.2259	34.9918	57.44%
9	Tabas Iran	68.991	41.8796	39.30%
11	Landers	67.3393	34.1402	49.30%
12	Kocaeli Turkey	68.7106	37.8571	44.90%
13	Chi Chi Taiwan	90.9973	44.6112	50.98%
16	Victoria Mexico	85.2895	38.0662	55.37%
18	Corinth Greece	86.3408	37.5492	56.51%

Nota. Los valores mostrados corresponden al desplazamiento máximo en el nodo de azotea para cada uno de los registros sísmicos considerados. Se compara la respuesta estructural del modelo con y sin disipadores, evidenciando la eficiencia del sistema en la reducción de desplazamientos.

4.5.2 Derivas

Como parte del análisis dinámico no lineal tiempo-historia, se evaluaron las derivas de entrepiso de la edificación, los cuales se calcularon de manera automatizada mediante el código desarrollado en OpenSeesPy, el cual también permitió generar las gráficas comparativas necesarias para interpretar la respuesta estructural.

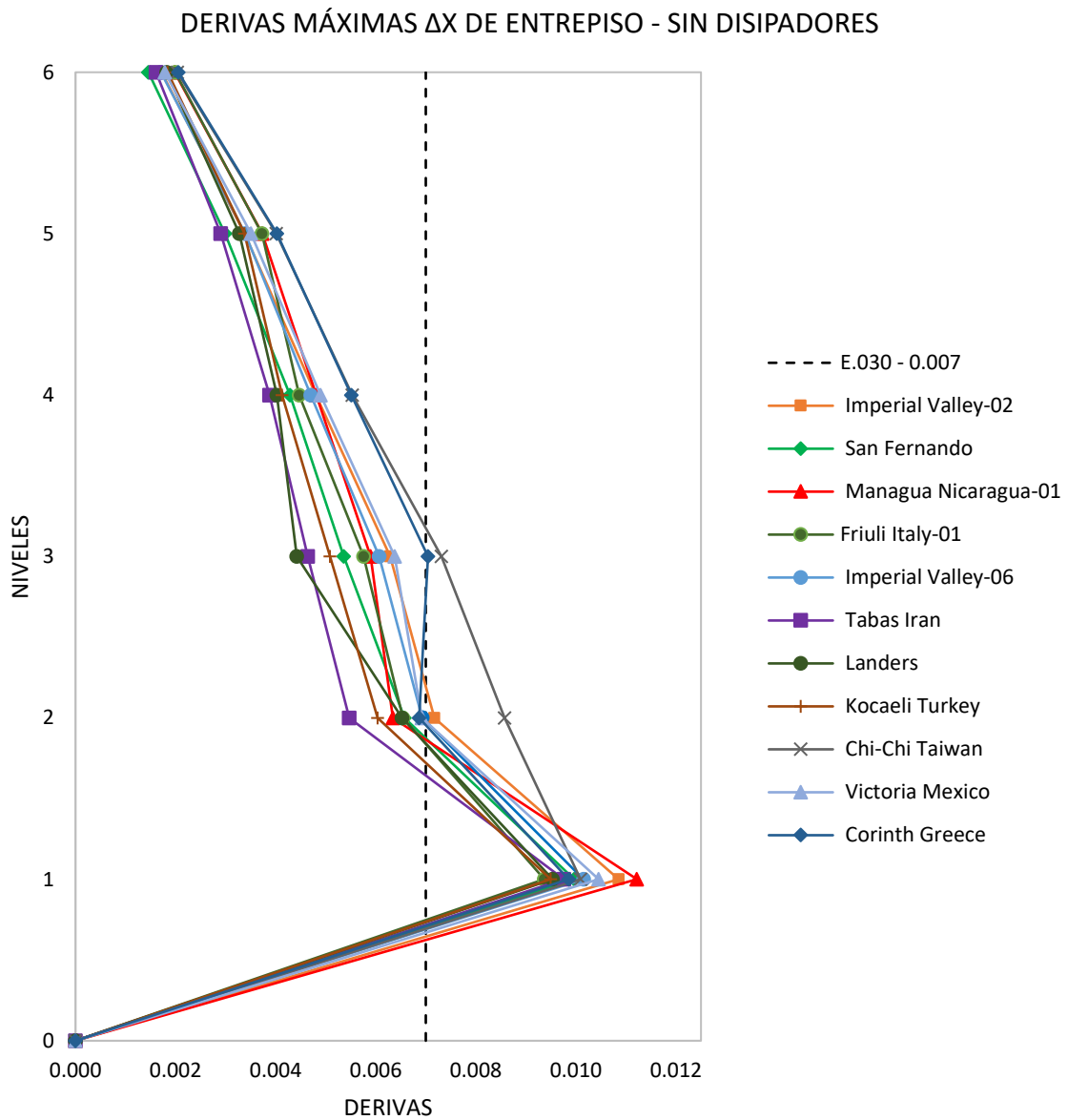
Para efectos del presente análisis comparativo, se establecieron dos umbrales diferenciados de control de derivas; en el caso de la edificación sin disipadores de energía, se consideró el valor límite de 0.007, conforme a lo establecido por la Norma Técnica Peruana E.030 para estructuras de concreto armado. Por otro lado, para los modelos con

disipadores, se adoptó un criterio de desempeño más estricto, empleando un valor límite de 0.005, correspondiente al nivel "Operacional" definido por la norma del ASCE 41-17.

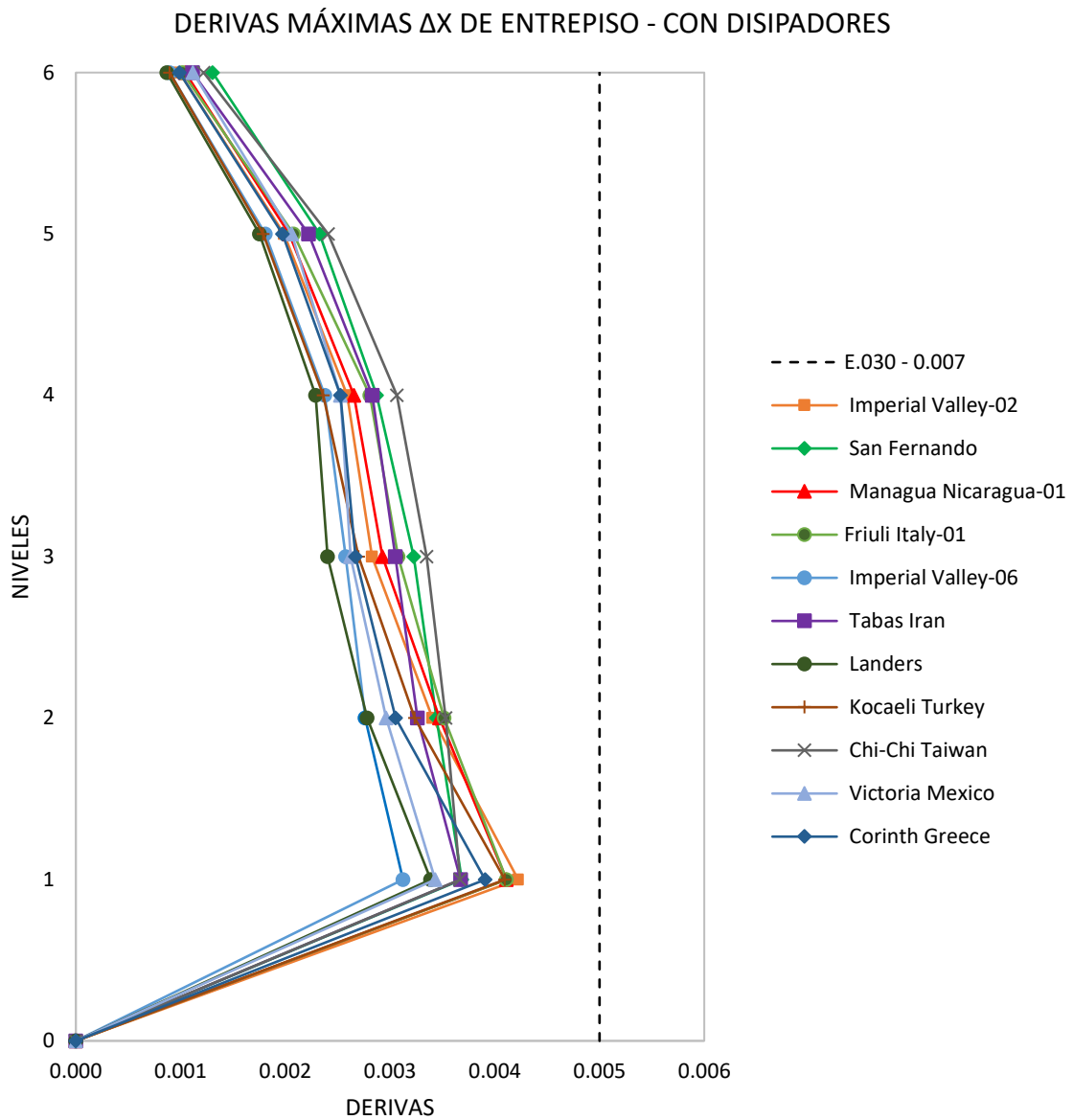
La Figura 47 presenta las derivas máximas por piso obtenidas para un conjunto representativo de registros sísmicos en el modelo sin disipadores, mientras que la Figura 48 muestra los resultados correspondientes al modelo con disipadores de energía. Al comparar ambos gráficos, se evidencia que la implementación de disipadores permite una reducción significativa de las derivas entre pisos, especialmente en los niveles superiores. Este comportamiento confirma la efectividad del sistema de disipación en el control de deformaciones laterales, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa vigente y alineándose con los objetivos de desempeño estructural propuestos en la presente investigación.

Figura 47

Derivas de Entrepiso – Modelo sin Disipadores



Nota. Se presentan las derivas de entrepiso obtenidas a partir del análisis dinámico no lineal tiempo-historia para los 30 registros sísmicos aplicados en la dirección de máxima aceleración. Los resultados corresponden al modelo estructural sin disipadores. La línea de referencia representa el límite máximo de deriva de 0.007 establecido por la Norma Técnica Peruana E.030 para estructuras de concreto armado.

Figura 48*Derivas de Entrepiso – Modelo con Disipadores*

Nota. En esta investigación se adopta una deriva máxima de 0.005 (0.5%), correspondiente al nivel de desempeño estructural Operacional, según los criterios establecidos por la ASCE 7-22 (p.134). Este límite fue seleccionado debido a que el sistema estructural incorpora disipadores de energía, permitiendo un control efectivo de la respuesta sísmica con daño estructural mínimo, y asegurando la continuidad operativa de la edificación después del evento.

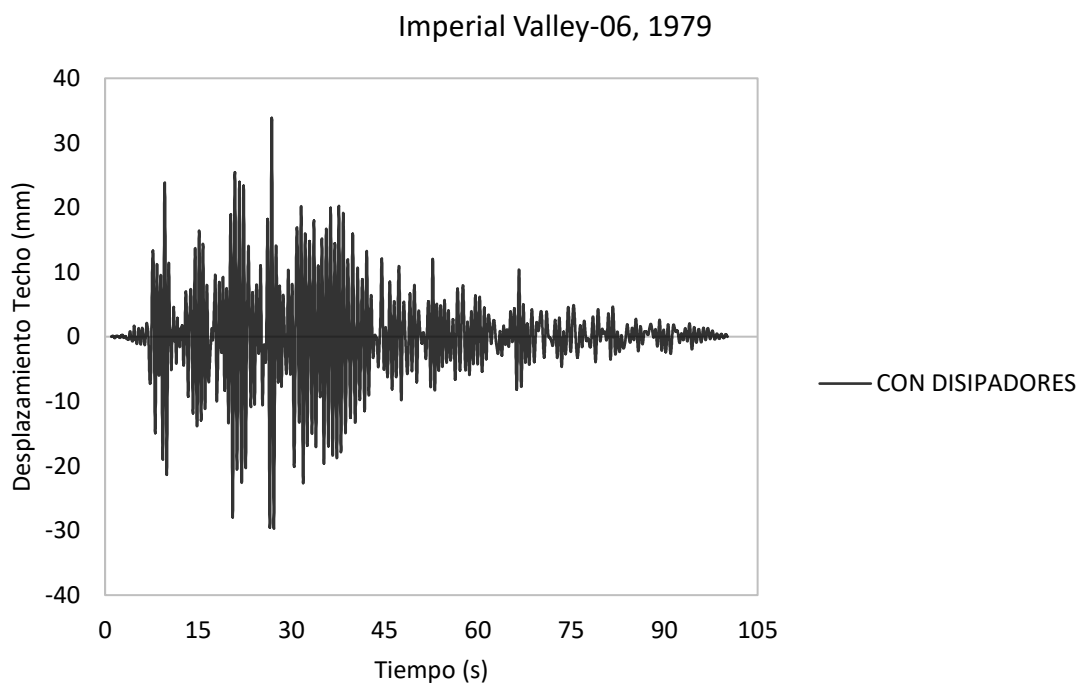
4.5.3 Validación parcial mediante modelo en SAP2000

Con el objetivo de brindar mayor confiabilidad a los resultados obtenidos mediante el análisis dinámico no lineal tiempo-historia realizado en OpenSeesPy, se desarrolló un modelo estructural equivalente en el software SAP2000, con las mismas características geométricas, condiciones de apoyo, distribución de cargas y propiedades de materiales.

La validación parcial se llevó a cabo mediante la comparación de los desplazamientos máximos y mínimos del nivel superior, para un conjunto representativo de sismos, utilizando los mismos registros sísmicos y factores de escala. La comparación se centró en el modelo con disipadores, ya que es el escenario más importante para propósitos de esta investigación, los valores se muestran en la Figura 49 y Figura 50 y Tabla 9.

Figura 49

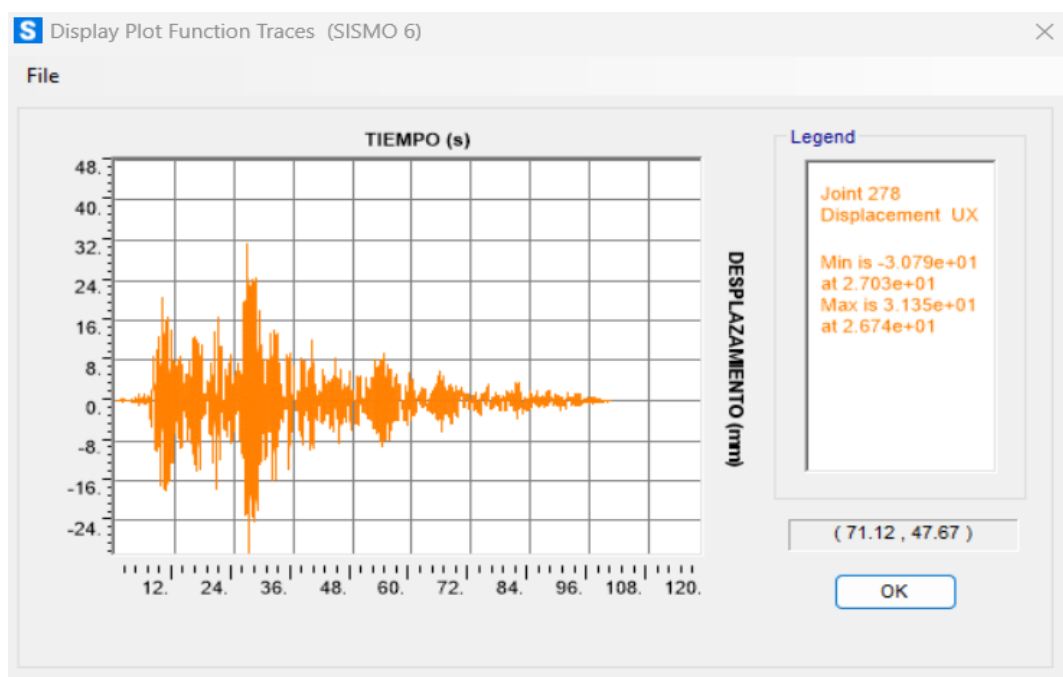
Historial de Desplazamiento de Techo – Modelo en OpenSeesPy



Nota. Historial de desplazamiento de techo obtenido mediante análisis dinámico no lineal tiempo-historia en OpenSeesPy, aplicando el registro sísmico en la dirección de máxima aceleración.

Figura 50

Historial de Desplazamiento de Techo – Modelo en SAP2000



Nota. Historial de desplazamiento de techo calculado en SAP2000 mediante análisis dinámico no lineal tiempo-historia, utilizando el mismo registro sísmico y condiciones de contorno de la Figura 40.

Tabla 9

Desplazamientos Máximos y Mínimos - OpenSeesPy vs SAP2000

Desplazamiento (mm)	OpenSeesPy	Sap2000	Error relativo (%)
Máximo	33.87	31.35	8.03%

Nota. Los valores muestran una diferencia menor al 9 % entre ambos modelos, lo que se considera aceptable para fines de validación parcial. Esta concordancia refuerza la confiabilidad del modelo no lineal desarrollado en OpenSeesPy, a pesar de las diferencias en el enfoque de análisis entre ambos programas.

La concordancia en las respuestas y la magnitud de los desplazamientos valida la consistencia del modelo desarrollado en OpenSeesPy, otorgando confianza en los resultados presentados en esta investigación.

Capítulo V: Discusión de Resultados

5.1. Hipótesis General

Según lo planteado en la hipótesis general “Mediante el uso de OpenSeesPy y siguiendo las normativas vigentes se realizará un análisis sísmico dinámico no lineal, incorporando disipadores histeréticos en una edificación de seis niveles, en la ciudad de Tacna, 2025” se indica lo siguiente:

- Los resultados presentados en las Figuras 49 y 50, así como en la Tabla 8, muestran que la incorporación de disipadores histeréticos generó una reducción significativa tanto en las derivas máximas de entrepiso como en los desplazamientos globales del techo, en comparación con el modelo sin disipadores. Estas reducciones se mantuvieron dentro de los límites normativos establecidos por la norma ASCE 41-17 y la Norma Técnica Peruana E.030, lo que demuestra que el sistema estructural modificado cumple con los requisitos de seguridad y desempeño sísmico.
- Orocollo (2024), realizó un análisis no lineal tiempo-historia en un edificio universitario ubicado también en la ciudad de Tacna, específicamente en la Universidad Tecnológica del Perú, evaluando la eficiencia de los disipadores de fluido viscoso. Su estudio, desarrollado con el software ETABS, reportó una reducción promedio del 48% en los desplazamientos y del 58% en las derivas máximas, confirmando la efectividad de los disipadores tipo CRP en el control de movimientos laterales. Aunque el presente estudio empleó OpenSeesPy como plataforma de simulación y se desarrolló un modelo detallado con secciones de fibras, los resultados obtenidos en la Tabla 8, evidencian una reducción promedio de 49% en los desplazamientos, estos resultados son coherentes y consistentes con los de Orocollo, lo cual, no solo valida los beneficios del uso de disipadores, sino que

también demuestra la fiabilidad del código desarrollado en Python para representar la respuesta sísmica no lineal de la edificación.

En consecuencia, se concluye que la hipótesis general ha sido cumplida, el uso de OpenSeesPy, junto con la implementación de disipadores histeréticos, permite modelar adecuadamente el comportamiento dinámico no lineal de la estructura, logrando una mejora significativa en su desempeño sísmico.

5.2. Hipótesis Específicas

5.2.1 Primera Hipótesis

En base a la hipótesis específica “Para representar el comportamiento no lineal de los materiales, se emplearán los modelos constitutivos de Hognestad para el concreto y el modelo bilineal para el acero de refuerzo” se indica lo siguiente:

- El modelo de concreto no confinado Concrete02, implementado con base en la formulación de Hognestad (1951) y referenciado por Ottazzi (2003), permitió representar de forma efectiva la respuesta no lineal en compresión del concreto estructural. Este modelo capturó adecuadamente la fase parabólica ascendente hasta la resistencia máxima y el posterior descenso controlado, con valores de deformación típicos de $\epsilon_0 = 0.002$ y ϵ_{cu} entre 0.003 y 0.004.
- Por su parte, el modelo Steel01 empleado para el acero estructural se basó en un comportamiento bilineal con endurecimiento, permitiendo simular tanto la fase elástica como el inicio de la fluencia y el posterior endurecimiento. Según Jaramillo y Riveros (2011), este modelo logra reproducir de manera realista el comportamiento del acero bajo cargas crecientes, reflejando la redistribución de esfuerzos posterior a la fluencia.

- Ambos modelos se implementaron en elementos tipo fibra dentro del entorno OpenSeesPy, y su respuesta fue coherente con el comportamiento esperado de materiales estructurales sometidos a solicitaciones sísmicas intensas. La curva esfuerzo-deformación obtenida en los análisis coincidió con las formulaciones teóricas y permitió observar fenómenos como la pérdida de rigidez del concreto y la fluencia en el acero, confirmando la validez de los modelos constitutivos elegidos.

5.2.2 *Segunda Hipótesis*

De acuerdo con la hipótesis específica “Mediante el lenguaje de programación Python se puede desarrollar un código confiable en OpenSeesPy para realizar análisis dinámico no lineal en edificaciones de seis niveles, con resultados consistentes” se indica lo siguiente:

- Se confirma que fue posible desarrollar un código funcional y confiable utilizando el lenguaje Python a través de OpenSeesPy, permitiendo llevar a cabo un análisis dinámico no lineal tiempo-historia sobre un modelo de seis niveles. La construcción del modelo estructural se realizó con base en la definición precisa de geometría, materiales, secciones transversales mediante fibras, masas, registros sísmicos escalados y parámetros de análisis adecuados.
- De acuerdo con Mendez y Olivares (2024), OpenSeesPy combina la robustez del motor de análisis OpenSees con la flexibilidad de Python, permitiendo automatizar procesos, realizar análisis secuenciales y modificar parámetros con facilidad. Esto se evidenció en el presente estudio al comparar la velocidad de ejecución entre OpenSeesPy y SAP2000, obteniéndose una diferencia promedio de 10 minutos a favor de OpenSeesPy, especialmente en registros sísmicos con mayor número de

puntos. Esta eficiencia permitió realizar múltiples análisis en menor tiempo, lo cual es fundamental para realizar análisis no lineales a gran escala.

- Asimismo, los resultados obtenidos fueron consistentes con los reportados en estudios previos. Por ejemplo, Mendez y Olivares (2024) desarrollaron modelos similares con OpenSees para estructuras aporticadas de concreto armado, encontrando respuestas dinámicas comparables a las obtenidas con software comerciales como. Del mismo modo, Contreras et al. (2021) reportaron diferencias menores al 8.5 % entre los desplazamientos y derivas calculadas en OpenSees y SAP2000. En concordancia con estos antecedentes, el análisis realizado en el presente estudio, utilizando el registro sísmico del Imperial Valley, evidenció una diferencia del 8.03 % en el desplazamiento de techo entre el modelo con disipadores simulado en OpenSeesPy y su réplica en SAP2000 (ver Tabla 9). Esta similitud numérica respalda la confiabilidad del modelo propuesto y confirma la validez del uso de OpenSeesPy como herramienta de análisis estructural en estudios no lineales.

5.2.3 Tercera Hipótesis

Según lo planteado en la hipótesis específica “Mediante la implementación de disipadores histeréticos en un modelo numérico desarrollado en OpenSeesPy se puede mejorar significativamente el comportamiento sísmico de la edificación de seis niveles” se indica lo siguiente:

- En el presente estudio, la incorporación de disipadores tipo CRP en configuración diagonal permitieron reducir significativamente los desplazamientos máximos en el nivel superior de la estructura. De acuerdo con la Tabla 8, la reducción máxima alcanzó un valor de 57%, lo cual se encuentra dentro del mismo orden de magnitud reportado por Deulkar et al. (2010), quienes documentaron una reducción del

64.84 % para configuraciones similares. Esta cercanía en los resultados permite validar la eficiencia del modelo numérico implementado en OpenSeesPy, y respalda la efectividad de los disipadores histeréticos en mejorar el desempeño sísmico de estructuras de mediana altura.

- En cuanto al control de derivas, las Figuras 49 y 50 muestran que los valores máximos de deriva se redujeron considerablemente con la incorporación de los disipadores, cumpliendo con los límites establecidos por la ASCE 7-16 y la Norma Técnica Peruana E.030. La deriva máxima registrada en el modelo con disipadores fue de 0.42% permaneciendo dentro del rango permitido.
- Asimismo, la implementación de disipadores histeréticos permitió que gran parte de la estructura principal se mantuviera en el rango elástico o en niveles de no linealidad controlados (Ver figura 48) Esto se tradujo en una reducción significativa de las deformaciones permanentes, como los desplazamientos residuales. Tal comportamiento es coherente con lo indicado por Harikrishnan y Gupta (2020), quienes afirman que las estructuras que ingresan al rango inelástico acumulan desplazamientos residuales, asociados al desplazamiento espectral inelástico.

Finalmente, la cercanía entre la reducción del 57 % observada en este estudio y la reducción del 64.84 % reportada por Deulkar et al. (2010) para configuraciones similares, permite validar la eficiencia del modelo numérico implementado en OpenSeesPy, así como confirmar la hipótesis planteada, al demostrar que el uso de disipadores histeréticos mejora significativamente el comportamiento sísmico de la edificación evaluada.

Conclusiones

- Con relación al objetivo general de la investigación, se logró evaluar el desempeño sísmico no lineal mediante modelos desarrollados en OpenSeesPy, encontrando que la implementación de disipadores histeréticos permitió reducir los desplazamientos máximos de techo hasta en un 57% y las derivas máximas hasta en un 69%. Estos resultados demuestran que la estructura con disipadores cumple con los límites establecidos por la norma ASCE 7-16 (0.5%) y la E.030 (0.7%), mejorando significativamente su comportamiento frente a eventos sísmicos.
- Se seleccionaron los modelos constitutivos de Hognestad para el concreto y el modelo bilineal para el acero, los cuales demostraron ser adecuados para representar el comportamiento no lineal de los materiales en un análisis dinámico. Ambos modelos fueron integrados en secciones de fibra, lo que permitió simular de manera realista la degradación de rigidez, la pérdida de resistencia y el comportamiento histerético de la estructura frente a solicitaciones sísmicas.
- Se construyó un código de análisis dinámico no lineal para una edificación de seis niveles utilizando OpenSeesPy. La estructura fue modelada con elementos tipo fibra, lo que permitió representar adecuadamente la no linealidad del concreto y del acero mediante los modelos constitutivos de Hognestad y el modelo bilineal idealizado, respectivamente. El análisis tiempo-historia se realizó con registros sísmicos escalados en función de la Norma ASCE 7-22.
- Se implementaron disipadores histeréticos tipo barra en configuración diagonal, logrando una reducción promedio del 49% en desplazamientos de techo y del 52% en derivas, en comparación con el modelo sin disipadores. En el caso más crítico (sismo Imperial Valley-02), la deriva máxima con disipadores fue de 0.42%, valor que permanece dentro del límite normativo.

Recomendaciones o Sugerencias

- A los profesionales y docentes de Ingeniería Civil, se recomienda fomentar el uso de plataformas de modelado avanzado como OpenSeesPy en universidades y oficinas de diseño, ya que permiten realizar análisis no lineales detallados, lo cual contribuye a una toma de decisiones más informada y a un diseño estructural que priorice el control de daños ante eventos sísmicos severos.
- A los proyectistas e ingenieros estructurales, se sugiere comparar los desplazamientos y derivas obtenidos en OpenSeesPy con los resultados generados en softwares como ETABS o SAP2000, a fin de validar los modelos numéricos empleados e identificar posibles discrepancias que podrían comprometer la precisión del análisis estructural.
- A los futuros investigadores, se recomienda realizar estudios comparativos entre disipadores histeréticos metálicos y otros dispositivos de control sísmico (viscosos, de fricción, fluido-viscosos), para evaluar cuál de ellos ofrece un mejor desempeño energético según el tipo de estructura, usando como herramienta de análisis la plataforma OpenSeesPy.
- A las entidades responsables del diseño y construcción de edificaciones en zonas de alta sismicidad, se recomienda la implementación de disipadores histeréticos metálicos, debido a su capacidad para reducir significativamente los desplazamientos y derivas laterales, mejorar el desempeño estructural global y concentrar el daño en componentes reemplazables sin comprometer la integridad del sistema estructural principal.

Referencias Bibliográficas

Bibliografía Física

- Aquino, K. y Patiño, R. (2022). *Protección sísmica de edificios educativos peruanos vulnerables con disipadores histeréticos* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/23791>
- Bustos, F. (2019). *Diseño de disipadores histeréticos de energía sísmica para un pórtico de 5 plantas* [Tesis de Pregrado, Universidad de Talca]. <http://dspace.otalca.cl/handle/1950/12947>
- Cano, G., Dávalos, C., López, A., López, V., Soto, M., Alvarado, I., y Chavoya, J. (2017). Modelación analítica de la respuesta de estructuras con disipadores de energía pasivos del tipo histeréticos ante cargas dinámicas. *Cultura Científica y Tecnológica*, (59). <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/1503>
- Celigüeta, J. (2009). *Análisis de estructuras con no linealidad geométrica* (1.^a ed.). Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Navarra.
- Chininín, J., y Duran, N. (2022). *Análisis del comportamiento dinámico no-lineal en OpenSees de estructuras con disipadores sísmicos metálicos ranurados desacoplados* [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/38022>
- Chopra, A. (2020). *Dinámica de estructuras: Teoría y aplicaciones a la ingeniería de terremotos* (4.^a ed.). Pearson Educación.
- Contreras, N., Hernández, F., Bazáez, R., Astroza, R., Ochoa, F., y Pastén, C. (2022). Análisis de la respuesta no lineal tiempo-historia del Puente Águila Norte usando OpenSees y SAP2000. Universidad de Chile.

- Cortés, F. (2011). *Solución de problemas estructurales y geotécnicos con OpenSees* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja].
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/147356>
- Grohmann, C., Campanha, G. y Soares, A. (2011). OpenStereo: Um programa livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. *XIII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos & VII International Symposium on Tectonics*.
<https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.1037685.V1>
- Hognestad, E. (1951). *A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members*. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series No. 399, Bulletin No. 1.
- Jaramillo, R., y Riveros, C. (2011). *Análisis no lineal dinámico tridimensional de edificios en concreto reforzado sometidos a los registros del sismo de Quetame (2008)* [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. Bogotá, Colombia.
- Lewis, J. (2003). Housing construction in earthquake-prone places: Perspectives, priorities and projections for development. *Australian Journal of Emergency Management*, 18(2), 35–44.
- Mendez, L. y Olivares, E. (2024). *Análisis dinámico de una estructura de concreto armado de 4 niveles de sistema aporricado con la aplicación del software OpenSees* [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo].
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/147356>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma técnica E.030: Diseño sismorresistente*.

- Mora, M., Villalba, J., & Yáñez, E. (2006). Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 59-74.
- Ottazzi Pasino, G. (2003). *Apuntes del curso Concreto Armado I*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. [Material de clase no publicado].
- Roque, P., Violanda, R., Bernido, C., y Soria, L. (2023). Earthquake occurrences in the Pacific Ring of Fire exhibit a collective stochastic memory for magnitudes, depths, and relative distances of events. *Research Center for Theoretical Physics*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4450059>
- Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica* (5.^a ed.). México: Limusa.
- Velasco, L. (2021). *Diseño óptimo del refuerzo estructural, mediante disipadores CRP, para la adecuación del desempeño sísmico de estructuras aporticadas de hormigón armado* [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10251/177909>
- Velasco, L. y Guerrero, H. (2020). *Introducción al análisis estructural con OpenSees*. Editorial Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Wilson, E. (2004). *Análisis estático y dinámico de estructuras: un enfoque físico con énfasis en ingeniería sísmica*. Computers and Structures, Inc.

Bibliografía Electrónica

- American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 41-17: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*.
- American Society of Civil Engineers. (2022). *ASCE/SEI 7-22: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*.
- Aracena, J. y Germoso, C. (2019). Respuesta sísmica local de la presa Las Dos Bocas utilizando un análisis no lineal. *Revista de Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 2(1), 7–32. <https://doi.org/10.22206/cyap.2019.v2i1.pp7-32>
- Bird, R. y Encarnação, L. (2023). Evaluation of the P- Δ (P-Delta) effect in columns and frames using the two-cycle method based on the solution of the beam-column differential equation. *MethodsX*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102248>
- Blog spot. (2017). Sistema Constructivo Aporticado – Elementos Estructurales. <https://sistemaaporticado.blogspot.com/2017/11/que-es-un-sistema-aporticado.html>
- Bono, R. (2012). “*Diseños cuasi-experimentales y longitudinales*”. Editorial Universitat de Barcelona. <https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/30783>
- Boore D., Azari S. y Akkar S. (2012). Using Pad-Stripped Acausally Filtered Strong-Motion Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102 (2): 751–760. <https://doi.org/10.1785/0120110222>
- Boore, D. (2010). Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1830–1835. <https://doi.org/10.1785/0120090400>
- Brito Tapia, J. A., Terán Coloma, R. A. y Guerrero Cuasapaz, D. P. (2022). *Influencia Estructural de Disipadores SLB para Muros Desacoplados en Estructuras de*

Concreto Armado y Arriostramientos en Estructuras Metálicas, Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia, 45(3), 185-200.

<https://doi.org/10.22209/rt.v45n3a05>

Caballero, L., Cano, H., Molina, M. y Villalba, J. (2023). Propuesta de modelación numérica de disipadores histeréticos metálicos tipo TADAS, en edificaciones de pórticos de concreto y acero. *Revista EIA*, 20(40), 1-20.

<https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1688>

Caro, L. (21 de enero de 2021). Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.

Lidefer. <https://www.lifeder.com/tecnicas-instrumentos-recoleccion-datos/>

Christopoulos, C., Pampanin, S. y Priestley, M. (2003). Performance-based seismic response of framed structures including residual deformations. *Journal of Earthquake Engineering*, 7(1), 97–118. <https://doi.org/10.1142/S1363246903000705>

Chura, E. (2019). ESTUDIO DE RIESGO SISMICO EN EL DISTRITO DE CIUDAD NUEVA TACNA. *Revista Ciencia y Desarrollo*, 1(11), 101–104.

<https://doi.org/10.33326/26176033.2007.11.235>

Colunga, A. y Hernández, H. (2013). Diseño sísmico de marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos: definición de parámetros de diseño. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 13(2), 275-299.

https://www.scipedia.com/public/Colunga_Hernández_2013a

Corazi, R. y Fuentes, M. (2023). *Análisis comparativo de sistemas de protección sísmica entre aisladores sísmicos y disipadores SLB en el Hospital Hipólito Unanue de Tacna – 2023.* [Tesis de Pregrado, Universidad Privada de Tacna].

<http://hdl.handle.net/20.500.12969/3196>

- Dampo Systems (2024). *Manual de diseño de estructuras equipadas con disipadores histeréticos*. <https://www.dampo.com.mx>
- De La Cruz, J. y Yoctún, R. (2022). Análisis comparativo del diseño estructural de una edificación regular e irregular de ocho niveles en sistema de pórticos aplicando la norma E.030 2003, 2016 y 2018 diseño sismorresistente en la Ciudad de Lima. *Revista Gaceta Técnica*, 23(1), 48-71. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.5>.
- Deulkar, W., Modhera, C. y Patil, H. (2010). Buckling restrained braces for vibration control of building structure. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 4(4), 363–372. Recuperado de <https://ijrras.com>
- Domínguez, D. (2024). Optimization and analysis of hysteretic energy dissipators in reinforced concrete frame structures of five, 10 and 15 stories. *Revista International Journal of Protective Structures*, 23(4), 180-195. <https://doi.org/10.1177/20414196241286157>
- Domínguez, D., Pallares F. y Muñoz P. (2024). Vulnerability of reinforced concrete frames using anti-seismic hysteretic devices for the Lorca earthquake (2011). *International Journal of Protective Structures*, 15(4), 964-987. <https://doi.org/10.1177/20414196241233755>
- Fabian, L. (2023). *Análisis de efectos de disipadores histeréticos BRB en respuestas sísmicas en edificación en Jr. Paruro N°.1037, Lima-2023*. [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/139395>
- Gallardo, E. (2017). Metodología de Investigación: Manual Autoformativo interactivo. *Editorial Universidad Continental*. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/4278>
- Goñi, W., Maquin, N., Rodríguez, J., y Moran, Y. (2019). Analysis of Constructive Errors in masonry confined in Highly Seismic Countries and Reinforcement of Walls with

- Galvanized Mesh. *Revista MATEC Web of Conferences*, 303(2), 1-6.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201930304001>
- Goulet, C., Kishida, T., Ancheta, T., Cramer, C., Darragh, R., Silva, W., Hashash, Y., Harmon, J., Parker, G., Stewart, J., y Youngs, R. (2021). PEER NGA - East database. *Earthquake Spectra*, 37(S1), 1331–1353.
<https://doi.org/10.1177/87552930211015695>
- Guerrero, D. y Maza, G. (2020). Análisis no lineal de estructuras regulares de acero con pórticos especiales resistentes a momento utilizando OpenSees y Ceinci-Lab. *Revista Green World Journal*, 5(5), 1-23. <https://doi.org/10.53313/gwj51013>
- Guerrero, H. (2020). *Diseño de estructuras equipadas con amortiguadores histeréticos*. Recuperado de <https://www.dampo.com.mx/wp-content/uploads/2024/06/ISC-Diseno-de-estructuras-equipadas-con-disipadores-histereticos.pdf>
- Guo, N., y Chen, H. (2022). Comprehensive evaluation and obstacle factor analysis of high quality development of rural e commerce in China. *Sustainability*, 14(22), 14987.
<https://doi.org/10.3390/su142214987>
- Harikrishnan, B., y Gupta, V. (2020). Scaling of residual displacements in terms of elastic and inelastic spectral displacements for existing SDOF systems. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, 19(4), 811–823.
<https://doi.org/10.1007/s11803-020-0587-z>
- Huff, T. (2020). Importance of target spectrum basis in earthquake ground motion scaling. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*, 25(1).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000461](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000461)
- Hunter, J. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Revista Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90-95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

- Huras, L., Bońkowski, P., Nalepka, M., Kokot, S. y Zembaty, Z. (2018). Numerical analysis of monitoring of plastic hinge formation in frames under seismic excitations. *Journal of Measurements in Engineering*, 6(4), 234–243.
<https://doi.org/10.21595/jme.2018.20410>
- Hurtado C. y Riveros V. (2023). *Simulación computacional de datos y aplicaciones en estadística*. Editorial Roselia Morillo.
<https://produccioncientificaluz.org/index.php/omnia/article/view/40581>
- Koketsu, K. y Furumura, T. (1999). Imaging earthquake fault rupture and simulating seismic ground motion. *Revista Geophysics*, 18(12), 1414-1416.
<https://doi.org/10.1190/1.1438238>
- Lin, L., Wen, R., Zhou, B. y Shi, D. (2012). Study on Strong Motion Records Database and Selection Methods. *Applied Mechanics and Materials*, 256(259), 2117–2121.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.2117>
- López, W. (2018). *Revisión sistemática: comportamiento estructural considerando la interacción suelo-estructura de una edificación*. Universidad Privada del Norte
<https://hdl.handle.net/11537/21000>
- Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *CienciAmérica*, 3(1), 47–50.
<https://cienciamerica.edu.ec/index.php/uti/article/view/30>
- McKenna, F. (2011). OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation. *Revista Computing in Science & Engineering*, 13(4), 58-66.
<https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>
- 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., Cotrado D. y Tichahuanca, J. (2020). Frecuencias y períodos predominantes de sismos registrados en la ciudad de Tacna, medio análisis y espectro de Fourier. *Revista Ingeniería Investiga*, 2(1), 160-175. <https://doi.org/10.47796/ing.v2i01.288>
- Muñoz, A. (2020). *Comentarios a la Norma E.030 Diseño Sismorresistente*. [Archivo PDF] https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1129512/COMENTARIOS_A_LA_NORMA_PERUANA_E.030_DISE%C3%91O_SISMORRESISTENTE.pdf
- Orocollo, H. (2024). *Análisis comparativo del comportamiento sísmico de disipadores histeréticos SLB, TADAS y disipadores sísmicos de fluido-viscoso aplicados en la infraestructura de la Universidad Tecnológica del Perú de Tacna – 2024*. [Tesis de Maestría, Universidad Privada de Tacna]. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/3717>
- Peralta, M. (2012). *Análisis Estático No Lineal y Análisis Dinámico No Lineal del Hospital de Vielha*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://hdl.handle.net/2099.1/17872>
- Pimiento, J., Salas, A. y Ruiz, D. (2014). Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(3), 283-198. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300005>
- Riofrío, J. (2024). *Inclusión de los efectos de sismo de fuente cercana en la norma de diseño sismorresistente peruana*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <https://hdl.handle.net/20.500.12404/28946>
- Ruiz-García, J., y Miranda, E. (2006). Residual displacement ratios for assessment of existing structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(3), 315–336. <https://doi.org/10.1002/EQE.523>

- Saldaña, K. y Scaletti, H. (2022). Eficiencia de los disipadores de energía en la respuesta sísmica de los edificios. *Revista Tecnica*, 32(2), 127–137.
<https://doi.org/10.21754/tecnia.v32i2.1379>
- Salas, M. (2021). *Comparación de la respuesta estructural de una edificación utilizando espectros de diseño probabilísticos y espectros de la normativa vigente para la ciudad de Cajamarca*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio UNC. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/4523>
- Santos, D., Pallares, F. y Muñoz, P. (2011). Vulnerability of reinforced concrete frames using anti-seismic hysteretic devices for the Lorca earthquake. *Revista International Journal of Protective Structures*, 15(4), 964-987.
<https://doi.org/10.1177/20414196241233755>
- Tavera, H. (2020). Terremotos vs. sismos: frases y reflexiones para recordar. *Instituto Geofísico del Perú*. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4851>
- Tejada, R. (2022). *Automatización del análisis sísmico con Python y OpenSeesPy*. [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://hdl.handle.net/10757/669963>
- Tena, A. y Gama, A. (2017). Determinación de parámetros de diseño sísmico para marcos dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía hysteréticos. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, 14(1), 36-58.
<http://dx.doi.org/10.5335/rsace.v14i1.6496>
- Terrenzi, M., Spacone, E., y Camata, G. (2020). Comparison between phenomenological and fiber-section non-linear models. *Frontiers in Built Environment*, 6(38).
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00038>

UpCommons. (2023). Cálculo de estructuras frente a sismo con ETABS [Trabajo académico, Universitat Politècnica de Catalunya].

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28501/MIS57.pdf>

Upadhyay, A. (s.f.). Vfo - Visualization for OpenSees [Imagen]. vfo.readthedocs.io.

<https://vfo.readthedocs.io>

Velasco, L., Guerrero, H. y Hospitaler, A. (2025). Seismic optimization of buckling restrained brace mid rise frames by metaheuristics and machine learning surrogate models. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 68(62).

<https://doi.org/10.1007/s00158-025-04000-3>

Xiao, S., Xu, L., y Li, Z. (2019). Seismic performance and damage analysis of RC frame–core tube building with self-centering braces. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.029>

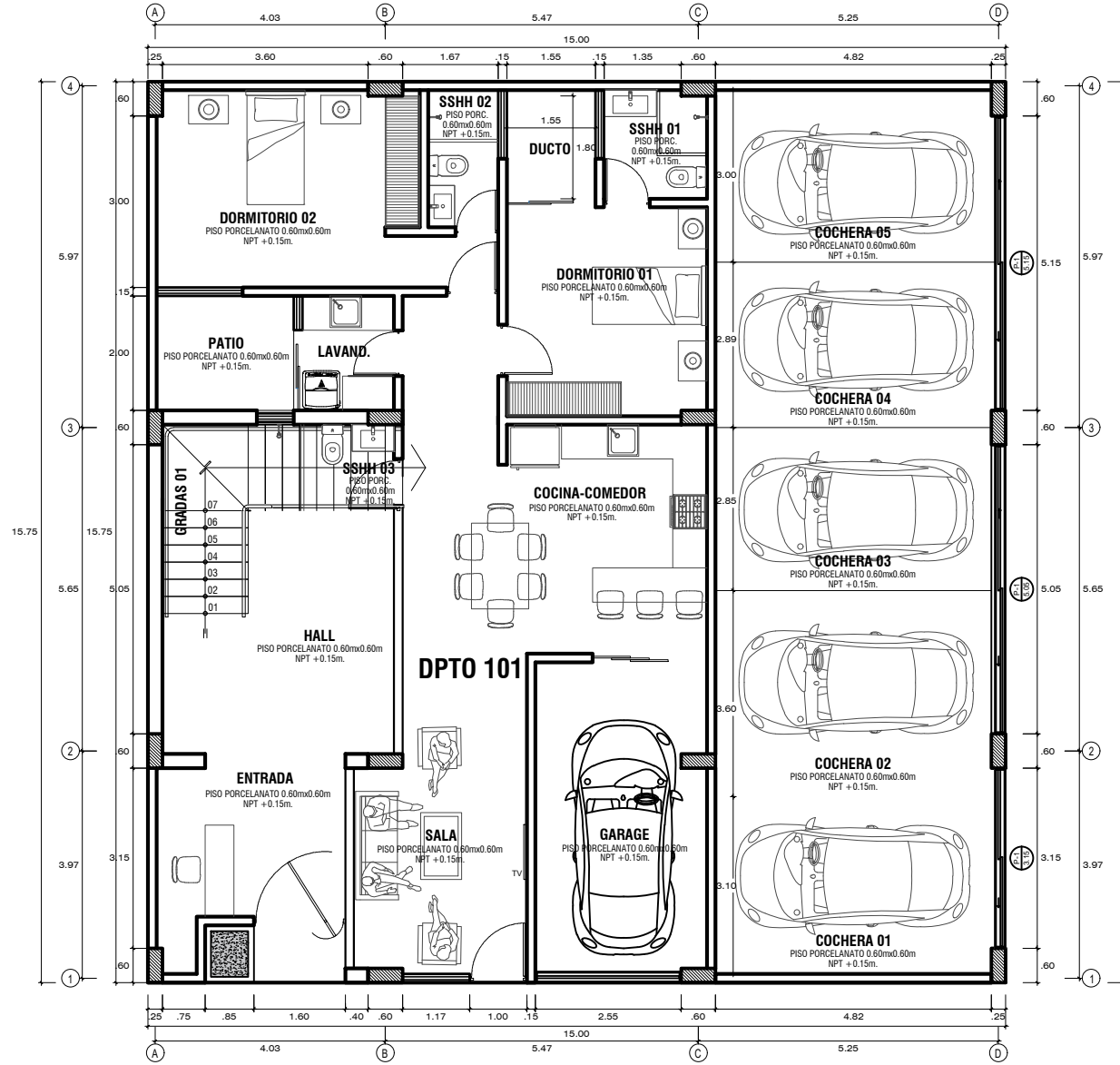
Zehro, K., y Jkhsi, S. (2020). Evaluation of plastic hinges performance and the elastic stiffness factor of moment resisting frame structures. *International Journal of Advanced Engineering, Sciences and Applications*, 1(3), 10–17.

<https://doi.org/10.47346/ijaesa.v1i3.30>

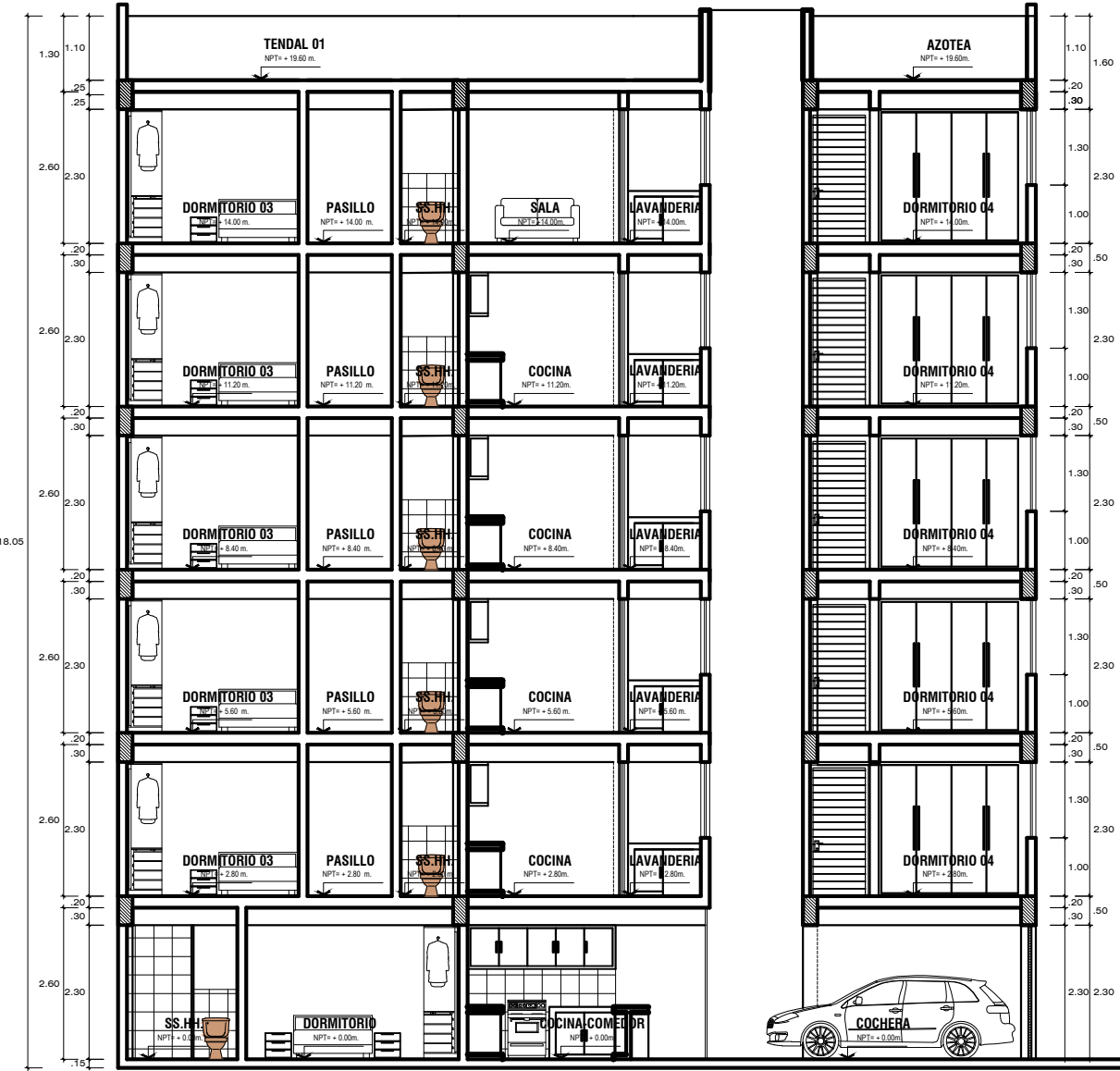
Anexos**ANEXO A:****MATRIZ DE CONSISTENCIA**

ANEXO B:

PLANOS DE LA EDIFICACIÓN



PLANO DE PLANTA TÍPICA
VIVIENDA MULTIFAMILIAR ESC 1:120



PLANO DE ELEVACIÓN
VIVIENDA MULTIFAMILIAR ESC 1:120



PROYECTO:
"EDIFICACIÓN MULTIFAMILIAR DE 6 NIVELES - TACNA"

ESPECIALIDAD:
ARQUITECTURA

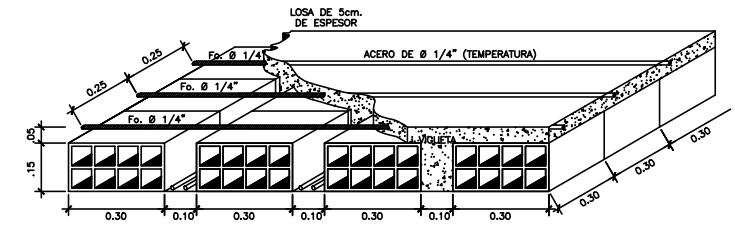
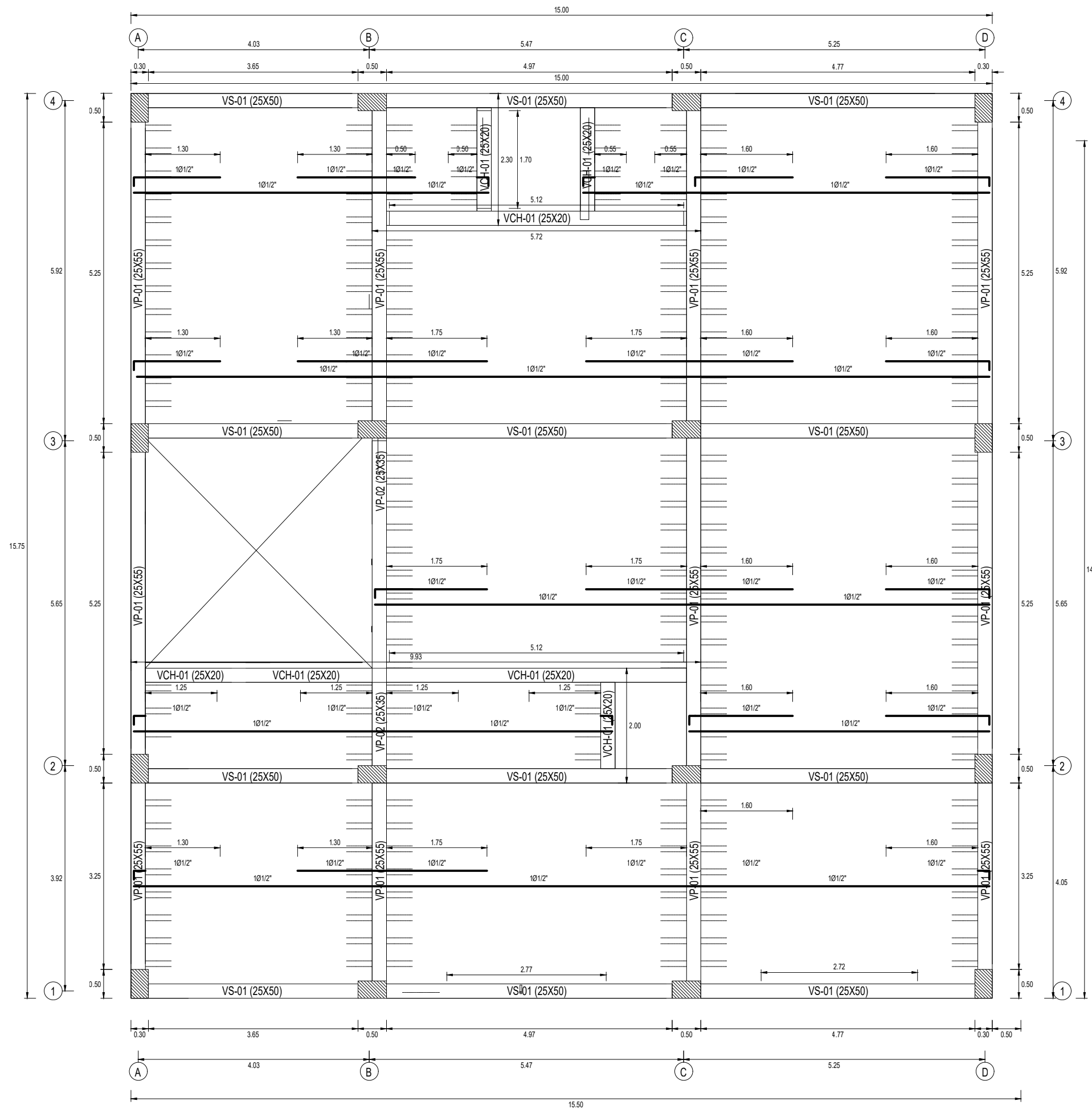
PLANO:
- PLANTA
- ELEVACIÓN

ESC. INICIADA: JULIO - 2024

DESARROLLO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

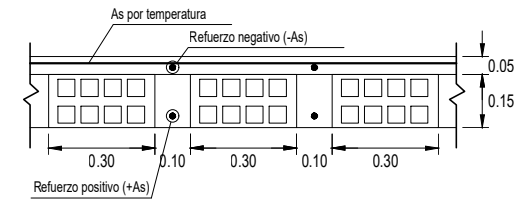
ALUMNOS RESPONSABLES:
- Est. LUIS ANIBAL MUSAJA CHIRA
- Est. RONNY COAQUIRA HUANCA

SEÑALACIONES:



CORTE TÍPICO DEL ALIGERADO H = 0.20

DETALLE DE LOSA ALIGERADA
ESC: 1/15



CUADRO DE VIGAS Y VIGUETAS
ESC: 1/25

ZONA	TIPO	VP-01	VS-01	VT-01
Nivel 1	Sección	25 x 55	25 x 50	25 x 35
	As Continuo	4 Ø5/8" + 2 Ø1/2"	4 Ø5/8" + 2 Ø3/8"	4 Ø5/8"
Estribo	Sección	VP 25x55	VS 25x50	VT 25x35
	Reinforcement	1 Ø3/8" @ 0.05, 11 ØØ 10, Rto @ 0.20	1 Ø3/8" @ 0.05, 7 ØØ 10, Rto @ 0.15	1 Ø3/8" @ 0.05, 10 ØØ 10, Rto @ 0.20

CUADRO DE COLUMNAS GENERALES
ESC: 1/40

ZONA	TIPO	C-01
Nivel 1 y 2	Sección	0.25 x 0.60
	As	12 Ø 5/8"
Estribo	Sección	2 Ø 3/8" + 1 ØØ 0.05 + 3 ØØ 10, Rto @ 0.25
	Reinforcement	

Ø	f (cm)	12Øb (cm)	Total (cm)
3/8"	3	5	3
1/2"	4	8	12
5/8"	5	10	15
3/4"	6	12	18
1"	8	16	24

ANEXO C:

**CÓDIGO DEL ESPECTRO DE
DIRECCIÓN MÁXIMA EN
OPENSEESPY**

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Leer archivo con dos columnas: H1 y H2
datos = np.loadtxt('sismo12.txt') # Cambia el nombre si es distinto
h1 = datos[:, 0] # Columna 1
h2 = datos[:, 1] # Columna 2

# 2. Inicializar variables
theta_degs = np.arange(0, 181, 1) # Ángulos de 0° a 180°
max_abs_per_angle = [] # Lista para guardar los máximos por ángulo
max_ace = -np.inf
best_angle = 0
A_rot_best = None

# 3. Calcular aceleraciones rotadas para cada ángulo
for theta_deg in theta_degs:
    theta_rad = np.radians(theta_deg)

    # Proyección en dirección θ
    A_rot = h1 * np.cos(theta_rad) + h2 * np.sin(theta_rad)
    current_max = np.max(np.abs(A_rot))
    max_abs_per_angle.append(current_max)

    # Verificar si es el máximo global
    if current_max > max_ace:
        max_ace = current_max
        best_angle = theta_deg
        A_rot_best = A_rot.copy()

# 4. Mostrar resultados
print(f"Ángulo de máxima aceleración: {best_angle} grados")
print(f"Valor máximo de aceleración rotada: {max_ace:.5f} g")

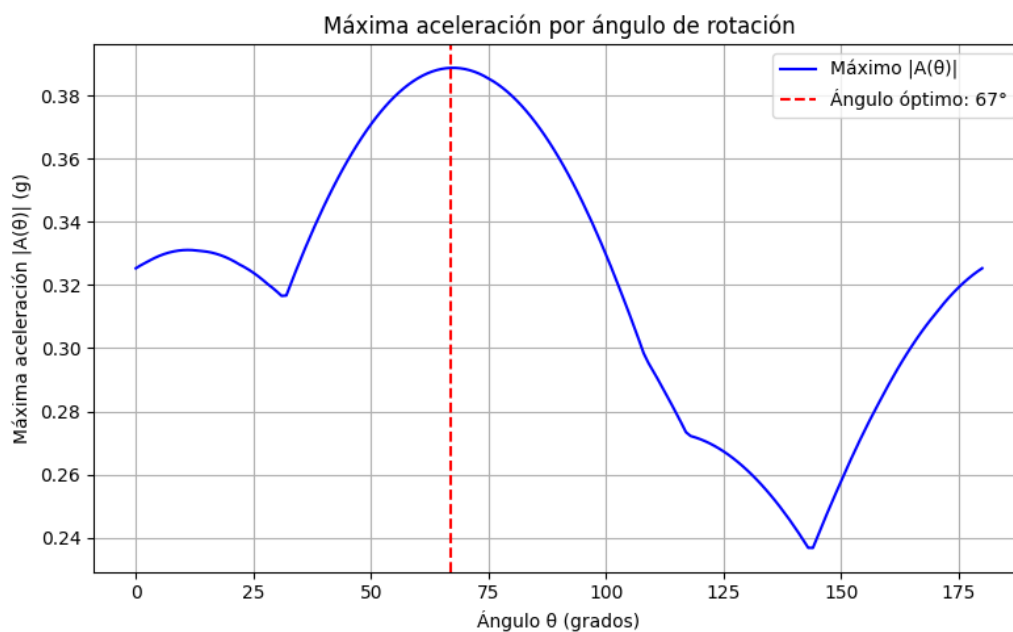
# 5. Guardar datos
np.savetxt('aceleracion_rotada_max.txt', A_rot_best)
with open('resultado_maximo.txt', 'w') as f:
    f.write(f"Ángulo de máxima aceleración: {best_angle} grados\n")
    f.write(f"Máxima aceleración (valor absoluto): {max_ace:.5f} g\n")

# 6. Guardar lista de máximos por ángulo
with open('maximos_por_angulo.txt', 'w') as f:
    for angle, value in zip(theta_degs, max_abs_per_angle):
        f.write(f"{angle}\t{value:.5f}\n")

# 7. Graficar Amax vs θ
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(theta_degs, max_abs_per_angle, label='Máximo |A(θ)|', color='blue')
plt.axvline(best_angle, color='red', linestyle='--', label=f'Ángulo óptimo: {best_angle}°')
plt.xlabel('Ángulo θ (grados)')
plt.ylabel('Máxima aceleración |A(θ)| (g)')
plt.title('Máxima aceleración por ángulo de rotación')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig('grafico_maximos_por_angulo.png', dpi=300)
plt.show()

```

ángulo de máxima aceleración: 67 grados
valor máximo de aceleración rotada: 0.38875 g



ANEXO D:

CÓDIGO DEL MODELO EN

OPENSEESPY

CODIGO DE LA TESIS.ipynb +

+ 🔍 📄 ▶ ⏪ ⏩ Code ▾

INICIO

```
[35]: 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. Mpa, N, mm
ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 3, '-ndf', 6)
```

NODOS, RESTRICCIONES DE NODOS, DIAFRAGMAS

```
[36]: nodos = np.loadtxt('nodosfinal.txt', delimiter = ',')
num_nodos = len(nodos)
for i in range(len(nodos)):
    ops.node(i+1, nodos[i, 1], nodos[i, 2], nodos[i, 3])
# Nodos Maestros
ops.node(113, 7850.00, 7350.00, 2600.00)
ops.node(114, 7850.00, 7350.00, 5200.00)
ops.node(115, 7850.00, 7350.00, 7800.00)
ops.node(116, 7850.00, 7350.00, 10400.00)
ops.node(117, 7850.00, 7350.00, 13000.00)
ops.node(118, 7850.00, 7350.00, 15600.00)
## Empotrar 16 nudos de base y las demas con 3 GDL
for i in range(len(nodos) + 6):
    if i <= 16:
        ops.fix(i+1, 1, 1, 1, 1, 1)
    else:
        ops.fix(i+1, 0, 0, 1, 1, 0)
# Diafragma Rigido GDL 2 es normal al plano del diafragma
# rigidDiaphragm GDL 2 | Nudo maestro | Nodos enlazadas
ops.rigidDiaphragm(3, 113, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32)
ops.rigidDiaphragm(3, 114, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48)
ops.rigidDiaphragm(3, 115, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64)
ops.rigidDiaphragm(3, 116, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80)
ops.rigidDiaphragm(3, 117, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96)
ops.rigidDiaphragm(3, 118, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112)

# Nodos Disipador
nodosDisip = np.loadtxt('nodosferchi.txt', delimiter = ',')
for i in range(len(nodosDisip)):
    ops.node(i+119, nodosDisip[i, 1], nodosDisip[i, 2], nodosDisip[i, 3])
```

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Cargar nodos y elementos
nodos_estructura = np.loadtxt('nodosfinal.txt', delimiter=',')
elementos_estructura = np.loadtxt('elementor.txt', delimiter=',')

nodos_disip = np.loadtxt('nodosferchi.txt', delimiter=',')
elementos_disip = np.loadtxt('elementosdferchi.txt', delimiter=',')

# Unir todos los nodos en un solo diccionario
coord_nodos = {}

for n in nodos_estructura:
    coord_nodos[int(n[0])] = n[1:4]

for n in nodos_disip:
    coord_nodos[int(n[0])] = n[1:4]

# Crear figura 3D
fig = plt.figure(figsize=(12, 8))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

# Dibujar elementos estructurales (gris)
for e in elementos_estructura:
    ni, nj = int(e[1]), int(e[2])
    try:
        xi, yi, zi = coord_nodos[ni]
        xj, yj, zj = coord_nodos[nj]
        ax.plot([xi, xj], [yi, yj], [zi, zj], color='gray', linewidth=2, label='Estructura')
    except KeyError as err:
        print(f"[Estructura] Nodo no encontrado: {err}")

# Dibujar elementos de disipadores con colores según su orientación
for e in elementos_disip:
    ni, nj = int(e[1]), int(e[2])
    try:
        xi, yi, zi = coord_nodos[ni]
        xj, yj, zj = coord_nodos[nj]
        dx, dy, dz = abs(xj - xi), abs(yj - yi), abs(zj - zi)

        # Tolerancia para detectar dirección predominante
        tol = 1e-6

        if dx > dy and dx > dz:
            color = 'red' # Paralelo al eje X
            label = 'Disipador X'
        elif dy > dx and dy > dz:
            color = 'blue' # Paralelo al eje Y
            label = 'Disipador Y'
        else:
            color = 'purple' # Otro (opcional)
            label = 'Disipador otro eje'

        ax.plot([xi, xj], [yi, yj], [zi, zj], color=color, linewidth=2, label=label)
    except KeyError as err:
        print(f"[Disipador] Nodo no encontrado: {err}")

# Ajustar etiquetas y vista
ax.set_xlabel('X')
ax.set_ylabel('Y')
ax.set_zlabel('Z')
ax.set_title("Modelo 3D: Estructura + Disipadores")

# Eliminar duplicados en leyenda
handles, labels = ax.get_legend_handles_labels()
unique = dict(zip(labels, handles))
ax.legend(unique.values(), unique.keys())

plt.tight_layout()
plt.show()

```

MATERIALES Y SECCIONES FIBRA

```
# DEFINICIÓN DE MATERIALES:
fpc = -20.601 # En MPA = N/mm2
epscc0 = -0.002 # Deformación para f'c (0.002)
Ec = 2*fpc/epscc0
fpcu = 0.85*fpc
epsU = -0.005 # Deformación para la tensión de rotura confinado (conservador)

Fy = 412
Es = 196200
shr = 0.01
# uniaxialMaterial('Concrete02', matTag, fpc, epscc0, fpcu, epsU, Lambda, ft, Ets)
ops.uniaxialMaterial('Concrete02', 1, fpc, epscc0, fpcu, epsU, 0.3, 2.83, 0.04*fpc/(2.0*fpc/Ec))
# uniaxialMaterial('Steel01', matTag, Fy, E0, b)
ops.uniaxialMaterial('Steel01', 2, Fy, Es, shr)

G = 8945.83; J1 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ1 = G*J1
# section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 1, '-GJ', GJ1)
# patch('rect', matTag, numSubdivY, numSubdivZ, *crdsI, *crdsJ)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -250], *[150, 250])
# layer('straight', matTag, numFiber, areaFiber, *start, *end)
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[-100, -200], *[-100, 200])
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[100, -200], *[100, 200])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -200], *[0, 200])
```

```
G = 8945.83; J2 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ2 = G*J2
ops.section('Fiber', 2, '-GJ', GJ2)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-250, -150], *[250, 150])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-200, -100], *[-200, 100])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[200, -100], *[200, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-100, -100], *[-100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[100, -100], *[100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -100], *[0, 100])

G = 8945.83; J3 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ3 = G*J3
# section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 3, '-GJ', GJ3)
# patch('rect', matTag, numSubdivY, numSubdivZ, *crdsI, *crdsJ)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -250], *[150, 250])
# layer('straight', matTag, numFiber, areaFiber, *start, *end)
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[-100, -200], *[-100, 200])
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[100, -200], *[100, 200])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -200], *[0, 200])

G = 8945.83; J4 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ4 = G*J4
ops.section('Fiber', 4, '-GJ', GJ4)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-250, -150], *[250, 150])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-200, -100], *[-200, 100])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[200, -100], *[200, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-100, -100], *[-100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[100, -100], *[100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -100], *[0, 100])
```

```

G = 8945.83; J5 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ5 = G*J5
# section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 5, '-GJ', GJ5)
# patch('rect', matTag, numSubdivY, numSubdivZ, *crdsI, *crdsJ)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -250], *[150, 250])
# Layer('straight', matTag, numFiber, areaFiber, *start, *end)
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[-100, -200], *[-100, 200])
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[100, -200], *[100, 200])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -200], *[0, 200])

G = 8945.83; J6 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ6 = G*J6
ops.section('Fiber', 6, '-GJ', GJ6)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-250, -150], *[250, 150])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-200, -100], *[-200, 100])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[200, -100], *[200, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-100, -100], *[-100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[100, -100], *[100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -100], *[0, 100])

# Viga Principal
G = 8945.83; J7 = 2.047e9; # N/mm2; mm4
GJ7 = G*J7
ops.section('Fiber', 7, '-GJ', GJ7)
#Concreto
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -275], *[125, 275])
# Acero Superior
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, 225], *[75, 225]) #5/8
ops.layer('straight', 2, 1, 127, *[0, 225], *[0, 225]) #1/2
ops.layer('straight', 2, 2, 71, *[-75, 150], *[75, 150]) #3/8
# Acero Inferior
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, -225], *[75, -225])
ops.layer('straight', 2, 1, 127, *[0, -225], *[0, -225])
ops.layer('straight', 2, 2, 71, *[-75, -150], *[75, -150])

# Viga Secundaria
G = 8945.83; J8 = 1.788e9; # N/mm2; mm4
GJ8 = G*J8
ops.section('Fiber', 8, '-GJ', GJ8)
#Concreto
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -250], *[125, 250])
# Acero Superior
ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-75, 200], *[75, 200])
ops.layer('straight', 2, 1, 71, *[0, 200], *[0, 200])
# Acero Inferior
ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-75, -200], *[75, -200])
ops.layer('straight', 2, 1, 71, *[0, -200], *[0, -200])

# Viga Roof
G = 8945.83; J9 = 1.020e9; # N/mm2; mm4
GJ9 = G*J9
ops.section('Fiber', 9, '-GJ', GJ9)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -175], *[125, 175])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, 125], *[75, 125])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, -125], *[75, -125])

```

```

G = 8945.83; J5 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ5 = G*J5
# section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 5, '-GJ', GJ5)
# patch('rect', matTag, numSubdivV, numSubdivZ, *crdsI, *crdsJ)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -250], *[150, 250])
# Layer('straight', matTag, numFiber, areaFiber, *start, *end)
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[-100, -200], *[-100, 200])
ops.layer('straight', 2, 5, 200, *[100, -200], *[100, 200])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -200], *[0, 200])

G = 8945.83; J6 = 2.817e9; # N/mm2; mm4
GJ6 = G*J6
ops.section('Fiber', 6, '-GJ', GJ6)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-250, -150], *[250, 150])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-200, -100], *[-200, 100])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[200, -100], *[200, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-100, -100], *[-100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[100, -100], *[100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -100], *[0, 100])

# Viga Principal
G = 8945.83; J7 = 2.847e9; # N/mm2; mm4
GJ7 = G*J7
ops.section('Fiber', 7, '-GJ', GJ7)
#Concreto
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -275], *[125, 275])
# Acero Superior
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, 225], *[75, 225]) #5/8
ops.layer('straight', 2, 1, 127, *[0, 225], *[0, 225]) #1/2
ops.layer('straight', 2, 2, 71, *[-75, 150], *[75, 150]) #3/8
# Acero Inferior
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, -225], *[75, -225])
ops.layer('straight', 2, 1, 127, *[0, -225], *[0, -225])
ops.layer('straight', 2, 2, 71, *[-75, -150], *[75, -150])

# Viga Secundaria
G = 8945.83; J8 = 1.788e9; # N/mm2; mm4
GJ8 = G*J8
ops.section('Fiber', 8, '-GJ', GJ8)
#Concreto
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -250], *[125, 250])
# Acero Superior
ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-75, 200], *[75, 200])
ops.layer('straight', 2, 1, 71, *[0, 200], *[0, 200])
# Acero Inferior
ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-75, -200], *[75, -200])
ops.layer('straight', 2, 1, 71, *[0, -200], *[0, -200])

# Viga Roof
G = 8945.83; J9 = 1.020e9; # N/mm2; mm4
GJ9 = G*J9
ops.section('Fiber', 9, '-GJ', GJ9)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -175], *[125, 175])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, 125], *[75, 125])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-75, -125], *[75, -125])

```

```

Iy1=1.125e9
Iz1=3.125e9
Iy2=3.125e9
Iz2=1.125e9
Jx1=2.817e9

# Secciones Elásticas
# section('Elastic', secTag, E_mod, A, Iz, Iy, G_mod, Jxx, alphaY=None, alphaZ=None)
ops.section('Elastic', 11, Ec, 150000, Iz2, Iy2, 8945.83, Jx1)
ops.section('Elastic', 12, Ec, 150000, Iz1, Iy1, 8945.83, Jx1)
ops.section('Elastic', 13, Ec, 150000, Iz2, Iy2, 8945.83, Jx1)
ops.section('Elastic', 14, Ec, 150000, Iz1, Iy1, 8945.83, Jx1)
ops.section('Elastic', 15, Ec, 150000, Iz2, Iy2, 8945.83, Jx1)
ops.section('Elastic', 16, Ec, 150000, Iz1, Iy1, 8945.83, Jx1)
ops.section('Elastic', 17, Ec, 137500, 7.161e8, 3.466e9, 8945.83, 2.047e9) # Viga P
ops.section('Elastic', 18, Ec, 125000, 6.510e8, 2.604e8, 8945.83, 1.788e9) # Viga S
ops.section('Elastic', 19, Ec, 87500, 4.557e8, 8.932e8, 8945.83, 1.020e9) # Viga Roof

FyCRP, EsCRP = 345, 180000
# Define Materiales Disipador
# ops.uniaxialMaterial('SteelMPF', matTag, fyp, fyn, E0, bp, bn, *params, a1=0.0, a2=1.0, a3=0.0, a4=1.0)
ops.uniaxialMaterial('SteelMPF', 3, FyCRP, 1.15*FyCRP, EsCRP, 0.006, 0.006, 25.0, 0.89, 0.16, 0.1, 1, 0.1, 1)
ops.uniaxialMaterial('Fatigue', 4, 3)
a1n, b1n, a1c, b1c = 35, 45, 35, 70 # Lados del nucleo; Lados de conexión disipador 1
a2n, b2n, a2c, b2c = 30, 40, 30, 75
a3n, b3n, a3c, b3c = 30, 40, 30, 65
a4n, b4n, a4c, b4c = 30, 40, 30, 60
a5n, b5n, a5c, b5c = 30, 35, 30, 50
a6n, b6n, a6c, b6c = 25, 40, 25, 55

# G CRP, J nucleo, J conexión
Gs, J1n, J1c, J2n, J2c, J3n, J3c = EsCRP/2.4, 3.38e5, 6.87e5, 1.94e5, 5.05e5, 1.94e5, 4.16e5
J4n, J4c, J5n, J5c, J6n, J6c = 1.94e5, 3.70e5, 1.53e5, 2.82e5, 1.27e5, 2.05e5

# Nucleo Disip
GJ1n = Gs*J1n
ops.section('Fiber', 20, '-GJ', GJ1n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a1n/2, -b1n/2], *[a1n/2, b1n/2])
GJ2n = Gs*J2n
ops.section('Fiber', 21, '-GJ', GJ2n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a2n/2, -b2n/2], *[a2n/2, b2n/2])
GJ3n = Gs*J3n
ops.section('Fiber', 22, '-GJ', GJ3n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a3n/2, -b3n/2], *[a3n/2, b3n/2])
GJ4n = Gs*J4n
ops.section('Fiber', 23, '-GJ', GJ4n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a4n/2, -b4n/2], *[a4n/2, b4n/2])
GJ5n = Gs*J5n
ops.section('Fiber', 24, '-GJ', GJ5n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a5n/2, -b5n/2], *[a5n/2, b5n/2])
GJ6n = Gs*J6n
ops.section('Fiber', 25, '-GJ', GJ6n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a6n/2, -b6n/2], *[a6n/2, b6n/2])

# Conexión Disip
GJ1c = Gs*J1c
ops.section('Fiber', 26, '-GJ', GJ1c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a1c/2, -b1c/2], *[a1c/2, b1c/2])
GJ2c = Gs*J2c
ops.section('Fiber', 27, '-GJ', GJ2c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a2c/2, -b2c/2], *[a2c/2, b2c/2])
GJ3c = Gs*J3c
ops.section('Fiber', 28, '-GJ', GJ3c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a3c/2, -b3c/2], *[a3c/2, b3c/2])
GJ4c = Gs*J4c
ops.section('Fiber', 29, '-GJ', GJ4c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a4c/2, -b4c/2], *[a4c/2, b4c/2])
GJ5c = Gs*J5c
ops.section('Fiber', 30, '-GJ', GJ5c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a5c/2, -b5c/2], *[a5c/2, b5c/2])
GJ6c = Gs*J6c
ops.section('Fiber', 31, '-GJ', GJ6c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a6c/2, -b6c/2], *[a6c/2, b6c/2])

```

ELEMENTOS

```
[6]: elementos = np.loadtxt('elementor.txt', delimiter = ',')
num_elementos = len(elementos)

# beamIntegration('HingeRadau', tag, secI, lpI(d/2), secJ, lpJ, secE(seccion central))
ops.beamIntegration('HingeRadau', 1, 1, 200, 1, 200, 11)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 2, 2, 200, 2, 200, 12)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 3, 3, 200, 3, 200, 13)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 4, 4, 250, 4, 250, 14)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 5, 5, 250, 5, 250, 15)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 6, 6, 250, 6, 250, 16)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 7, 7, 250, 7, 250, 17)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 8, 8, 250, 8, 250, 18)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 10, 10, 250, 10, 250, 19)

# ops.beamIntegration('Lobatto', Tag, SeccionTag, nPC); para dirip
ops.beamIntegration('Lobatto', 11, 11, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 12, 12, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 13, 13, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 14, 14, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 15, 15, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 16, 16, 5)

ops.beamIntegration('Lobatto', 17, 17, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 18, 18, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 19, 19, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 20, 20, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 21, 21, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 22, 22, 5)

# Elementos Est. Principal
for i in range(1, num_elementos + 1):
    if i <= 32:
        if i == [2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 22, 23, 26, 27, 30, 31]:
            #Columnas centrales nivel 1 y 2 # Columna Horizontal
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 2)
        else:
            #Columnas Perimetrales nivel 1 y 2 # Columnas Verticales
            # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transflag, integrationTag,
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 1)

    if 32 < i and i <= 64 :
        if i == [34, 35, 38, 39, 42, 43, 46, 47, 50, 51, 54, 55, 58, 59, 62, 63]:
            #Columnas centrales nivel 3 y 4 # Columna Horizontal
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 4)
        else:
            #Columnas Perimetrales nivel 3 y 4 # Columnas Verticales
            # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transflag, integrationTag,
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 3)

    if 64 < i and i <= 96 :
        if i == [66, 67, 70, 71, 74, 75, 78, 79, 82, 83, 86, 87, 90, 91, 94, 95]:
            #Columnas centrales nivel 5 y 6 # Columna Horizontal
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 6)
        else:
            #Columnas Perimetrales nivel 5 y 6 # Columnas Verticales
            # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transflag, integrationTag,
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 5)

    if 96 < i and i <= 168 :
        if i == [157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168]:
            # viga Horizontal Roof nivel 6
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 102, 6)
        else:
            #Viga Horizontal nivel 1 2 3 4 5
            # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transflag, integrationTag,
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 102, 5)
```

```

if 168 <= i and i <= 240 :
  if i == [229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240]:
    # viga Vertical Roof nivel 6
    ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 102, 6)
  else:
    #Viga Vertical nivel 1 2 3 4 5
    # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transfTag, integrationTag,
    ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 102, 3)

# Elementos Est. Disip
elmtDisip = np.loadtxt('elementosdferchi.txt', delimiter = ',')
for i in range(len(elmtDisip)):

  # Las conexiones

  # Disipadores Primer nivel
  if i <= 16:
    # ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, secTag, transfTag)
    ops.element('forceBeamColumn', 5000+i, int(elmtDisip[i-1, 1]), int(elmtDisip[i-1, 2]), 101, 17, '-mass', 7.79e-05*a1c*b1c/9810)

  # Disipadores Segundo nivel
  elif i <= 32:
    # ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, secTag, transfTag)
    ops.element('forceBeamColumn', 5000+i, int(elmtDisip[i-1, 1]), int(elmtDisip[i-1, 2]), 101, 18, '-mass', 7.79e-05*a2c*b2c/9810)

  # Disipadores Tercer nivel
  elif i <= 48:
    # ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, secTag, transfTag)
    ops.element('forceBeamColumn', 5000+i, int(elmtDisip[i-1, 1]), int(elmtDisip[i-1, 2]), 101, 19, '-mass', 7.79e-05*a3c*b3c/9810)

  # Disipadores Cuarto nivel
  elif i <= 64:
    # ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, secTag, transfTag)
    ops.element('forceBeamColumn', 5000+i, int(elmtDisip[i-1, 1]), int(elmtDisip[i-1, 2]), 101, 20, '-mass', 7.79e-05*a4c*b4c/9810)

  # Disipadores Quinto nivel
  elif i <= 80:
    # ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, secTag, transfTag)
    ops.element('forceBeamColumn', 5000+i, int(elmtDisip[i-1, 1]), int(elmtDisip[i-1, 2]), 101, 21, '-mass', 7.79e-05*a5c*b5c/9810)

  # Disipadores Sexto nivel
  elif i <= 96:
    # ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, secTag, transfTag)
    ops.element('forceBeamColumn', 5000+i, int(elmtDisip[i-1, 1]), int(elmtDisip[i-1, 2]), 101, 22, '-mass', 7.79e-05*a6c*b6c/9810)

# ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, secTag, transfTag)

# Uniones de Nucleos

elif 97 <= i <= 144:
  ops.element('forceBeamColumn', 500+i, int(elmtDisip[i-1, 1]), int(elmtDisip[i-1, 2]), 101, 21, '-mass', 7.79e-05*a2c*b2c/9810)

```

CARGAS EN ELEMENTOS

```

# timeSeries/Constraint (no depende ddl tiempo) / tStag / 1 (fact de escala, opcional)
ops.timeSeries('Constant', 1)
# Creando patron de carga
# pattern('Plain', patternTag, tStag, '-fact', fact)
ops.pattern("Plain", 1, 1)
Wx = 3.53 #N/mm
Wz = 2.94
for i in range(len(elementos)):
  if i < 60:
    # eleLoad('-ele', *eleTags, '-range', eleTag1, eleTag2, '-type', '-beamUniform', Wx, <Wz>, Wx=0.0)
    ops.eleLoad('-ele', i+1, '-type', '-beamUniform', 0, 0, Wx)
  else:
    ops.eleLoad('-ele', i+1, '-type', '-beamUniform', 0, Wz, 0)

```

MASAS

```
[8]: # mass(NODE_TAG, masX N s2/mm), masY, masZ, JX, JY, JZ)
Mzero = 1.0e-6;
ops.mass(113, 220.15, 220.15, 220.15, Mzero, Mzero, Mzero, 0.85E+10)
ops.mass(114, 220.15, 220.15, 220.15, Mzero, Mzero, Mzero, 0.85E+10)
ops.mass(115, 220.15, 220.15, 220.15, Mzero, Mzero, Mzero, 0.85E+10)
ops.mass(116, 220.15, 220.15, 220.15, Mzero, Mzero, Mzero, 0.85E+10)
ops.mass(117, 220.15, 220.15, 220.15, Mzero, Mzero, Mzero, 0.85E+10)
ops.mass(118, 200.23, 200.23, 200.23, Mzero, Mzero, Mzero, 0.77E+10)
```

MODAL

```
[9]: nn = 6 # Nro de niveles
N = (3*nn) # Nro de modos
lamba = ops.eigen('-fullGenLapack', N)
lamba = np.array(lamba)
wn = lamba**0.5
Periodo = 2*np.pi/wn
Tn = Periodo

for i in range(N):
    print(f'Modo {i+1}: T = {Periodo[i]:.3f} s')

Modo 1: T = 0.570 s
Modo 2: T = 0.402 s
Modo 3: T = 0.322 s
Modo 4: T = 0.229 s
Modo 5: T = 0.229 s
Modo 6: T = 0.227 s
Modo 7: T = 0.200 s
Modo 8: T = 0.188 s
Modo 9: T = 0.188 s
Modo 10: T = 0.187 s
Modo 11: T = 0.187 s
Modo 12: T = 0.186 s
Modo 13: T = 0.186 s
Modo 14: T = 0.172 s
Modo 15: T = 0.172 s
Modo 16: T = 0.171 s
Modo 17: T = 0.156 s
Modo 18: T = 0.156 s
```

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')
```

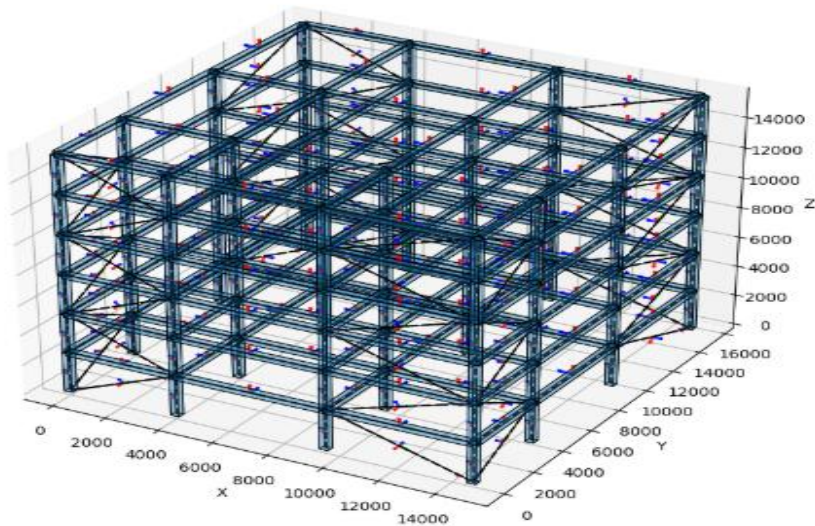
Carga axial aplicada

PLOTEO

```
[11]: # - plot model

fig_wi_he = (30., 20.)

# Crear el diccionario fuera del bucle
cle_shapes = {}
```



ANÁLISIS NO LINEAL DINÁMICO

```

: # Amortiguamiento Rayleigh
zeta = 0.05
# Determinar los coef alpha y beta... resolviendo un sist matricial
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(alphaM, betaK, betaKinit, betaKcomm)
ops.rayleigh(a0, 0, 0, a1)
print(a0, a1)

# Definir la función de aceleración
ops.timeSeries('Path', 2, '-filePath', 'sismo3.txt', '-dt', 0.01, '-factor', (1.04*9810))
# pattern('UniformExcitation', Tag, dir, '-accel', accelSeriesTag, '-vel0', vel0, '-fact', fact)
ops.pattern('UniformExcitation', 2, 1, '-accel', 2, '-factor', 1.0)

ops.wipeAnalysis()
ops.constraints('Transformation')
ops.numberer('RCM')
ops.system('UmPack')
# ops.test('NormDispIncr', Tolerancia, pasos)
ops.test('NormDispIncr', 1e-4, 100)
ops.algorithm('KrylovNewton')
ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25)
ops.analysis('Transient')

t = ops.getTime()
ops.recorder('Node', '-file', 'DespDinDisRoof.out', '-time', '-node', 118, '-dof', 1, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'DesDinDis.out', '-time', '-node', 113, 114, 115, 116, 117, 118, '-dof', 1, 'disp')

dt = 0.01
Acel = np.loadtxt('sismo3.txt')
N_Acel = len(Acel)
Tfinal = (N_Acel*dt)

while t < Tfinal:
    ok = ops.analyze(1, dt)
    if ok != 0:
        print('El análisis Dinámico fallo a los t = ', t)
        break
    t = ops.getTime()
if ok == 0:
    print('Análisis Completado')

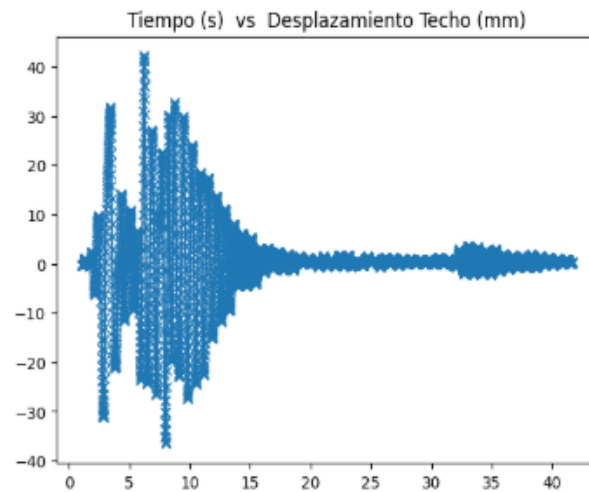
ops.wipeAnalysis()
ops.remove('recorders')

```

GRAFICA RPTA NL DINAMICO

```
[13]: TD = np.loadtxt('DespDinDisRoof.out')
plt.figure()
plt.plot(TD[:,0], TD[:,1], '-x')
plt.title('Tiempo (s) vs Desplazamiento Techo (mm)')
plt.show()

D = np.loadtxt('DesDinDis.out')
DR1 = D[:,1]; DR2 = D[:,2]-D[:,1]; DR3 = D[:,3]-D[:,2];
DR4 = D[:,4]-D[:,3]; DR5 = D[:,5]-D[:,4]; DR6 = D[:,6]-D[:,5];
```



```
[14]: maxDR = round(max(abs(DR1)),2), round(max(abs(DR2)),2), round(max(abs(DR3)),2), round(max(abs(DR4)),2), round(max(abs(DR5)),2), round(max(abs(DR6)),2)
for i in range(6):
    print('Max Dr', i+1, ' = ', maxDR[i], 'mm')

Max Dr 1 = 9.58 mm
Max Dr 2 = 8.95 mm
Max Dr 3 = 8.39 mm
Max Dr 4 = 7.47 mm
Max Dr 5 = 6.05 mm
Max Dr 6 = 3.39 mm
```

```
[15]: # Calcular drifts máximos redondeados
maxDR = (
    round(max(abs(DR1)), 2),
    round(max(abs(DR2)), 2),
    round(max(abs(DR3)), 2),
    round(max(abs(DR4)), 2),
    round(max(abs(DR5)), 2),
    round(max(abs(DR6)), 2)
)

# Dividir cada uno entre 2600
drifts = [round(val / 2600, 6) for val in maxDR]

# Asignar a variables con nombre Drift 1 a Drift 6
Drift_1, Drift_2, Drift_3, Drift_4, Drift_5, Drift_6 = drifts

# Imprimir resultados
for i, drift in enumerate(drifts, start=1):
    print(f'Drift {i} = {drift}')

Drift 1 = 0.003685
Drift 2 = 0.003442
Drift 3 = 0.003227
Drift 4 = 0.002873
Drift 5 = 0.002327
Drift 6 = 0.001304
```