

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

**DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA MEDIANTE ANÁLISIS NO LINEAL  
DINÁMICO EN UNA EDIFICACIÓN DE 4 NIVELES, TACNA 2024**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Luis Gustavo Colque Mamani

Bach. Andrés Diego Catacora Sintecala

Para optar por el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

TACNA-PERÚ

2025

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

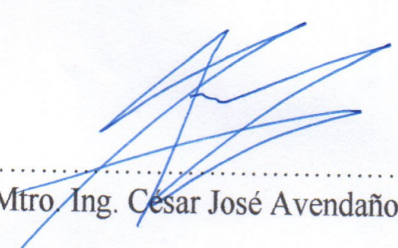
Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

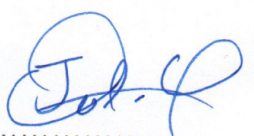
“DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA MEDIANTE ANÁLISIS NO  
LINEAL DINÁMICO EN UNA EDIFICACIÓN DE 4  
NIVELES, TACNA 2024”

Tesis sustentada y aprobada el día 26 de agosto del 2025 estando integrado  
el Jurado Calificador por:

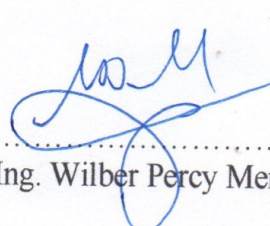
**PRESIDENTE**

  
: .....  
Mtro. Ing. César José Avendaño Jihuallanga

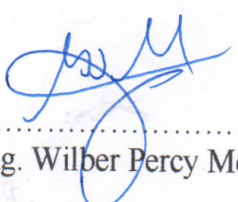
**SECRETARIO**

  
: .....  
Mag. Ing. Julia Cleila Laura Quispe

**VOCAL**

  
: .....  
Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramirez

**ASESOR DE TESIS**

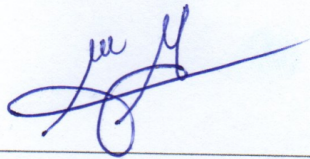
  
: .....  
Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramirez

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Wilber Percy Mendoza Ramírez, en mi condición de ASESOR (A) acreditado con Resolución de Facultad N° 1003-2024-FIAG/UNJBG del 27 de diciembre del 2024, del Trabajo de Tesis titulado: **“DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA MEDIANTE ANÁLISIS NO LINEAL DINÁMICO EN UNA EDIFICACIÓN DE 4 NIVELES, TACNA 2024”**. Presentado por el **Bach. LUIS GUSTAVO COLQUE MAMANI** y el **Bach. ANDRÉS DIEGO CATACTORA SINTECALA**. 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 2 %. 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, 11 de Septiembre del 2025.



FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos: WILBER PERCY MENDOZA RAMIREZ

DNI: 00520705



Huella dactilar



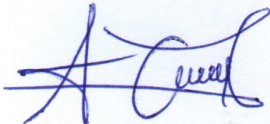
FIRMA AUTOR

Nombres y apellidos: Bach. LUIS GUSTAVO COLQUE MAMANI

DNI: 75049793



Huella dactilar



FIRMA AUTOR

Nombres y apellidos: Bach. ANDRÉS DIEGO CATACTORA SINTECALA

DNI: 74241509



Huella dactilar

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de investigación a:

Mis Padres cuyo amor incondicional, sacrificio y enseñanzas sobre el esfuerzo y la perseverancia han sido la base de cada paso que he dado.

A mis hermanos, por su constante apoyo, e inspiración que me motiva alcanzar mis metas.

A mi familia que no dejo de apoyarme siempre.

A mis amigos, compañeros y docentes quienes estuvieron conmigo en este largo camino, dándome la fuerza para seguir adelante, y aportando a mi crecimiento como persona y profesional.

Y a Dios, por ser mi fortaleza y la fuente de sabiduría que me ayudo a tomar siempre las decisiones difíciles.

Bach. Luis Gustavo Colque Mamani

## **Dedicatoria**

A Dios, por guiarme en escoger, direccionarme en la rama de estructuras asimismo darme la fortaleza y sabiduría para superar cada desafío en este importante logro.

A mi madre Sonia, por ser mi pilar fundamental, por su amor incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

Para Patrick, mi hermano, quien también es ingeniero, me dio a conocer más sobre esta carrera y en el tiempo de la U me compartió sus conocimientos.

Para Gabriella y su madre Nancy, quien siempre estuvo ahí motivándome en los cursos y luego para poder obtener de manera rápida mi tesis.

Para mis pastores, que me motivaron a realizar mi tesis y por sus enseñanzas y mucha sabiduría.

Para mis amigos, compañeros y docentes, quienes compartieron conmigo este camino y contribuyeron a mi formación profesional y personal.

Con gratitud infinita, dedico este trabajo a todos ustedes.

Bach. Andrés Diego Catacora Sintecala

## **Agradecimiento**

Expreso mi sincera gratitud a Dios, quien ha sido mi guía y apoyo inquebrantable, la fuente de mi fortaleza, que permitió poder superar cada desafío que se presentó en mi camino.

A mis padres, por su amor incondicional, paciencia, sacrificio y ejemplo, que me enseñaron el verdadero significado del esfuerzo. A mis hermanos y mi familia que me recuerdan que la fortaleza más grande está en la unión. Al Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramírez, mi asesor cuya dedicación, paciencia y conocimientos, han sido fundamentales para la realización de esta investigación.

Finalmente, extiendo mi más sincero agradecimiento a mis amigos y compañeros, por su compañía y respaldo a lo largo de mi etapa como estudiante, así como a todas las personas que de alguna manera u otra me brindaron su apoyo a través de palabras de aliento y consejos valiosos, que me permitieron alcanzar este objetivo.

Bach. Luis Gustavo Colque Mamani

## **Agradecimiento**

A Dios por haberme guiado y bendecido para poder llegar al lugar en donde estoy y también haberme dado vida y salud. También por permitirme culminar con éxito mi carrera de ingeniería civil.

A mi madre Sonia, quien, con su amor incondicional, sacrificio y ejemplo me enseñó el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi hermano, por su apoyo y a mi asesor, Mtro. Ing. Wilber Percy Mendoza Ramírez, cuya paciencia y conocimientos han sido fundamental para lograr mi tesis. Finalmente, extendiendo mi sincero agradecimiento a mis compañeros y amigos, por su compañía y respaldo a lo largo de esta etapa, así como a todas aquellas personas que, de alguna manera, me ofrecieron su apoyo con palabras de ánimo y consejos significativos que me ayudaron a lograr unas de mis metas.

Bach. Andrés Diego Catacora Sintecala

## Índice de contenido

Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	v
Índice de contenido.....	vii
Índice de figuras.....	xii
Índice de tablas .....	xv
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
Introducción .....	1
1. Planteamiento del Problema .....	3
1.1. Formulación del Problema .....	3
1.1.1. Descripción del Problema.....	3
1.1.2. Problema General.....	3
1.1.3. Problemas Específicos .....	4
1.2. Objetivos .....	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Justificación e Importancia.....	4
1.3.1. Justificación de la Investigación .....	4
1.3.2. Importancia de la Investigación.....	5
1.4. Hipótesis.....	6

1.4.1.	Hipótesis Principal .....	6
1.4.2.	Hipótesis Específicas .....	6
2.	Marco Teórico.....	8
2.1.	Antecedentes del Estudio .....	8
2.1.1.	Antecedentes Internacionales.....	8
2.1.2.	Antecedentes Nacionales .....	9
2.1.3.	Antecedentes Locales.....	11
2.2.	Bases Teóricas.....	12
2.2.1.	Respuesta del Análisis Dinámico no Lineal .....	12
2.2.2.	Distribución de Energía Sísmica.....	22
2.3.	Definición de Términos.....	25
3.	Metodología de la Investigación.....	28
3.1.	Tipo y Diseño de investigación.....	28
3.1.1.	Tipo de investigación.....	28
3.1.2.	Diseño de investigación .....	29
3.2.	Población y Muestra.....	29
3.2.1.	Población.....	29
3.2.2.	Muestra .....	30
3.3.	Operacionalización de Variables.....	30
3.3.1.	Identificación de Variables .....	30
3.3.2.	Definición Operacional de las Variables .....	31

3.4.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	32
3.4.1.	Procedimiento .....	32
3.4.2.	Técnicas .....	32
3.4.3.	Instrumentos.....	32
4.	Resultados.....	33
4.1.	Descripción del Trabajo de Campo.....	33
4.1.1.	Área del Terreno y Linderos.....	34
4.2.	Modelamiento y análisis lineal de la Edificación.....	34
4.2.1.	Características de los materiales .....	35
4.2.2.	Cargas Unitarias.....	36
4.2.3.	Configuración Estructural.....	36
4.2.4.	Asignación de cargas .....	38
4.2.5.	Análisis Modal .....	38
4.2.6.	Aceleración espectral.....	39
4.3.	Tratamiento de Registros Sísmicos .....	42
4.3.1.	Extracción de Registros Sísmicos.....	42
4.3.2.	Filtrado y Corrección de los registros sísmicos .....	43
4.3.3.	Definición del Espectro Objetivo Según la Norma E-030.....	44
4.3.4.	Escalamiento de Registros Sísmicos.....	45
4.3.5.	Introducción de los Registros Sísmicos en el OpenSeesPy .....	46
4.4.	Análisis Dinámico no Lineal Tiempo Historia en OpenSeesPy .....	49

4.4.1.	Definición de librerías en Python .....	49
4.4.2.	Introducción de Nodos.....	50
4.4.3.	Asignación de cargas y transformación los elementos .....	54
4.4.4.	Definición de materiales y secciones fibra .....	57
4.4.5.	Definición de los elementos inelásticos y carga .....	60
4.4.6.	Asignación de masas y análisis Modal .....	63
4.4.7.	Carga Axial y ploteo .....	64
4.4.8.	Análisis Dinámico no lineal.....	66
4.4.9.	Gráfico RPTA NL Dinámico y derivas relativas.....	68
4.5.	Comparativa de Análisis Dinámico no Lineal .....	70
4.5.1.	Análisis dinámico no lineal tiempo-historia en SAP 2000 .....	70
4.6.	Resultados finales.....	75
4.6.1.	Resultados de la distribución de energía sísmica.....	76
4.6.2.	Derivas Finales.....	78
5.	Discusión de Resultados .....	80
	Conclusiones .....	83
	Recomendaciones y/o Sugerencias .....	85
	Referencias Bibliográficas .....	87
	Matriz de Consistencia.....	91
	Anexos .....	92
	Anexo A: Código Fuente del Modelo Estructural en OpenSeesPy .....	93

Anexo B: Planos de la Edificación .....	102
Anexo C: Respuesta de la Edificación Frente a los Sismos.....	106
Anexo D: Curvas Histéreticas de la Edificación Frente a los Sismos .....	109

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> <i>Modelo de Hognestad</i> .....	16
<b>Figura 2</b> <i>Modelo Bilineal Elastoplástico</i> .....	17
<b>Figura 3</b> <i>Modelos de Plasticidad</i> .....	18
<b>Figura 4</b> <i>Pórtico con rotulas concentradas tipo fibra</i> .....	19
<b>Figura 5</b> <i>Pórtico con plasticidad distribuida tipo fibra</i> .....	20
<b>Figura 6</b> <i>Modelo Histérico Bilineal</i> .....	22
<b>Figura 7</b> <i>Distribución de fuerzas de corte</i> .....	23
<b>Figura 8</b> <i>Desplazamiento en un pórtico</i> .....	24
<b>Figura 9</b> <i>Energía absorbida en el primer nivel</i> .....	25
<b>Figura 10</b> <i>Ubicación de la edificación de estudio</i> .....	33
<b>Figura 11</b> <i>Modelado en 3D de la edificación en SAP 2000</i> .....	35
<b>Figura 12</b> <i>Ingreso de los parámetros sísmicos al SAP 2000</i> .....	40
<b>Figura 13</b> <i>Deriva máxima del sismo en dirección X</i> .....	41
<b>Figura 14</b> <i>Deriva máxima del sismo en la dirección Y</i> .....	41
<b>Figura 15</b> <i>Registro sísmico de Lima 70</i> .....	43
<b>Figura 16</b> <i>Espectro de la Zona de estudio</i> .....	44
<b>Figura 17</b> <i>Promedio de los 15 espectros extraídos</i> .....	45
<b>Figura 18</b> <i>Registro Escalado de Lima 70</i> .....	46
<b>Figura 19</b> <i>Registros Sísmicos Nacionales escalados</i> .....	47
<b>Figura 20</b> <i>Registros Internacionales escalados</i> .....	48
<b>Figura 21</b> <i>Inserción de librerías y sistema de unidades</i> .....	50

<b>Figura 22</b> <i>Introducción de Nodos y Nodos Maestros</i> .....	51
<b>Figura 23</b> <i>Nodos empotrados en la base de la edificación</i> .....	52
<b>Figura 24</b> <i>Configuración de restricciones en la base de la estructura</i> .....	53
<b>Figura 25</b> <i>Creación de diafragma por cada nivel</i> .....	54
<b>Figura 26</b> <i>Creación de nodos y elementos</i> .....	55
<b>Figura 27</b> <i>Modelo Inicial de la edificación en 3D</i> .....	56
<b>Figura 28</b> <i>Transformación de elementos</i> .....	57
<b>Figura 29</b> <i>Asignación de las propiedades a los materiales</i> .....	57
<b>Figura 30</b> <i>Creación de las secciones de columna</i> .....	58
<b>Figura 31</b> <i>Creación de las secciones de viga</i> .....	59
<b>Figura 32</b> <i>Asignación de propiedades elásticas a los elementos estructurales</i> .....	60
<b>Figura 33</b> <i>Asignación de inelasticidad a secciones</i> .....	61
<b>Figura 34</b> <i>Distribución y definición de elementos</i> .....	61
<b>Figura 35</b> <i>Distribucion y definicion de elementos viga</i> .....	62
<b>Figura 36</b> <i>Asignación de cargas</i> .....	62
<b>Figura 37</b> <i>Asignacion de masa a los nodos maestros</i> .....	63
<b>Figura 38</b> <i>Periodos de vibración de la estructura</i> .....	64
<b>Figura 39</b> <i>Código para el ploteo de la edificación en 3D</i> .....	65
<b>Figura 40</b> <i>Visualización en 3D de la edificación</i> .....	66
<b>Figura 41</b> <i>Código para el análisis no lineal dinámico</i> .....	67
<b>Figura 42</b> <i>Desplazamientos y fuerzas</i> .....	68

<b>Figura 43</b> Código de ploteo de graficas.....	69
<b>Figura 44</b> Curvas Histéreticas del sismo Lima 70 .....	69
<b>Figura 45</b> Respuesta no Lineal del sismo Lima 70 .....	70
<b>Figura 46</b> Asignación de rotulas tipo fibra .....	71
<b>Figura 47</b> Desempeño sísmico de la estructura .....	72
<b>Figura 48</b> Introducción de carga de gravedad para un análisis no lineal .....	73
<b>Figura 49</b> Ingreso del sismo 70 en el SAP 2000 .....	74
<b>Figura 50</b> Respuesta sísmica no lineal del caso Lima 70-SAP 2000 .....	75
<b>Figura 51</b> Respuesta no lineal del caso Lima 70-OpenSeesPy.....	75
<b>Figura 52</b> Distribución de energía en la edificación .....	77
<b>Figura 54</b> Derivas finales después del análisis dinámico no lineal.....	79
<b>Figura 55</b> Derivas finales después del análisis dinámico no lineal.....	79

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Categoría y Regularidad de las Edificaciones</i> .....	14
<b>Tabla 2</b> <i>Caracterización de Variables</i> .....	31
<b>Tabla 3</b> <i>Propiedades del concreto</i> .....	35
<b>Tabla 4</b> <i>Propiedades del acero</i> .....	36
<b>Tabla 5</b> <i>Zonificación de la edificación</i> .....	37
<b>Tabla 6</b> <i>Cargas vivas incorporadas en el modelado</i> .....	38
<b>Tabla 7</b> <i>Periodos y masas participantes</i> .....	39
<b>Tabla 8</b> <i>Parámetros sísmicos</i> .....	39
<b>Tabla 9</b> <i>Registros Sísmicos extraídos del CISMID y del PEER</i> .....	42
<b>Tabla 10</b> <i>Parámetros sísmicos de la zona de estudio</i> .....	44
<b>Tabla 11</b> <i>Energía disipada en la edificación</i> .....	76
<b>Tabla 12</b> <i>Derivas finales por cada caso sísmico</i> .....	78

## Resumen

La investigación realizada tiene como propósito analizar cómo se distribuye la energía sísmica en una edificación de cuatro niveles cuyo sistema estructural está basado en pórticos, ubicada en la ciudad de Tacna, haciendo uso del análisis dinámico no lineal (ADNL) tiempo historia utilizando la librería OpenSeesPy. Para ello, primero se idealizó el comportamiento no lineal tanto para el concreto como del acero mediante el modelo de Hognestad y el modelo Bilineal Elastoplástico respectivamente, luego se modeló la estructura con secciones tipo fibra. A continuación, se aplicaron quince registros sísmicos, tanto nacionales como internacionales, escalados según la norma E.030, con el fin de simular la respuesta estructural realista ante eventos sísmicos severos. Los resultados mostraron que la mayor parte de la energía se concentraron en el primer piso, donde en promedio para todos los casos sísmicos se distribuyó un 56% de toda la energía, también se observaron derivas inter-piso que superan los límites normativos. La metodología implementada permitió identificar zonas críticas e identificar como se distribuye en la estructura, la energía, concluyendo que, aunque el comportamiento global fue aceptable, se requiere atención especial en el diseño y reforzamiento del primer nivel. La investigación valida el uso de OpenSeesPy como una herramienta útil y efectiva en la realización del análisis dinámico no lineal basado en el analisis estructural.

Palabras Claves: ADNL, Distribución de energía, Modelo no lineal, OpenSeesPy, Derivas

## **Abstract**

The purpose of this research is to analyze how seismic energy is distributed in a four-story building with a frame-based structural system located in the city of Tacna. This research uses time-history nonlinear dynamic analysis (NDDA) using the OpenSeesPy library. First, the nonlinear behavior of both concrete and steel was idealized using the Hognestad model and the Bilinear Elastoplastic model, respectively. The structure was then modeled using fiber-like sections. Fifteen national and international seismic records, scaled according to the E.030 standard, were then applied to simulate realistic structural responses to severe seismic events. The results showed that most of the energy was concentrated on the first floor, where, on average, 56% of the total energy was distributed across all seismic cases. Interfloor drifts exceeding regulatory limits were also observed. The implemented methodology identified critical areas and how energy is distributed within the structure. It was concluded that, although the overall performance was acceptable, special attention is required in the design and reinforcement of the first level. The research validates the use of OpenSeesPy as a useful and effective tool for performing nonlinear dynamic analysis based on structural analysis.

Keywords: ADNL, Energy distribution, Nonlinear model, OpenSeesPy, Drifts

## **Introducción**

Realizar un análisis de la respuesta estructural cuando ocurre un sismo, se ha vuelto una actividad infaltable, cuando hablamos del diseño sísmico moderno, aun mas en la urbe tacneña, por la razón de que se encuentra en una región con alta ocurrencia de sismos, como lo es la costa peruana. En el último tiempo, la rama estructural de la ingeniería ha evolucionado, de un diseño basado solo en fuerzas a diseños y/o metodologías más avanzadas, como el diseño basado en desempeño, que requieren modelos capaces de reproducir de manera realista, como responden las edificaciones ante eventos sísmicos severos. Dentro de este contexto, el análisis dinámico no lineal se presentan como una herramienta fundamental para estudiar la evolución del daño estructural, la formación de rótulas plásticas y sobre todo evaluar cómo se distribuye la energía producto de sismos severos, en los elementos que cumplen funciones estructurales.

Esta investigación tiene como misión analizar cómo se distribuye la energía sísmica para una estructura que cuenta con cuatro pisos, ubicada en la ciudad de Tacneña, empleando el análisis dinámico no lineal haciendo en la librería OpenSeesPy, con ayuda del lenguaje de programación Python. Esta herramienta, derivada del OpenSees, permite el modelado detallado del comportamiento inelástico de materiales estructurales y la aplicación de registros sísmicos reales en modelos tridimensionales. La idealización del comportamiento del concreto y el acero en el OpenSeesPy se realizó empleando los modelos Concrete01 y Steel01, los cuales reproducen de forma eficiente las características principales del comportamiento no lineal bajo cargas cíclicas.

Esta investigación se hizo en base al requerimiento de identificar zonas críticas en edificaciones reales que puedan verse sometidas a acciones sísmicas intensas, con el fin de

proponer criterios de diseño y reforzamiento más eficientes. Se aplicaron quince registros sísmicos, nacionales e internacionales, escalados de acuerdo con la Norma Técnica Peruana E.030, esto nos proporciona una amplia gama de casos que aumentan la fidelidad de nuestro análisis y por consecuencia de nuestros resultados.

Esta investigación esta dividida en 5 partes, la primera parte: planteamiento del problema, en esta se desarrolla el problema general y específicos, en la segunda parte: el marco teórico se detalla los antecedentes de esta tesis, de la misma forma se explica los términos claves para entender esta investigación, en la tercera parte: metodología de la investigación, se desarrollan la metodología que nos ayudó a realizar la investigación así como el uso de instrumentos y técnicas de recolección de datos, en la cuarta parte: resultados, se presentan los resultados luego de haber aplicado el analisis dinámico no lineal para ver la distribución de energía en la edificación, y finalmente en la quinta parte: discusión de resultados, comparamos nuestros hallazgos con otros autores y normas, así como las conclusiones alas que llegamos luego de realizar la investigación, para terminar dando recomendaciones, para lograr realizar un analisis dinámico no lineal más realista para futuros investigadores, y medidas de reforzamiento que se pueden tomar, para la estructura de ser necesario.

## **Planteamiento del Problema**

### **1.1. Formulación del Problema**

#### **1.1.1. Descripción del Problema**

Una nación conocida por encontrarse dentro del cinturón de fuego del pacifico es el Perú, esta ubicación tan poco privilegiada trae consecuencias terribles para el país ya que esta región se caracteriza por la colisión y subducción de la plaza conocida como Nazca bajo la placa sudamericana, lo que provoca que ocurran sismos en el país y terremotos con una frecuencia más alta que en otras regiones, fenómenos naturales los cuales a su vez provocan pérdidas humanas y económicas al país, puesto que las personas y la infraestructura es la que más sufre con la manifestación de estos fenómenos naturales.

En el Perú es común la informalidad y el desconocimiento al momento de llevar a cabo la ejecución de edificaciones, especialmente en viviendas que usan un sistema estructural de pórticos, conlleva a graves daños como colapso de edificaciones, fallas en elementos estructurales, desprendimiento de materiales, pérdida de funcionalidad y una reparación de edificaciones lo que genera un alto costo económico.

Por lo cual es muy necesario, para poder mitigar estos riesgos, que las construcciones en zonas sísmicas cumplan con las normas de ingeniería sismo-resistente nacional e internacional. Así como el uso de técnicas adecuadas de construcción, acompañado del uso de materiales de calidad y un diseño estructural que distribuya las cargas sísmicas de manera efectiva.

#### **1.1.2. Problema General**

Como se distribuye la energía sísmica mediante análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles en Tacna.

### **1.1.3. Problemas Específicos**

- ¿Cuál es el modelo del comportamiento no lineal de los materiales que se emplean en la edificación de 4 niveles Tacna 2024?
- ¿Cómo se realiza un análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles Tacna 2024?
- ¿Qué respuesta se emplea para determinar la distribución de energía sísmica en plantas de la edificación de 4 niveles Tacna 2024?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Determinar la distribución de energía sísmica mediante análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles Tacna 2024.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Idealizar modelos del comportamiento no lineal de los materiales que se emplean en la edificación de 4 niveles Tacna 2024.
- Aplicar una metodología para realizar el análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles Tacna 2024
- Obtener respuestas de un análisis no lineal para obtener la energía sísmica en plantas de la edificación de 4 niveles Tacna 2024.

## **1.3. Justificación e Importancia**

### **1.3.1. Justificación de la Investigación**

Se justifica este estudio desde el punto de vista social, las estructuras más seguras y resistentes minimizan las fuerzas sísmicas, es decir el daño ocasionado a la estructura es leve. Esto no solo protege la vida humana, sino que también reduce las pérdidas económicas y los costos asociados con reparaciones y reconstrucción. Una infraestructura resiliente contribuye a la estabilidad económica de las comunidades.

Usando una visión enfocada en tecnológica, el análisis no lineal dinámico es esencial para avanzar comprender la mecánica sísmica y la resistencia estructural, proporcionando datos y validaciones precisas que son difíciles de obtener con métodos lineales. Su uso permite desarrollar estructuras más seguras y resilientes, avanzando tanto en el conocimiento teórico como en aplicaciones prácticas en ingeniería civil. Además, este análisis proporciona un empujón valioso para la lograr la tan ansiada innovación en la ingeniería, especialmente en su rama estructural. Con estos datos, se podría proponer inéditos e innovadores materiales, además de pulir y enriquecer técnicas para construir, con el deseo de lograr puedan absorber más energía sísmica, ser más flexibles o ser más resistentes, abriendo camino a edificaciones más seguras.

Teniendo una visión con una premisa ambiental, el análisis no lineal dinámico permitirá detallar con mayor precisión cómo se espera que responda una estructura ante eventos sísmicos, considerando las condiciones específicas del lugar en el que se ubica la edificación. Este enfoque nos ayudará a revisar, fortalecer y optimizar los diseños estructurales, minimizando el riesgo de colapso en el futuro.

De esta forma, contribuirá a reducir el impacto ambiental sobre el ecosistema, que incluye tanto a los seres vivos de una zona determinada como los factores que los caracterizan y las interacciones que se dan entre los organismos y el entorno físico.

### **1.3.2. *Importancia de la Investigación***

La importancia radica en que indagar profundamente sobre la distribución de energía sísmica mediante análisis no lineal dinámico es importante para mejorar la seguridad de las estructuras, y contribuir al desarrollo de normativas que protejan a las personas frente cuando suceden poderosos temblores

De igual manera, Chopra (2011) nos dice acerca del análisis no lineal dinámico que el mencionado nos permite evaluar de manera realista y detallada cómo las estructuras se comportan bajo fuerzas sísmicas extremas.

Chopra destaca que este enfoque proporciona una comprensión precisa de la manera en que la energía sísmica se distribuye, absorbe y disipa en toda la estructura. Esto es fundamental porque ayuda a los ingenieros a identificar puntos débiles y reforzarlos, previniendo daños significativos y posibles colapsos.

#### **1.4. Hipótesis**

##### **1.4.1. Hipótesis Principal**

La distribución de energía se da con mayor intensidad en los pisos inferiores y en los niveles superiores disminuye para los sistemas de pórticos para una edificación de 4 niveles Tacna 2024.

##### **1.4.2. Hipótesis Específicas**

- El modelo de comportamiento no lineal para el concreto es Hognestad cuyo uso es especialmente relevante en modelos tipo fibra además de que representa de manera realista y detallada el comportamiento inelástico del concreto, para el acero es el Bilineal Elastoplástico, que representa la fluencia y el endurecimiento del acero, ambos modelos resultan ideales para analizar la distribución sísmica de una vivienda de 4 niveles, Tacna 2024.
- La metodología aplicada para el análisis no lineal dinámico se basa en los lineamientos establecidos por la norma ASCE/SEI 41-17, los criterios de diseño estructural del ACI 318, y las recomendaciones técnicas de la guía NIST GCR 17-917-46v3. Estas referencias proporcionan fundamentos normativos y técnicos necesarios para representar adecuadamente el comportamiento inelástico de la estructura.

- Se determinarán las fuerzas de corte y los desplazamientos en cada nivel, a partir de los cuales se calculará la distribución de energía en la edificación de cuatro niveles ubicada en Tacna, 2024.

## Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes del Estudio

Buscando reforzar los cimientos de nuestra investigación se requiere detallar los antecedentes de nuestra investigación por tal motivo se buscó, los ya mencionados en un plano internacional. Nacional y local.

#### 2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

Jaramillo & Riveros (2008), en su investigación titulada “ANÁLISIS NO LINEAL DINÁMICO TRIDIMENSIONAL DE EDIFICIOS EN CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A LOS REGISTROS DEL SISMO DE QUETAME (2008)” Se modelaron tres estructuras de 5, 12 y 20 pisos, tomando como base los espectros sísmicos Piedemonte-B y Lacustre 500, definidos en la microzonificación sísmica de Bogotá en el año 2010. La evaluación de estos edificios se realizó utilizando registros del sismo de Quetame de 2008, obtenidos mediante acelerógrafos ubicados en Bogotá. Al aplicar un análisis no lineal detallado, junto con registros reales del evento sísmico en tres componentes y utilizando equipos modernos de alta precisión, se logró garantizar un alto nivel de confiabilidad y exactitud en los resultados.

Por su parte, Bedecarratz Salvadores, E. A. (2018), en su investigación titulada “MODELACIÓN NO LINEAL DE UN EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO Y APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE DISEÑO POR DESEMPEÑO” El análisis del edificio se realizó mediante procedimientos no lineales tanto estáticos como dinámicos, empleando distintos registros sísmicos correspondientes al evento 27F ocurrido en Santiago. Los resultados Esto se atribuye al comportamiento conjunto del muro como parte de un sistema estructural integrado, funcionando como un gran elemento con geometría en T. Además, se elaboraron diversos modelos no lineales utilizando distintos criterios de

modelación, con la finalidad de evaluar el impacto del diseño estructural en el comportamiento global de la edificación.

Núñez, (2017), en su investigación titulada “DISEÑO POR DESEMPEÑO DE UN EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA.” Se emplearon como referencia la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015), el American Concrete Institute (ACI 2014), FEMA 440, FEMA 356 y las recomendaciones del Comité VISION 2000. El análisis estructural se realizó principalmente mediante el software ETABS 2016. Inicialmente, se calculó el espectro de diseño conforme a lo establecido en la NEC 2015, el cual fue utilizado para desarrollar el diseño estructural a través del análisis modal espectral. Posteriormente, se llevó a cabo la evaluación del desempeño estructural mediante dos métodos: el análisis Pushover y el análisis dinámico no lineal Tiempo-Historia. Para este último, se emplearon espectros sintéticos derivados del espectro elástico previamente calculado. Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos de ambos métodos. Los hallazgos indicaron que, ante un sismo con un periodo de retorno de 2500 años correspondiente al nivel de amenaza sísmica exigido para edificaciones de ocupación especial, el análisis dinámico no lineal Tiempo-Historia reflejó una mayor exigencia estructural, lo que se traduce en un nivel de daño superior al estimado mediante el análisis Pushover.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

Esteba (2017), en su tesis titulada "ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO NO LINEAL EN EL DESEMPEÑO DE UN EDIFICIO DE CONCRETO ARMADO DISEÑADO BAJO LA NORMA E-030 EN PUNO" Se identificó una concordancia entre los resultados obtenidos entre el análisis estático no lineal y el análisis dinámico no lineal. Por otro lado, el análisis y diseño elástico, realizado conforme al Reglamento Nacional de Edificaciones, arrojó valores de rigidez estructural considerablemente elevados. El análisis dinámico no lineal, en

cambio, permitió una evaluación más precisa del comportamiento estructural, al mostrar la evolución de esfuerzos internos y deformaciones a lo largo del tiempo.

Los resultados de este análisis reflejaron niveles de desempeño clasificados en los rangos "A a B" (totalmente operacional) y "B a IO" (de operacional a ocupación inmediata), con deformaciones máximas de 0.001 y 0.002. Estos valores corresponden a un nivel de ocupación inmediata, claramente dentro de los límites aceptables y con un amplio margen de seguridad. En consecuencia, se concluye que la estructura presenta un comportamiento altamente conservador frente a sollicitaciones sísmicas.

Por su parte, Garay & Llaure (2020), en su investigación titulada “EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD SÍSMICA DE VIVIENDAS CONFORMADAS POR SISTEMAS ESTRUCTURALES DE ALBAÑILERÍA CONFINADA Y PÓRTICOS DE CONCRETO ARMADO EN EL DISTRITO DE LA VICTORIA, LIMA.” En el análisis realizado a viviendas con sistema estructural mixto, empleando el método propuesto por FEMA 440, se observó que ninguna de las edificaciones evaluadas alcanza el nivel mínimo de desempeño necesario para permanecer completamente operativas ante un sismo de ocurrencia frecuente. Solo el 37% de las construcciones logra cumplir con el nivel de desempeño operacional frente a un sismo de servicio, mientras que únicamente el 6% alcanza el nivel correspondiente a seguridad de vida. Además, se concluye que el 100% de las edificaciones no cumple con el objetivo de evitar el colapso ante la demanda sísmica máxima esperada.

Samaniego & Sánchez (2020), en su investigación titulada "VULNERABILIDAD SÍSMICA EMPLEANDO EL ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL INCREMENTAL DE UNA VIVIENDA MULTIFAMILIAR " En esta tesis se abordarán las propiedades relacionadas con el comportamiento inelástico de los materiales, haciendo énfasis en las curvas histeréticas. Asimismo, se ejecutará un análisis dinámico incremental usando modelos no lineales en el dominio tiempo-historia, con el propósito de registrar y escalar los niveles de

intensidad sísmica, permitiendo así calcular la deriva inter-piso. Esta metodología facilitará un enfoque probabilístico que culminará en la elaboración de curvas de fragilidad, las cuales representarán los distintos niveles de daño que puede experimentar la edificación.

### **2.1.3. Antecedentes Locales**

Calcina (2017), en su investigación titulada “EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE UN EDIFICIO DE ONCE PISOS UTILIZANDO ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO NO-LINEAL” utilizó el programa ETABS 2016. El investigador analizó la edificación que es de concreto armado, donde poniendo en práctica el método de análisis no lineal estático y el no lineal dinámico, comparó estos métodos para identificar las zonas críticas de la edificación. Para poder llevar a cabo de forma correcta su análisis se guió de la norma FEMA 273. A la vez también usó el FEMA y ATC-40, con los cuales trabajó diversos parámetros en el software ETABS, donde analizar este edificio en el rango elástico fue su meta, haciendo uso de la metodología push-over para posteriormente de la misma manera usando este mismo software, hacer el análisis en el rango inelástico, esta vez haciendo uso del análisis dinámico incremental.

Medina & Ayma, (2023), en su investigación titulada “EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE UNA EDIFICACIÓN DE SALUD DE PRIMER NIVEL EN LA CIUDAD DE TACNA – 2022” tuvo como propósito principal ver cómo en Tacna, se desempeña sísmicamente la estructura dedicada a labores de salud, cuando se le somete a sismos severos, para llevar a cabo este cometido hicieron uso del análisis estático y dinámico no lineal. Los autores usaron metodologías que se encontraban en normas como el ASCE 41-17, VISION 2000, HAZUS, así como también usaron como guías recomendaciones que se encontraron en el NIST y la norma conocida como el ACI 318-19, gracias a ello pudieron establecer parámetros de comportamiento aceptable para los elementos estructurales que conformaban su edificación, así como para el desempeño global de su edificación, para realizar

finalmente este análisis realizo e hizo uso de la metodología pushover y también hizo uso del análisis no lineal tiempo historia.

Jinez & Huarachi, (2023), en su investigación titulada “ANÁLISIS NO LINEAL Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO SEGÚN ASCE/SEI 41 DEL PABELLÓN “A” DE LA I.E. JORGE CHÁVEZ DE LA CIUDAD DE TACNA, 2022” , cuyo objetivo fue el de analizar cómo se comporta estructuralmente el Pabellón “A” frente a sismos severos, haciendo uso de la metodología Pushover. Primeramente realizaron una inspección visual para identificar las anomalías en los elementos estructurales que la conforman, finalmente realizaron el modelado del pabellón con el software ETABS. Donde obtuvieron como resultado la curva Pushover, revelando un desempeño estructural deficiente según la norma ASCE/SEI 41-17.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Respuesta del Análisis Dinámico no Lineal**

#### **2.2.1.1. Propiedades Dinámicas**

Las propiedades dinámicas en una estructura de concreto armado son las características que determinan cómo responde a cargas dinámicas generadas por sismo o por vientos. Estas propiedades son fundamentales en el diseño y análisis sísmico, ya que influyen en la manera en que la estructura oscila, se deforma y disipa energía durante eventos sísmicos. Las propiedades dinámicas más relevantes en una estructura de concreto armado incluyen:

- **Frecuencia natural:** Según Paz (1997), la frecuencia natural es una de las propiedades fundamentales que determinan la respuesta de una estructura ante cargas dinámicas. Es importante conocer este valor pues, existe un fenómeno llamado resonancia, el cual sucede cuando el valor de la frecuencia es parecida al del sismo, lo que provoca que los desplazamiento y esfuerzos crezcan notablemente, finalmente este valor va acorde a la masa y la rigidez de nuestra edificación

- **Periodo de vibración:** Chopra, en su libro explica acerca del período de vibración del cual dice es inversamente proporcional a la rigidez una estructura e influye directamente en su respuesta sísmica. Una estructura de concreto armado con un período más corto es más rígida y suele experimentar menores desplazamientos, mientras que una estructura con un período largo es más flexible y puede experimentar mayores desplazamientos. Finalmente, este nos ayuda a clasificar dentro de un espectro donde se encuentra una estructura en el mismo.
- **Modos de vibración:** Podemos decir que como su nombre lo dice, es como la estructura va a vibrar, es decir en un primer modo la estructura oscila en una dirección, en un modo 2, oscila en dos generando una onda, y en el modo 3 oscila en un movimiento más complejo, estos modos de vibración permiten saber si habrá resonancia con respecto a los sismos.
- **Rigidez y masa:** Este concepto según Clough y Penzien, en Dinámica de Estructuras, destacan que la rigidez y la masa cruciales porque nos permiten conocer los atributos dinámicos estructurales. La masa influye sobre la inercia estructural, mientras que la rigidez está relacionada con la capacidad de resistir deformaciones. La relación entre masa y rigidez determina cómo responde la estructura de concreto armado ante las aceleraciones sísmicas, influyendo en los movimientos laterales y fuerzas generados en cada nivel de la estructura.

#### **2.2.1.2. Regularidad**

En una estructura se refiere a la uniformidad y simetría de su diseño tanto en planta (horizontalmente) como en elevación (verticalmente). Una estructura es considerada regular cuando presenta una distribución uniforme de sus componentes estructurales las cuales comúnmente son columnas, vigas, muros, etc, además de que la masa de igual manera es

homogénea bidireccionalmente, lo cual permite un comportamiento sísmico más predecible y favorable.

En un diseño sísmico, las estructuras regulares tienden a responder de manera más uniforme ante cargas sísmicas, distribuyendo las fuerzas y desplazamientos de manera controlada. La falta de regularidad, conocida como irregularidad estructural, puede llevar un abultamiento de fuerzas, deformaciones además de desplazamientos en partes aleatorias, incrementando el riesgo de daño o colapso durante un sismo.

Según la norma E 030 del reglamento nacional de edificaciones, en el artículo 19 del capítulo III, lo clasifica como regulares o irregulares para los siguientes fines:

**Tabla 1**

*Categoría y Regularidad de las Edificaciones*

Categoría de la Edificación	Zona	Restricciones
A1 y A2	4,3 y 2	No se permiten irregularidades
	1	No se permiten irregularidades extremas
B	4,3 y 2	No se permiten irregularidades extremas
	1	Sin restricciones
C	4 y 3	No se permiten irregularidades extremas
	2	No se permiten irregularidades extremas excepto en edificios de hasta 2 pisos u 8 m de altura total
	1	Sin restricciones

*Nota.* La edificación de estudio es de categoría C y está en la Zona 4, además es regular.

**2.2.1.3. Sistema Estructural**

Es un todo conformado por partes que desempeñan un papel estructural, los cuales trabajan de manera conjunta para resistir y distribuir las cargas de una construcción. Esta organización permite que una construcción tenga la estabilidad, seguridad y funcionalidad

necesaria, ya que permite que las cargas de fuerzas externas de viento o sismos, así como las cargas viva y muerta, se distribuyan correctamente en la estructura.

Existen varios tipos de sistemas estructurales, dependiendo de cómo están configurados y de los materiales utilizados, para esta investigación se mencionará el sistema estructural de concreto armado, donde según la Norma E-030 para nuestro país se consideran los siguientes:

- **Pórticos:** En este caso las columnas son las que trabajan llegando a absorber el 80 % de la fuerza del sismo, si se quisiera que existieran muros que ayuden a soportar la carga sísmica se pueden añadir sin ningún problema.
- **Muros estructurales:** En este sistema los muros estructurales son los que proporcionan la resistencia sísmica, donde al menos reciben la fuerza cortante en un 70% de su totalidad.
- **Dual:** Como su nombre lo indica aquí trabajan tanto pórticos como muros estructurales, en donde estos últimos reciben la fuerza cortante en un rango del 20% al 70% de su totalidad.

#### **2.2.1.4. Comportamiento no Lineal del Concreto Armado**

Podemos definir al concreto armado como la unión de dos materiales, primero el concreto, conocido por su resistencia a ser comprimido, y en contraparte el acero, el cual se caracteriza por resistir fuerzas de tracción.

Para el estudio del concreto armado, se llevan experimentos con los cuales se conciben modelos matemáticos los cuales tratan de idealizar de alguna manera para que se mas fácil entender cómo funcionan el concreto y el acero, mediante curvas de esfuerzo-deformación.

##### ***2.2.1.4.1. Modelo de Esfuerzo Deformación Para el Concreto***

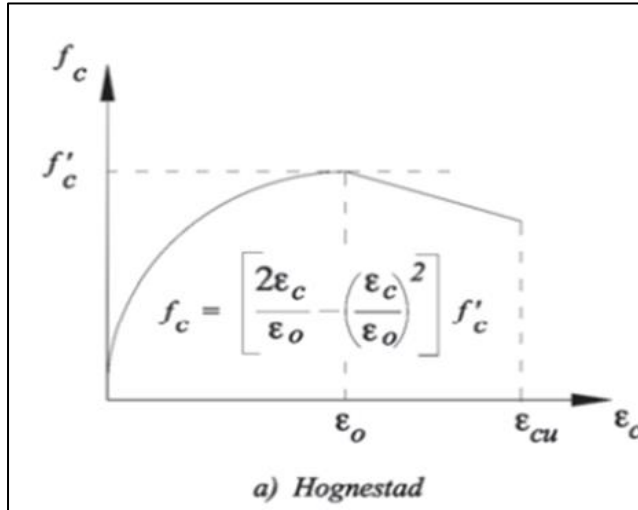
Los modelos de esfuerzo deformación son muy importantes porque nos permite describir como las unidades participantes del concreto armado, los cuales son el concreto y el

acero se comportarán frente a la acción de cargas, a continuación, se describirá el modelo que se uso para el concreto.

El Modelo seleccionado fue el de Hognestad para el concreto porque describe cómo funciona el concreto no confinado bajo compresión, este modelo se basa en una curva esfuerzo–deformación no lineal, que representa de manera precisa la distribución de tensiones en una sección de concreto que está bajo un esfuerzo de compresión tal y como se puede apreciar en la figura 1, además en el libro de Pinto, que el modelo de Hognestad permite obtener una descripción más realista de las tensiones en la zona comprimida del concreto, comparado con las aproximaciones tradicionales como el modelo de Whitney, enfatizando que, al considerar una distribución parabólica de tensiones, refleja de manera más precisa cómo el concreto se comporta bajo cargas de compresión.

**Figura 1**

*Modelo de Hognestad*



Nota. Curva esfuerzo-deformación del concreto, extraído de modelo esfuerzo-deformación para elementos de concretos reforzado que cumple con las hipótesis de las NTC RCDF, por Villagrán A,2004, <https://www.scielo.org.mx/pdf/ccid/v5n1/v5n1a3.pdf>.

El tramo AB tiene una forma parabólica donde se muestra como la deformación del concreto llega a un valor de  $\epsilon_0 = 0.002$ , este representa el máximo valor frente a la compresión que resiste el concreto ( $f'_c = 0.85f'_c$ ).

El tramo lineal BC permite ver como el concreto se va fisurando internamente, producto de que su resistencia disminuye. La ruptura del elemento se dará cuando la deformación alcance un valor máximo  $\epsilon_{cu}$ , que se encuentra entre 0.003 y 0.004).

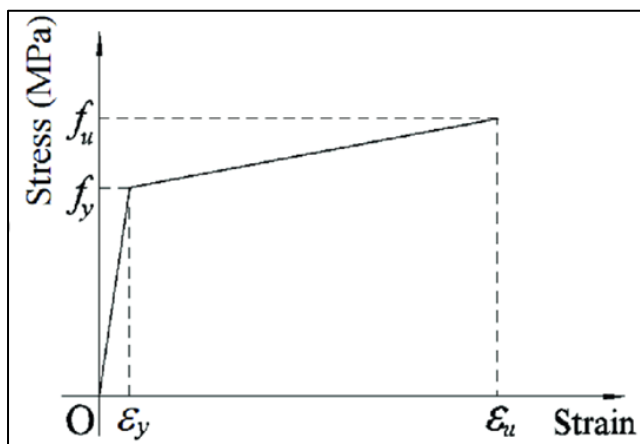
#### 2.2.1.4.2. Modelo de Esfuerzo Deformación Para el Acero de Refuerzo

Por ser el acero el que nos da el refuerzo en el concreto armado es importante simular con precisión el comportamiento no lineal del mismo en los elementos estructurales de concreto armado.

Para ello se seleccionó el Modelo Bilineal Elastoplástico, el modelo bilineal elastoplástico es un modelo simplificado para describir el comportamiento mecánico del acero de refuerzo bajo cargas monotónicas o cíclicas. Este modelo asume que el acero responde inicialmente en forma lineal (comportamiento elástico) hasta alcanzar el límite elástico, y a partir de ese punto, se comporta de manera plástica, con una pendiente reducida que representa el endurecimiento isotrópico del material.

**Figura 2**

*Modelo Bilineal Elastoplástico*



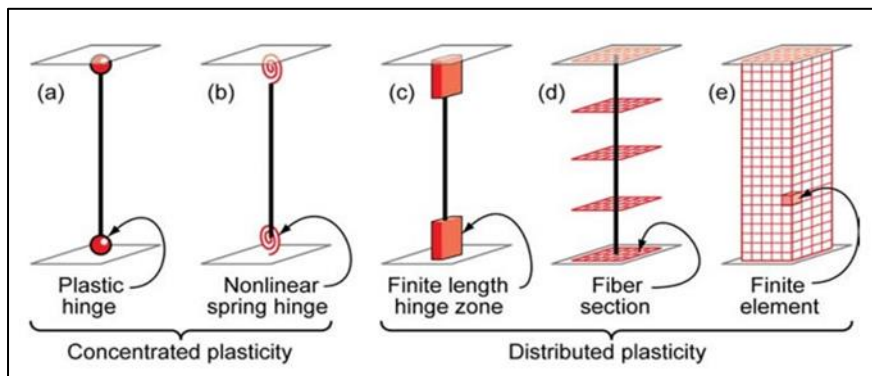
Nota. Nota. Esfuerzo y deformación del acero, extraído de *Estudio numérico de tubos circulares de acero rellenos de hormigón sometidos a torsión pura*, Khanh BaLe, 2021, Elena Ferretti.

### 2.2.1.4.3. Modelos de Plasticidad

Para representar de forma correcta cómo se comportan los elementos estructurales en una fase no lineal, es esencial incorporar modelos de plasticidad. Estos modelos se clasifican en dos tipos: plasticidad concentrada, como el modelo de Giberson (rótula con resorte no lineal), y plasticidad distribuida, que incluye zonas de rótula de longitud finita, secciones tipo fibra y métodos de elementos finitos. En la figura 3 se observa estos modelos idealizados aplicados a vigas y columnas.

**Figura 3**

*Modelos de Plasticidad*



*Nota.* Los dos primeros son plasticidad concentrada y los restantes son plasticidad distribuida.

A continuación, se describirá más de estos tipos de rotula:

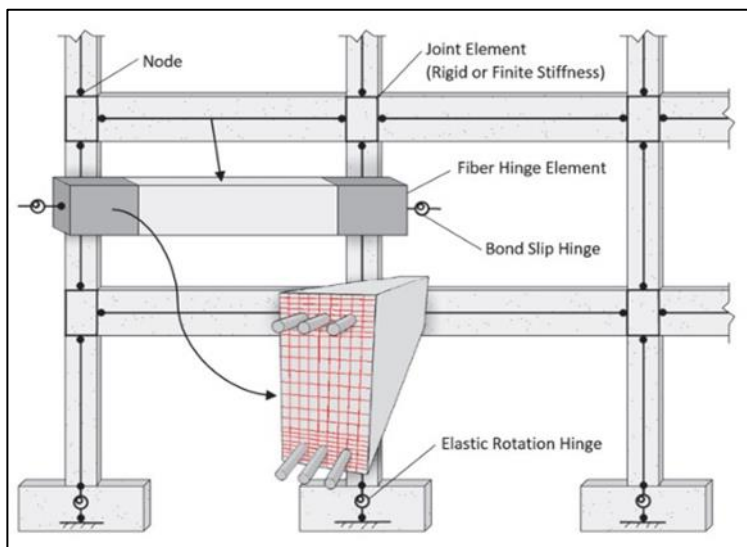
- **Rotulas plásticas.** Una rótula plástica significa que, en una región específica de una columna o una viga, el material ha alcanzado su estado plástico, es decir, ha sobrepasado su límite elástico y comienza a experimentar deformaciones permanentes (inelásticas) bajo cargas extremas, como las generadas por sismos o fuerzas dinámicas, según Paulay y Priestley (1992), nos menciona que una rótula plástica es una zona limitada de un elemento estructural donde se generan deformaciones plásticas significativas, permitiendo que el resto del elemento permanezca elástico. Esta concentración de inelasticidad permite disipar energía y

evitar el colapso global de la estructura. La rótula plástica se forma típicamente en los extremos de vigas y columnas en sistemas dúctiles.

- **Rótulas concentradas tipo fibra.** Es un modelo simplificado en el que se utiliza una única sección tipo fibra en cada extremo del elemento, y se establece una longitud de rótula plástica para vincular la curvatura con la rotación, la figura 8 muestra un modelo idealizado con rótulas concentradas tipo fibra, de manera que la no linealidad se manifiesta en los extremos, mientras que en la sección central del elemento se conserva el comportamiento elástico.

**Figura 4**

*Pórtico con rotulas concentradas tipo fibra*



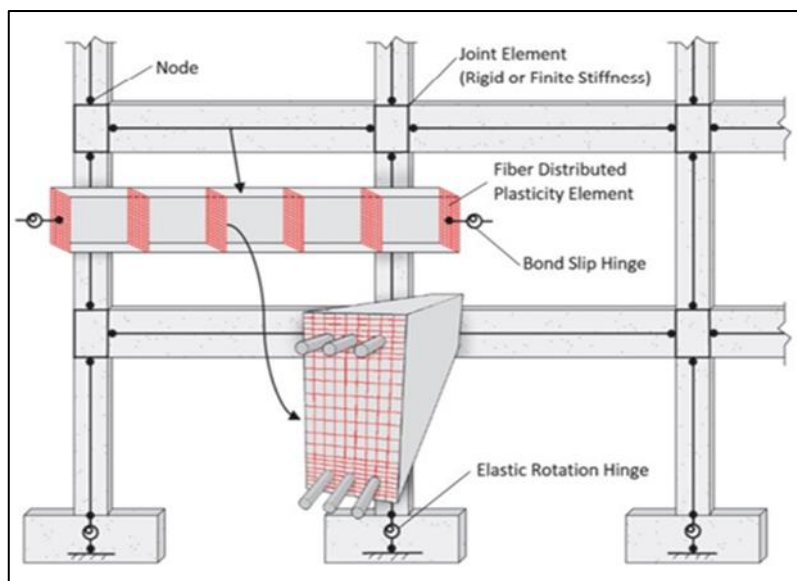
*Nota.* Secciones inelásticas donde solo existen en los extremos del elemento, de Directrices para el análisis estructural no lineal para el diseño de edificios (p. 38), por Applied Technology Council, 2017, <https://www.atcouncil.org>. Derechos reservados.

- **Plasticidad distribuida tipo fibra.** Los elementos tipo fibra con plasticidad distribuida utilizan un esquema de modelado que divide la unidad estructural en varias secciones a lo largo de su extensión. De este modo, es posible representar

cómo las deformaciones inelásticas se reparten progresivamente en toda la sección transversal del miembro, definiendo de manera indirecta una longitud de rótula plástica en función de la ubicación de las fibras, como se observa en la figura 5. En resumen, este enfoque permite que las deformaciones inelásticas se distribuyan a lo largo del elemento, en lugar de localizarse en un único punto.

**Figura 5**

*Pórtico con plasticidad distribuida tipo fibra*



*Nota.* Las secciones transversales rojas indican que todo el elemento es inelástico, de Directrices para el análisis estructural no lineal para el diseño de edificios (p. 38), por Applied Technology Council, 2017, <https://www.atcouncil.org>. Derechos reservados.

#### **2.2.1.4.4. Ciclos Históricos Para Carga Cíclica**

Estos modelos matemáticos describen cómo se relaciona la resistencia de un material o elemento estructural con cuánto se deforma cuando se le aplica una carga. Se basan en experimentos de laboratorio donde se someten los materiales a diferentes secuencias de carga (aplicar peso), descarga (quitar peso) y recarga (volver a aplicar peso), creando ciclos repetitivos.

La primera curva que se obtiene de estos ciclos se llama "curva primaria". Esta curva es muy útil porque nos da una idea general de cómo se comporta el material bajo carga y descarga, mostrando su "histéresis" (cómo la deformación no vuelve exactamente al punto inicial al quitar la carga) y su relación resistencia-deformación.

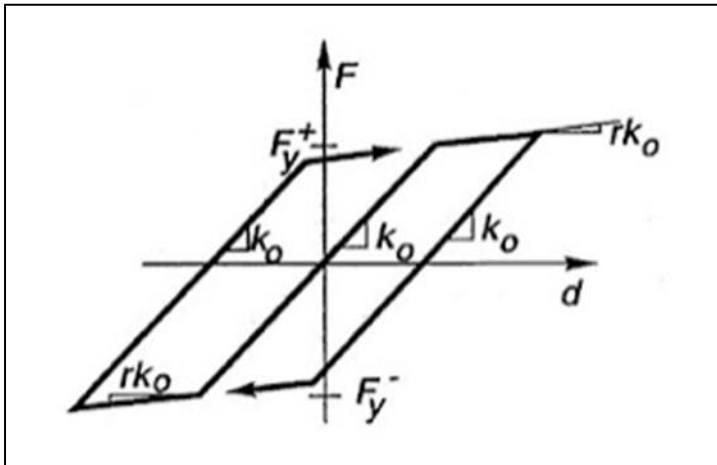
Durante la "fase de carga", la deformación del material aumenta a medida que se le aplica más fuerza. La descarga ocurre la fuerza decrece y por consecuencia la deformación también disminuye. Finalmente, se vuelve a recargar de fuerza , por lo tanto el esfuerzo comienza a crecer.

A continuación, se detallará el modelo de ciclo histérico que se usará en esta investigación.:

- **Modelo histéresis bilineal:** El modelo bilineal de histéresis es una representación utilizada para simular el comportamiento de unidades de acero de refuerzo. Este modelo describe la respuesta del acero mediante una línea recta con pendiente positiva hasta que se alcanza su límite elástico. Luego, al entrar en el estado de fluencia, el material continúa con una trayectoria casi horizontal o con una pendiente positiva muy baja, correspondiente a la fase de endurecimiento, hasta que inicia el proceso de descarga. Cabe mencionar que este modelo no contempla los efectos de degradación de rigidez en el elemento estructural. El comportamiento descrito se puede visualizar en la figura 10, donde se muestra el gráfico del modelo bilineal.

**Figura 6**

*Modelo Histérico Bilineal*



*Nota.* El grafico describe el comportamiento del material en forma de línea recta con pendiente, de *Tipos de histéresis en elementos de concreto armado y su efecto en la respuesta estructural* (2017), por E. Capcha, en CEA Ingeniería, [https://ceaingenieria.blogspot.com/2017/08/tipos-de-histeresis-en-elementosde\\_22.html](https://ceaingenieria.blogspot.com/2017/08/tipos-de-histeresis-en-elementosde_22.html).

### **2.2.2. Distribución de Energía Sísmica**

La distribución de energía sísmica en una edificación se refiere a cómo las fuerzas generadas por un sismo son absorbidas, disipadas y distribuidas a través de los elementos estructurales. Esto es clave en el diseño sismorresistente con el fin de asegurar la estabilidad estructural y reducir al mínimo los daños.

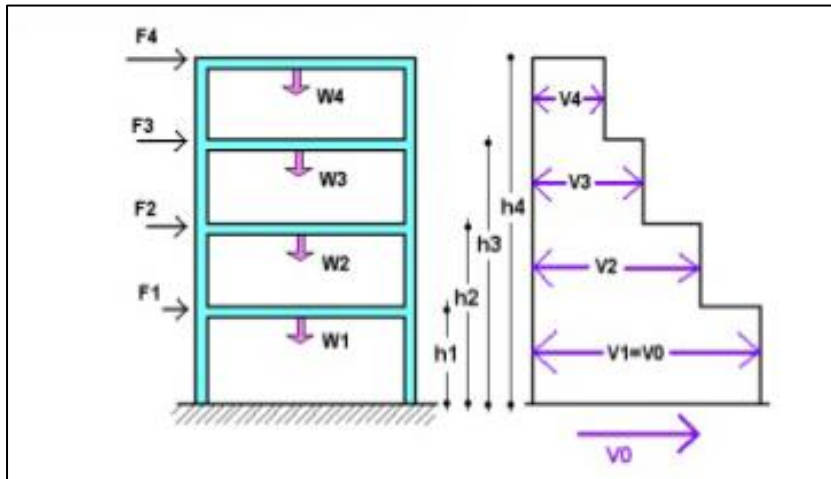
#### **2.2.2.1. Fuerzas de Corte**

En un evento sísmico, la fuerza cortante se distribuye a lo largo de los diferentes niveles de la estructura, dependiendo de la rigidez y masa correspondientes a cada piso. En edificaciones de cuatro niveles, como la analizada en esta investigación, se identifica una concentración significativa de la fuerza cortante en los niveles más bajos, siendo el primero el más afectado. Esto se debe a que deben soportar la inercia acumulada de los niveles superiores.

Esta distribución no es uniforme y está influenciada por la configuración estructural y las propiedades dinámicas del edificio. El comportamiento observado refleja la forma en que la estructura absorbe la energía sísmica y responde ante sollicitaciones horizontales.

### Figura 7

*Distribución de fuerzas de corte*



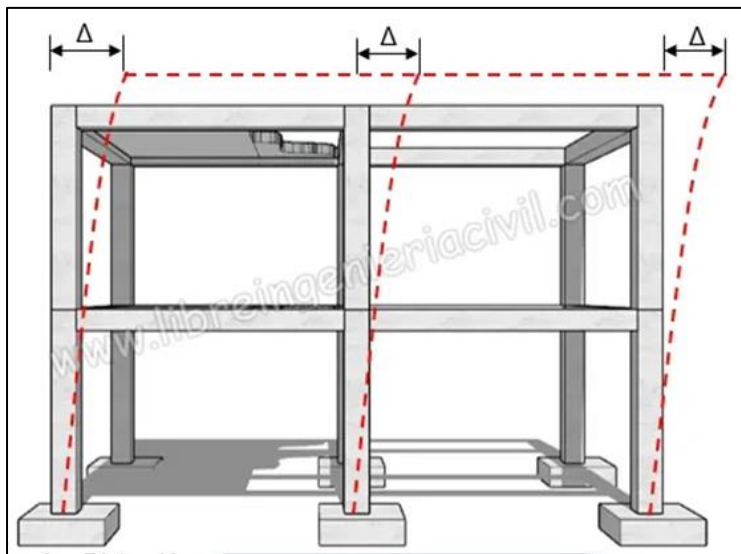
*Nota.* El grafico describe el comportamiento del material en forma de línea recta con pendiente, de *Verificación del cortante basal según Covenin* (2016) por Saavedra, en Saavedra Online, <https://saavedraonline.wordpress.com/2016/10/29/verificacion-del-cortante-basal-segun-covenin-1756-2001/>.

#### 2.2.2.2. Desplazamientos

Los desplazamientos se producen por el movimiento de los nodos y elementos del pórtico bajo la acción de cargas, siendo especialmente relevantes ante cargas laterales como el viento o los sismos como se muestra en la figura 8. Esta medida es relevante para evaluar el comportamiento sísmico de una estructura, ya que desplazamientos excesivos pueden generar daños significativos en edificaciones altas compuestas solo por pórticos de concreto, es común que no se cumplan los límites de distorsión permisibles; por ello, se incorporan placas de concreto para controlar y reducir los desplazamientos laterales.

**Figura 8**

*Desplazamiento en un pórtico*



*Nota.* Desplazamientos generados por las fuerzas sísmicas, extraído de de *Sistemas estructurales sismorresistentes de concreto* (2024), en Libre Ingeniería Civil, <https://www.libreingenieriacivil.com/2024/03/sistemas-estructurales-sismoresistentes.html>.

### **2.2.2.3. Energía**

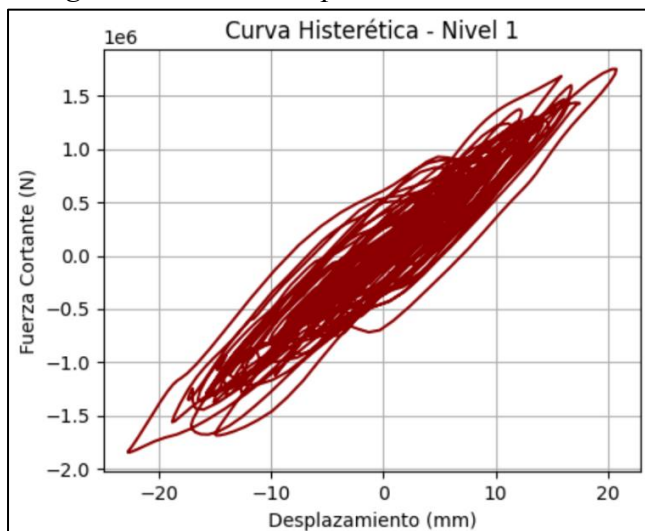
Durante un sismo, la energía ingresada a la estructura se manifiesta principalmente a través de desplazamientos inerciales provocados por las aceleraciones del suelo, este comportamiento da lugar a ciclos histéreticos de forma ovoide en las curvas Fuerza vs. Desplazamiento, los cuales representan el desplazamiento inercial de la estructura hacia la derecha e izquierda como respuesta a la acción sísmica. El área encerrada por cada ciclo corresponde a la energía que la estructura ha absorbido y disipado progresivamente en cada nivel, producto del comportamiento inelástico de los elementos estructurales, esta energía disipada puede estimarse mediante el método numérico de la regla del trapecio, calculando el área bajo la curva histérica.

En una edificación, los pisos superiores presentan desplazamientos más amplios, pero disipan menos energía en comparación con los inferiores, ya que soportan menores fuerzas

cortantes, por el contrario, los primeros niveles, especialmente el primero, absorben mayor cantidad de energía sísmica debido a la acumulación de esfuerzos provenientes de los niveles superiores.

### Figura 9

*Energía absorbida en el primer nivel*



*Nota.* Esta imagen es el comportamiento de la fuerza y desplazamiento lo cual dentro de ella viene a ser la energía absorbida en el primer nivel de la edificación.

### 2.3. Definición de Términos

- **No linealidad del material:** Esta relacionado con el comportamiento de los materiales estructurales, como el acero o el concreto, cuando la relación entre tensión y deformación deja de ser proporcional. Esto ocurre una vez que se supera el límite elástico del material, dando paso a un comportamiento plástico o incluso a la falla. Este tipo de respuesta es fundamental en el análisis no lineal, ya que permite modelar con mayor precisión el comportamiento real de las estructuras ante cargas extremas (Chopra, 2017).
- **Análisis lineal:** Es un método de evaluación estructural que asume que existe una relación proporcional entre las fuerzas aplicadas, las deformaciones y los esfuerzos en los materiales. Este enfoque supone que el comportamiento del material

permanece dentro del rango elástico, y que las deformaciones son pequeñas, lo cual simplifica considerablemente el análisis estructural (Chopra, 2017).

- **Análisis no-lineal dinámico:** Es un método avanzado de evaluación estructural que determina la respuesta de una estructura ante movimientos sísmicos reales, considerando las no linealidades tanto del material, este tipo de análisis permite capturar con mayor precisión los efectos inelásticos y las posibles redistribuciones de esfuerzos durante un evento sísmico (Bozorgnia & Bertero, 2004).
- **Rótula Plástica:** Se forma en un elemento estructural cuando las tensiones exceden el límite elástico del material, generando una zona donde ocurre una deformación plástica localizada. En esta región, el elemento puede continuar deformándose sin un aumento significativo de resistencia, lo cual permite que la estructura disipe energía durante eventos extremos, como los sismos, sin colapsar inmediatamente (Paulay & Priestley, 1992).
- **Carga cíclica:** Se refiere a una carga que actúa repetidamente sobre una estructura, alternando su dirección y magnitud con el tiempo, como ocurre durante un sismo. Este tipo de sollicitación es fundamental en la evaluación estructural, ya que puede inducir acumulación de daño, fatiga y degradación progresiva en los materiales y conexiones, especialmente en sistemas de pórticos (Clough & Penzien, 1993).
- **Ciclos histéricos:** Estos ciclos muestran la relación entre fuerza y desplazamiento, durante sucesivos procesos de carga, descarga y recarga, reflejando la capacidad de disipación de energía, rigidez y daño acumulado en los materiales (Spencer & Nagarajaiah, 2003).
- **Fuerza de corte:** La evaluación precisa de la fuerza de corte es fundamental para diseñar el refuerzo adecuado y garantizar que los pórticos estructurales resistan las acciones horizontales sin experimentar fallas frágiles (Hibbeler, 2018).

- **Desplazamientos:** Son los movimientos que experimentan los distintos puntos de una estructura como respuesta a cargas externas, tales como el peso propio, las cargas vivas, el viento o las fuerzas sísmicas, estos desplazamientos pueden producirse en distintas direcciones y constituyen un indicador fundamental de la deformación y del desempeño global de sistemas estructurales como pórticos (Leet, Uang, & Gilbert, 2008).
- **Acelero gramas:** Estos registros representan el movimiento sísmico que afecta directamente a las estructuras, proporcionando información esencial para el análisis dinámico y el diseño sismorresistente. Los acelerogramas se obtienen mediante instrumentos como sismógrafos y acelerómetros instalados en estaciones sísmicas o en edificaciones estratégicas (Douglas, 2003).
- **Espectro Objetivo:** Corresponde a la aceleración máxima que puede experimentar una estructura en función de su período fundamental, siendo definida a partir de los lineamientos establecidos por la Norma Técnica Peruana E.030 “Diseño Sismorresistente”. Este espectro incorpora variables como la zonificación sísmica, las características del suelo y el nivel de importancia de la edificación. Su adecuada determinación resulta fundamental para escalar registros sísmicos y realizar un análisis preciso del comportamiento dinámico estructural (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).
- **OpenSeesPy:** Es una herramienta de código abierto que nos permite realizar análisis de estructuras a través de un lenguaje de programación conocido como Python.

## **Metodología de la Investigación**

### **3.1. Tipo y Diseño de investigación**

#### **3.1.1. Tipo de investigación**

##### **3.1.1.1. Según el Propósito**

La presente investigación es pura o básica, ya que aporta o extiende el conocimiento científico sin llegar a compararlo con un caso práctico.

##### **3.1.1.2. Según el Nivel**

Según Hernández y colaboradores (2010), los estudios descriptivos tienen como finalidad principal reconocer y detallar las características, cualidades y perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o fenómenos que se analizan. Su propósito es recopilar o cuantificar datos de manera individual o conjunta sobre las variables que se investigan, sin buscar establecer relaciones causales entre ellas.

La investigación que se realizó es descriptiva puesto que se recopilaron datos, con los cuales se analizará como se distribuye la energía sísmica en una estructura de cuatro pisos.

##### **3.1.1.3. Según el Enfoque**

De acuerdo con Hernández et al. (2010), el enfoque cuantitativo se centra en recolectar datos numéricos y medibles con el fin de probar hipótesis mediante análisis estadísticos. Este enfoque permite identificar patrones o relaciones causales, así como construir modelos que representen el comportamiento de las variables analizadas.

Dado el contexto, esta investigación adoptará un enfoque cuantitativo, debido a la implementación de artefactos de medición que permitirán evaluar las magnitudes de las variables en estudio. Estos instrumentos cuentan con técnicas de confiabilidad y validez que permitirán respaldar la hipótesis planteada a través de datos numéricos y objetivos.

### **3.1.2. *Diseño de investigación***

La investigación es no experimental transversal, la razón es por que realizarán ensayos experimentales ni se modificarán intencionalmente las variables.

El análisis y evaluación se realizará en un determinado tiempo empleando la información de documentos que ya existen, documentos los cuales nos permitirán conocer a detalle como esta construida la edificación de estudio, y comparar que tan bien está hecha para eso nos ayudamos de la norma peruana E-030 y la norma americana ASCE 41-17.

#### **3.1.2.1. *Método de Investigación***

Se utilizo el método hipotético deductivo, el cual es descrito por Villarreal (2001) como un enfoque fundamental en el método científico. Este método implica la formulación de hipótesis generales o modelos, los cuales son sometidos a pruebas experimentales o diseños controlados. Se parte de supuestos y suposiciones para examinar mecanismos y procesos. Este enfoque se emplea en las ciencias empíricas y se fundamenta en la confirmación de las hipótesis a través de evidencia empírica. Su aplicación es esencial para la propiciar la proliferación del saber y los logros investigativos.

### **3.2. *Población y Muestra***

#### **3.2.1. *Población***

Arias (2012) nos argumenta que podemos decir que cuando hablamos de un grupo de partes que forman un todo que comparten ciertas características, podemos denominar a este grupo de partes como una población.

Para esta investigación se tomo como a edificaciones de cuatro pisos que hay en la ciudad de Tacna.

### 3.2.2. *Muestra*

También definiendo la muestra tenemos a Kaseng y Guillen (2014) que nos indican que se considera a la muestra como un subconjunto el cual representa de manera precisa a la población, que es más grande.

Sera una edificación de 4 pisos en la ciudad de Tacna, la que fue nuestra muestra para la realización de esta investigación.

## 3.3. Operacionalización de Variables

### 3.3.1. *Identificación de Variables*

**Variable independiente:** Análisis dinámico no lineal de una edificación de 4 niveles

Dimensiones:

- Propiedades dinámicas
- Sistema estructural
- Análisis no lineal
- Modelos de comportamiento no lineal del concreto y el acero

**Variable dependiente:** Distribución de energía sísmica en edificación 4 niveles.

Dimensiones:

- Desplazamientos
- Fuerzas de corte

### 3.3.2. Definición Operacional de las Variables

Tabla 2

Caracterización de Variables

VARIABLE	DEFINICION	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>Variable independiente</b>  <b>Análisis dinámico no lineal de una estructura de 4 niveles</b>	Estudia el comportamiento de sistemas bajo cargas o excitaciones que varían en el tiempo, donde las relaciones entre las fuerzas, deformaciones y desplazamientos no son lineales. Es decir, este análisis considera que las propiedades del sistema (como la rigidez, amortiguamiento o fuerza de resistencia) pueden cambiar con las condiciones del sistema o las amplitudes de la respuesta.	Propiedades dinámicas	Rigidez no lineal
		Análisis no lineal	Metodología tiempo – historia
		Sistema estructural	Sistema de pórticos
		Modelos de comportamiento no lineal de los materiales	Modelo no lineal del concreto y del acero
<b>Variable dependiente</b>  <b>Distribución de energía sísmica en una estructura de 4 niveles</b>	Se define como la energía generada en un contexto de la no linealidad de los componentes del sistema estructural de la edificación, la cual produce desplazamientos en la estructura en función de la fuerza,	Desplazamientos	Derivas en los niveles de la edificación
		Fuerzas de corte	Fuerza de corte en el pórtico de la edificación

Nota. Las variables son representadas junto a sus dimensiones.

### **3.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

#### **3.4.1. Procedimiento**

La investigación realizada, posee las etapas siguientes:

- **Etapa 1:** Recopilación de datos, provenientes de los planos y cálculos estructurales, los cuales nos ayudaron a ver cómo se distribuye la energía en la edificación estudiada.
- **Etapa 2:** Obtención de sismos nacionales e internacionales, para verificar el comportamiento de la estructura.
- **Etapa 3:** Aplicación de programas para ver el análisis comparativo de los hallazgos obtenidos de la respuesta sísmica en un pórtico de 4 niveles.
- **Etapa 4:** En esta etapa se interpretan los resultados obtenidos del análisis, con el objetivo de determinar cómo la edificación absorbe y disipa la energía sísmica.

#### **3.4.2. Técnicas**

En este estudio, se emplearán principalmente las siguientes técnicas:

- Consulta y búsqueda de información sobre viviendas de 4 niveles en Tacna.
- Recolección de datos sísmicos reales.
- Análisis documental normativo y técnico.
- Modelamiento y procesamiento de datos.

#### **3.4.3. Instrumentos**

Los dispositivos y/o herramientas a utilizar serán:

- Cuestionario para obtener el expediente de una vivienda de 4 niveles
- Páginas web del CISMID (Perú) y del PEER Ground Motion Database (EE. UU.).
- Reglamento nacional de edificaciones (E.020, E.030, E.060 y E.070) y reglamentos internacionales como ACI -318, ASCE 41-17, y ASCE 41-30
- Microsoft Office, Software SAP2000, Opeenseepy, AutoCAD 2024, Software Seismo signal, Software Seismo Match.

## Resultados

### 4.1. Descripción del Trabajo de Campo

La construcción está ubicada estratégicamente en la Av. Cusco, Cerca y al costado del supermercado Plaza Vea En pleno centro de la ciudad de Tacna, lo que le otorga una posición privilegiada en el distritito provincia y región de Tacna.

El terreno destinado para este proyecto posee un área total igual a 127.5 metros cuadrados, contando los 4 pisos suman en total 510 metros cuadrados más una azotea.

Esta edificación encontró su culminación para el año 2023, la estructura tiene un sistema estructural basado en pórticos de concreto armado tanto en el sentido del eje “x” como en el eje de sentido “y”, además de poseer una altura igual a 17 metros contando con una planta típica cuyas medidas son de 17 metros de largo por 5 metros de ancho.

### Figura 10

*Ubicación de la edificación de estudio*



*Nota.* Las variables son representadas junto a sus dimensiones.

#### **4.1.1. Área del Terreno y Linderos**

El lote ubicado muy cerca a al centro de Tacna esta delimitada por los siguientes linderos y medidas perimétricas:

- Frente: Colinda con la Av. Cusco, en un tramo recto de 68.20 metros lineales.
- Lado derecho: Colinda con la Calle Tacna, en un tramo recto de 50.40 metros lineales.
- Lado izquierdo: Colinda con un área cedida para vías (pasaje peatonal), en una línea quebrada de dos tramos: uno de 27.04 metros lineales y otro de 56.25 metros lineales.
- Fondo: Colinda con la Calle Sir Jones de 30.66 metros lineales.

#### **4.2. Modelamiento y análisis lineal de la Edificación**

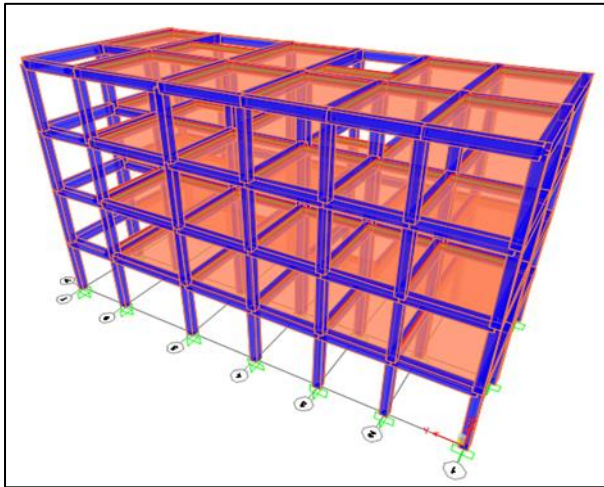
El modelo matemático de la edificación de cuatro niveles se desarrolló utilizando el software SAP2000, tomando como base los planos estructurales proporcionados, para la representación de los distintos elementos estructurales, las columnas, vigas y elementos de borde fueron definidos como elementos tipo frame, las losas se modelaron mediante elementos tipo membrana, simulando de manera apropiada las losas aligeradas unidireccionales.

Asimismo, se incorporaron brazos rígidos de 0.5 m en los extremos de vigas y columnas para mejorar la distribución de rigidez en las conexiones. En el caso de las escaleras, estas no fueron modeladas directamente; en su lugar, se realizó un metrado de cargas y se colocó el peso equivalente en la losa donde descansa, evitando así efectos de torsión.

Finalmente, se asignaron diafragmas rígidos a cada nivel para reflejar con precisión cómo se comportan las losas al interactuar con cargas laterales. Adicionalmente, en los soportes del primer nivel se aplicaron restricciones de empotramiento.

**Figura 11**

*Modelado en 3D de la edificación en SAP 2000*



*Nota.* Se muestran las columnas y vigas en color azul y las losas en color naranja

#### **4.2.1. Características de los materiales**

Para representar las cualidades mecánicas del concreto empleado en la evaluación estructural podemos apreciar la tabla 3, estos valores corresponden a un concreto convencional, y son fundamentales para la definición de la repuesta de las unidades estructurales en los programas que se usaron para el análisis y modelado respectivo.

**Tabla 3**

*Propiedades del concreto*

PROPIEDADES DEL CONCRETO	
Resistencia a la compresión ( $f_c$ )	210 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad ( $E_c$ )	15000 ( $f_c$ ) <sup>1/2</sup>
Módulo de Poisson ( $\mu_c$ )	0.15
Peso específico	2400 kg/m <sup>3</sup>

*Nota.* Concreto de resistencia  $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ , típico en edificaciones convencionales según la norma E.060.

De la misma forma se detalla las cualidades mecánicas del acero, el cual se usa principalmente como refuerzo, al igual que para el concreto es muy importante conocer la respuesta del acero frente a esfuerzos de tracción.

**Tabla 4***Propiedades del acero*

PROPIEDADES DEL ACERO	
Esfuerzo de fluencia ( $f_y$ )	4200 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad (E)	2000000 kg/cm <sup>2</sup>
Peso específico ( $\gamma$ )	7850 kg/m <sup>3</sup>

*Nota.* Las propiedades corresponden a acero tipo A615 Grado 60

#### **4.2.2. Cargas Unitarias**

El peso volumétrico considerado para el concreto armado de 2400 kg/m<sup>3</sup>. Finalmente, para la azotea, se aplica una sobrecarga de 100 kg/m<sup>2</sup>. En cuanto al techo, se asume una carga permanente de 300 kg/m<sup>2</sup>. Adicionalmente, la sobrecarga de uso establecida es de 200 kg/m<sup>2</sup>, y la carga imputable a la tabiquería repartida asciende a 530 kg/m<sup>2</sup>.

#### **4.2.3. Configuración Estructural**

Hace referencia a la configuración del edificio, esta es clave para entender cómo se ordenan y distribuyen los diversos elementos que la componen. Esta disposición es la que determina la forma en que interactúan estos elementos. También nos permite ver como las cargas constantes, cargas modificables y solicitaciones dinámicas como las generadas por sismos o el viento, son soportadas y transmitidas por los componentes de la estructura.

- **Zonificación, E.030 (Art.10)**

**Tabla 5**

*Zonificación de la edificación*

Zonificación	
Departamento	Tacna
Provincia	Tacna
Distrito	Tacna
Zona sísmica	4,00
Z	0,45 g

*Nota.* La Tabla muestra la zonificación sísmica según la Norma E.030, Artículo 10, correspondiente a la región de Tacna. Se detalla que el departamento, provincia y distrito de Tacna se encuentran dentro de la Zona Sísmica 4, asignándose un factor de zona  $Z = 0.45g$ .

- **Condiciones geotécnicas, E.030 (Art.12)** Para realizar un adecuado análisis sismorresistente de una estructura, es indispensable conocer las características del suelo donde se emplaza. La clasificación del terreno, exigida por el artículo 12 de la Norma E.030, permite determinar su comportamiento ante sismos. En este caso, el perfil del suelo corresponde a la categoría S2, identificada por su rigidez media y compuesta por arena gruesa o grava arenosa de densidad intermedia, así como por materiales cohesivos compactos.
- **Categoría del edificio, E.030 (Art. 15)** Para esta edificación, clasificada dentro de la Categoría C, correspondiente a edificaciones comunes según la Norma Técnica E.030, se asigna un factor de uso o importancia  $U = 1.0$ . Esta categoría incluye construcciones destinadas a fines habitacionales, comerciales u otros usos generales.
- **Coefficiente básico de reducción de fuerzas sísmicas, E.030 (Art. 18)** En ambas direcciones principales (X e Y), la edificación cuenta con un sistema estructural de pórticos elaborado en concreto armado, el cual permite disipar energía sísmica de manera eficiente. Este comportamiento se representa mediante un factor de reducción

sísmica  $R_{ox} = R_{oy} = 8$ , establecido según los parámetros normativos aplicables a este tipo de sistemas.

#### 4.2.4. *Asignación de cargas*

Al modelo estructural realizado se le añadió cargas muertas y cargas vivas, la carga muerta considera el peso propio de las losas aligeradas, así como el peso del piso terminado, esta carga se mantuvo constante en los cuatro niveles.

En cuanto a la carga viva, se asignaron  $0.20 \text{Tnf/m}^2$  en los tres primeros niveles, correspondientes a áreas de uso común, para el cuarto nivel es azotea, se consideró una carga viva reducida de  $0.10 \text{Tnf/m}^2$ , esto se puede apreciar mejor en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Cargas vivas incorporadas en el modelado*

CARGA VIVA	SUB TOTAL
S/C Uso Hotel 1 al 3 piso	0.2Tnf
S/C Uso Hotel 4 piso	0.1Tnf

*Nota.* La carga muerta total por nivel es de  $0.4 \text{Tnf}$

#### 4.2.5. *Análisis Modal*

Para el análisis modal primero se definió la fuente de masa sísmica considerando el 100% de la carga muerta y el 25% de la carga viva de acuerdo a lo indicado en la Norma E-030.

Así mismo, se consideraron 3 modos de vibración por nivel dando un total de 12 modos de vibración de manera que la suma de las masas sea superior al 90%. En la tabla 7 se resume los modos de vibración y masas participativas donde se observa que los primeros modos de vibración presentan una participación significativa del componente rotacional, indicando la presencia de efecto torsional. En cuanto al porcentaje de masa participativa se aprecia que si cumple el requerimiento de superar el 90%.

**Tabla 7***Periodos y masas participantes*

Modo	Periodo sec	UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRZ
Modo 1	0.410	0.000	0.890	0.006	0.000	0.890	0.006
Modo 2	0.382	0.784	0.002	0.110	0.785	0.892	0.116
Modo 3	0.364	0.111	0.004	0.780	0.896	0.896	0.896
Modo 4	0.143	0.000	0.082	0.001	0.896	0.977	0.896
Modo 5	0.134	0.071	0.000	0.011	0.967	0.978	0.907
Modo 6	0.127	0.011	0.000	0.071	0.978	0.978	0.978
Modo 7	0.095	0.000	0.018	0.000	0.978	0.997	0.978
Modo 8	0.088	0.016	0.000	0.003	0.994	0.997	0.981
Modo 9	0.084	0.003	0.000	0.016	0.997	0.997	0.997
Modo 10	0.078	0.000	0.003	0.000	0.997	1.000	0.997
Modo 11	0.073	0.003	0.000	0.000	0.999	1.000	0.997
Modo 12	0.069	0.001	0.000	0.003	1.000	1.000	1.000

*Nota.* La tabla muestra los 12 modos de vibración de la edificación

**4.2.6. Aceleración espectral**

Para el análisis sísmico se utilizaron los factores estipulados en la norma NTP E.030 (SENCICO, 2018) como muestra en la tabla 8.

**Tabla 8***Parámetros sísmicos*

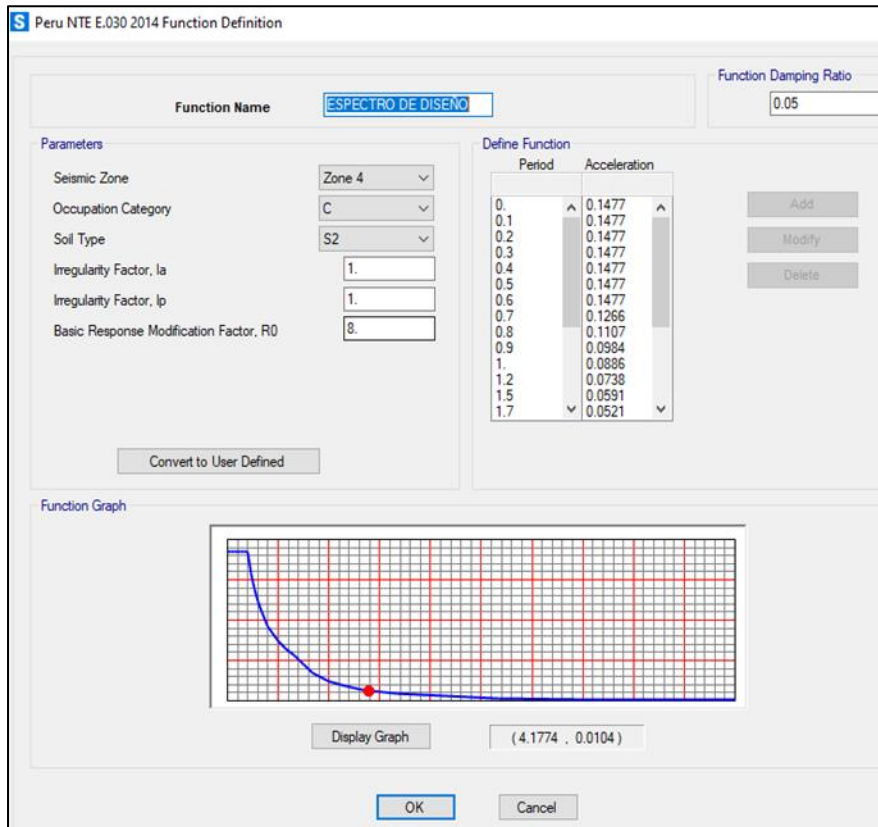
PARAMETROS SISMICOS	FACTOR	
Factor de zona (Zona 4)	Z	0.45
Factor de categoría de edificación (C)	U	1
Parámetro de suelo (S2)	S	1.05
Periodo corto	Tp	0.6
Periodo largo	Tl	2
Irregularidad en altura	Ia	1
Irregularidad en planta	Ip	1
Coefficiente de reducción (pórticos)	Rx	8
Coefficiente de reducción (pórticos)	Ry	8

*Nota.* Se utilizaron los mismos parámetros sísmicos para las direcciones X e Y.

Para los espectros de pseudo aceleraciones se utilizó un factor de reducción R igual a 8 siendo este el producto del factor R de pórticos y la irregularidad en planta.

**Figura 12**

*Ingreso de los parámetros sísmicos al SAP 2000*



*Nota.* Se observa el espectro de respuesta

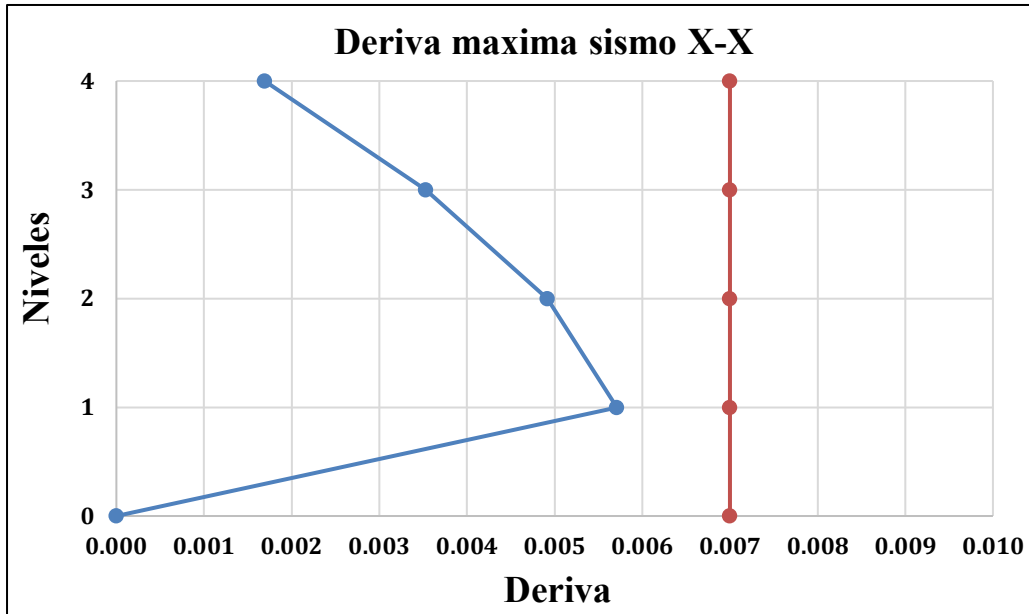
#### 4.2.6.1. Verificación de derivas

Para la verificación de derivas se consideró que, por tratarse de una edificación regular, era necesario aplicar el factor  $0.75R$ , tal como establece la Norma Técnica Peruana NTP E.030. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 20, donde se observa que la deriva máxima en el sentido X-X fue de 0.0058 y en el sentido Y-Y alcanzó 0.0064, valores que se encuentran por debajo del límite normativo de 0.007. Este comportamiento confirma que la estructura presenta un adecuado nivel de rigidez, atribuible a la configuración de pórticos de concreto

armado que otorgan una mayor resistencia a desplazamientos laterales, siendo esta rigidez más marcada en la dirección Y-Y que en la dirección X-X.

**Figura 13**

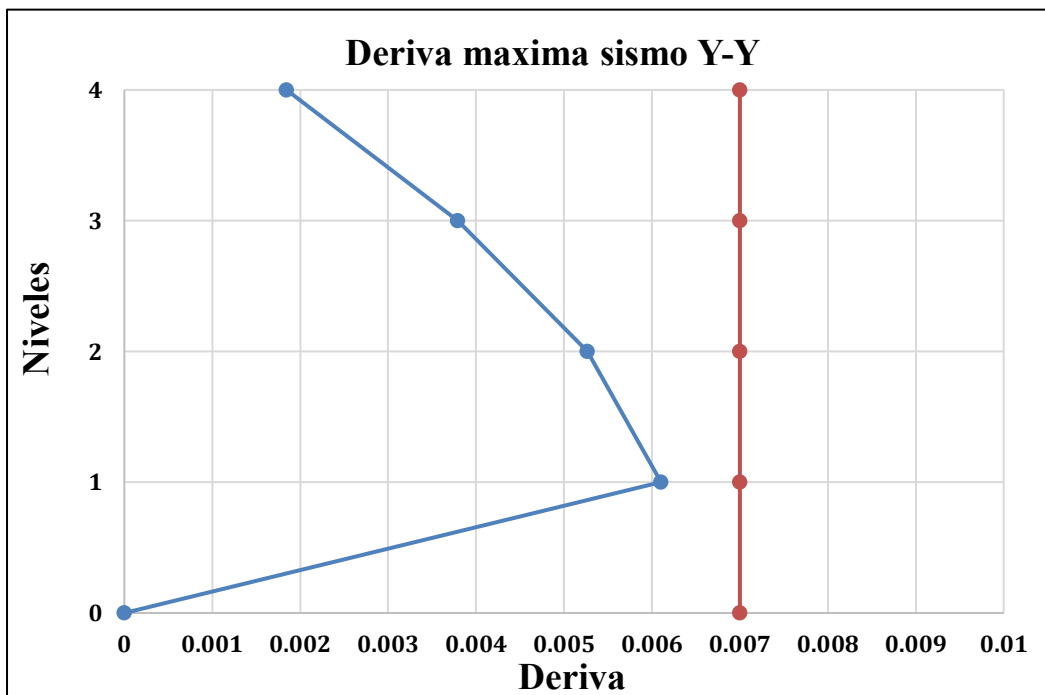
*Deriva máxima del sismo en dirección X*



*Nota.* La deriva en dirección x-x no excede el valor de 0.007, según la norma E-030.

**Figura 14**

*Deriva máxima del sismo en la dirección Y*



*Nota.* La deriva en dirección x-x no excede el valor de 0.007, según la norma E-030.

### 4.3. Tratamiento de Registros Sísmicos

Para la realización del análisis dinámico no lineal tiempo historia, los registros sísmicos seleccionados deben ser escalados de acuerdo con la Norma E.030, a fin de que su respuesta espectral sea compatible con el espectro de diseño correspondiente al lugar donde se encuentra ubicada la edificación, este proceso asegura que la energía sísmica introducida en el modelo represente adecuadamente las condiciones sísmicas exigidas por la normativa.

#### 4.3.1. Extracción de Registros Sísmicos

Para realizar el análisis no lineal tiempo historia se han extraído registros sísmicos los cuales deben ser espectros afines con el espectro de diseño de la norma E-030, primero del CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres), del cual se han extraído 5 registros sísmicos de la costa peruana y luego del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) Ground Motion Database de donde se han extraído 10 registros sísmicos de otros países.

**Tabla 9**

*Registros Sísmicos extraídos del CISMID y del PEER*

ID	Terremoto	Fecha	Estación	Magnitud (Mw)	Mecanismo	Duración (s)
1	Ica	2007-08-15	ICA002	7.0	Reverse	121.01
2	Moquegua	2001-06-23	MOQ001	6.9	Reverse	198.91
3	Lima	1966-09-17	PRQ	8.1	Normal/Reverse	65.64
4	Lima	1970-05-31	PRQ	6.6	Normal/Reverse	45.08
5	Tacna	2001-07-07	TAC001	6.5	Reverse	156.45
6	Darfield-NewZeland	2010-04-12	SPFS	7.0	Strike slip	139.98
7	El Mayor-Mexico	2010-08-13	Sam W. Stewart	7.2	Strike slip	199.98
8	San Simeón CA	2003-04-06	Lopez Lake Grounds	6.52	Reverse	59.99
9	Duzce-Turkey	1999-05-09	Lamont 362	7.14	Reverse	43.15
10	Hector Mine	1999-03-06	Amboy	7.13	Reverse	59.94
11	Kern County	1952-04-05	Taft Lincoln School	7.36	Reverse	54.34
12	Landers CA	1992-09-12	Fun Valley	7.28	Strike slip	39.98
13	Loma Prieta	1989-03-11	Forest Fire Station	6.93	Reverse/Oblique	39.14
14	Northridge 01-CA	1994-01-17	Fremont School	6.69	Reverse	59.98
15	Niigata-Japan	2004-04-13	NIG015	6.63	Reverse	167.66

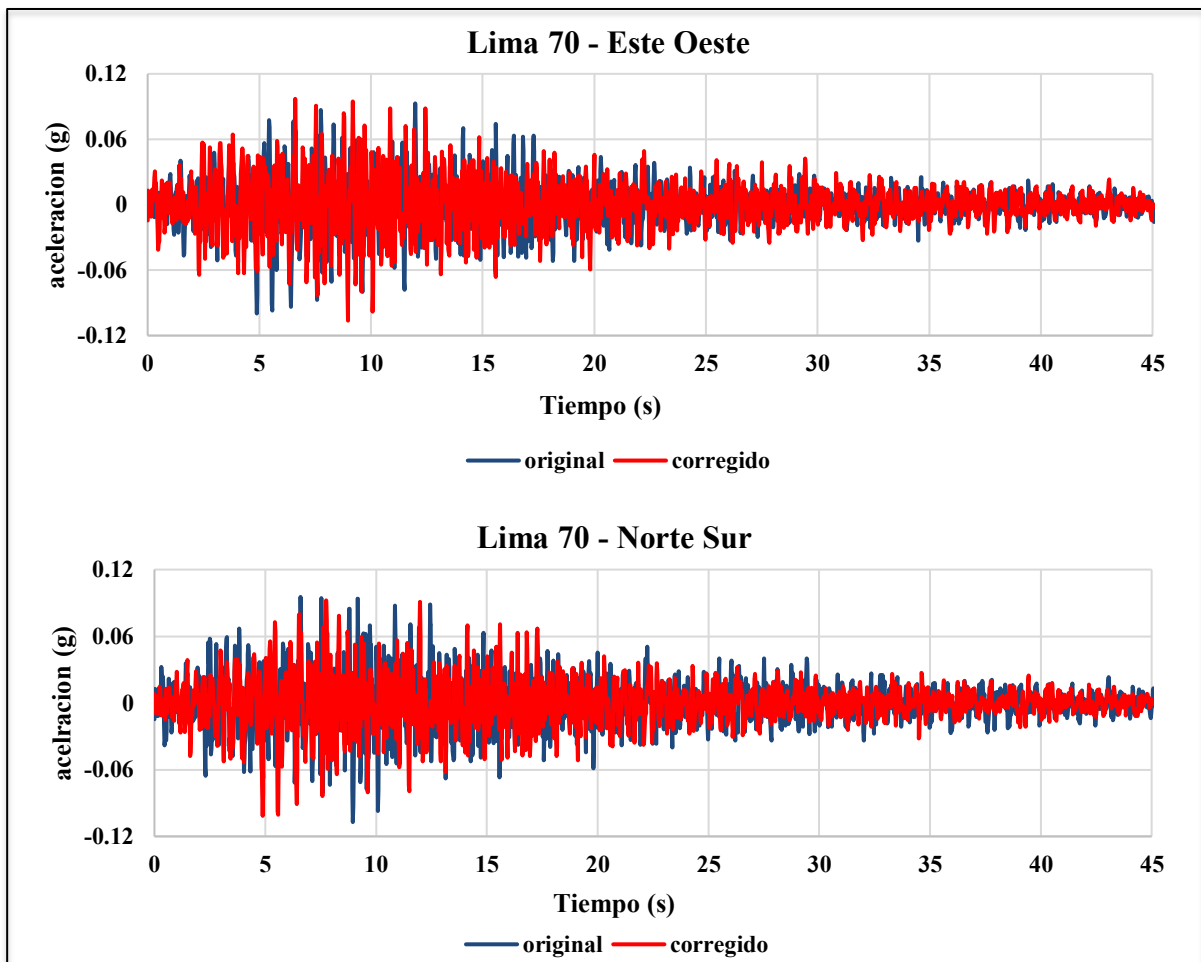
*Nota.* Todos los registros son de diferentes lugares.

### 4.3.2. Filtrado y Corrección de los registros sísmicos

Ya extraídos los 15 registros del CISMID y del PEER estos podrían contener ruido ambiental u otro tipo de interferencia que no corresponde al sismo todas estas interferencias deben ser eliminadas para ello usaremos la herramienta seísmo signal donde filtraremos y corregiremos por línea base cada registro sísmico en las componentes N-S (Norte – Sur) y E-O (Este-Oeste) tal y como se puede apreciar en la figura 15:

**Figura 15**

*Registro sísmico de Lima 70*



*Nota.* Todos los 15 registros sísmicos fueron filtrados y corregidos

### 4.3.3. Definición del Espectro Objetivo Según la Norma E-030

Para construir el espectro objetivo debemos de tener los parámetros sísmicos que le corresponde a nuestra zona de estudio la cual es la ciudad de Tacna, estos parámetros podremos encontrarlos en la norma E-030, en la tabla 10 podemos apreciar estos parámetros, con los cuales finalmente hemos construido el espectro objetivo que se puede apreciar en la figura 16.

**Tabla 10**

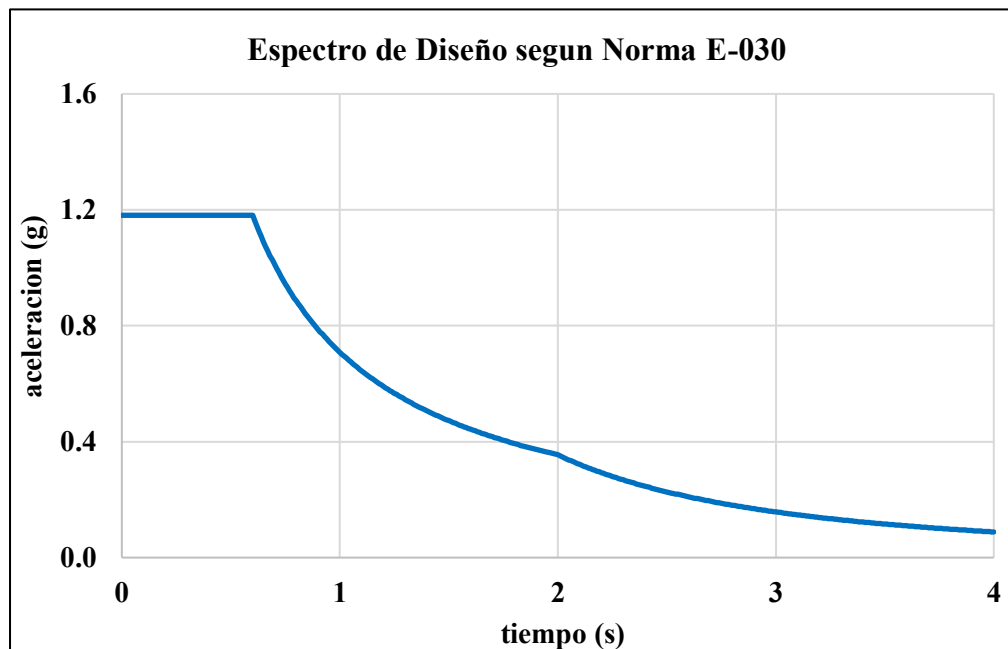
*Parámetros sísmicos de la zona de estudio*

Parámetros Sísmicos		
Factor de uso	U	1
Factor de zona	Z	0.45
Perfil del suelo	S2	1.05
Periodos	TP (s)	0.6
	TL (s)	2
Factor de reducción	Rx	1
	Ry	1

*Nota.* Todos los registros fueron limpiados y corregidos

**Figura 16**

*Espectro de la Zona de estudio*



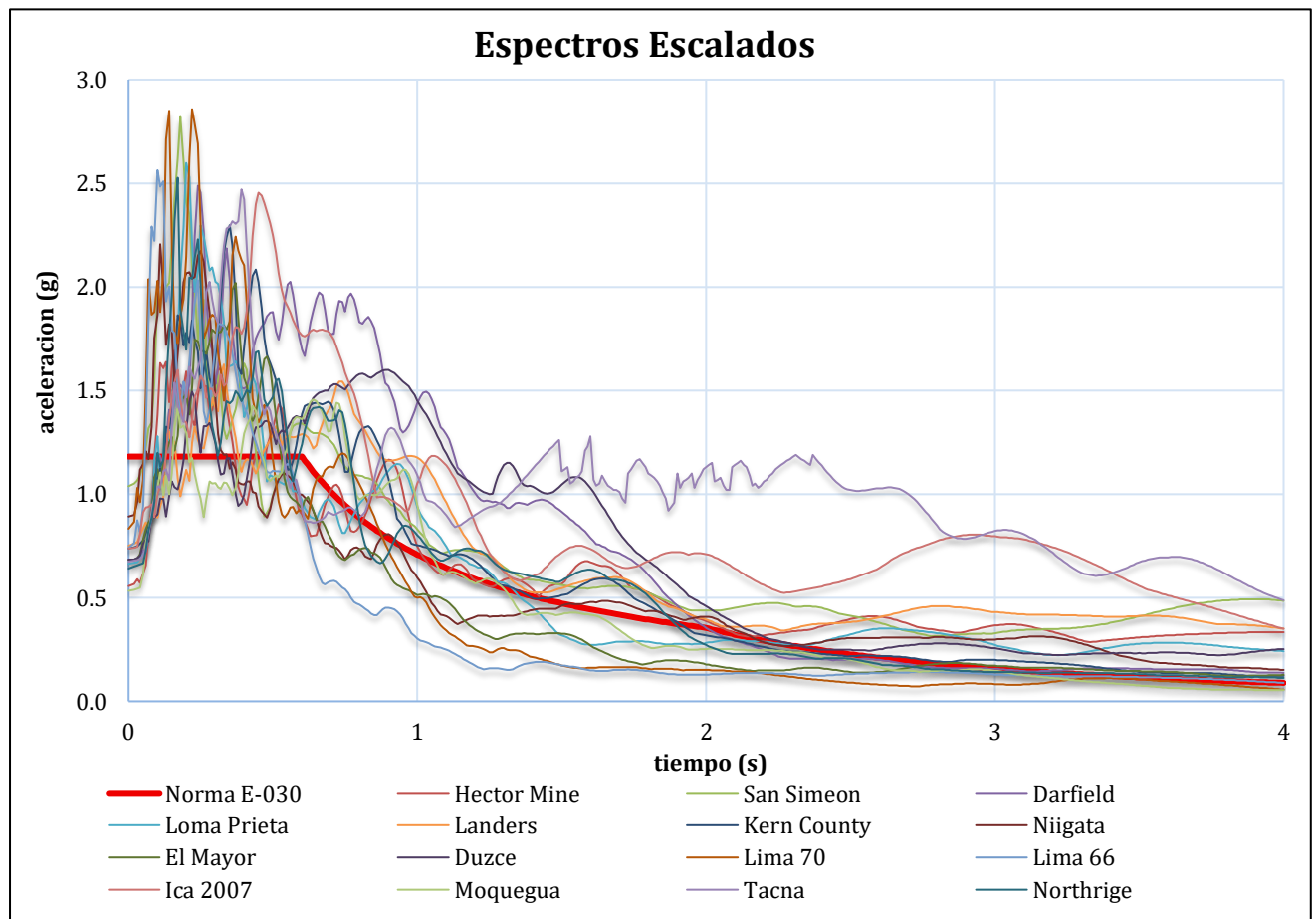
*Nota.* Todos los espectros serán escalados a este espectro de la norma

#### 4.3.4. Escalamiento de Registros Sísmicos

Se escalarán los espectros de los registros sísmicos que ya fueron limpiados y corregidos, al espectro de la norma E-030 el cual se puede apreciar en la figura 16, quedando finalmente el promedio de los 15 espectros escalados finales como se puede apreciar en la figura 17.

**Figura 17**

*Promedio de los 15 espectros extraídos*

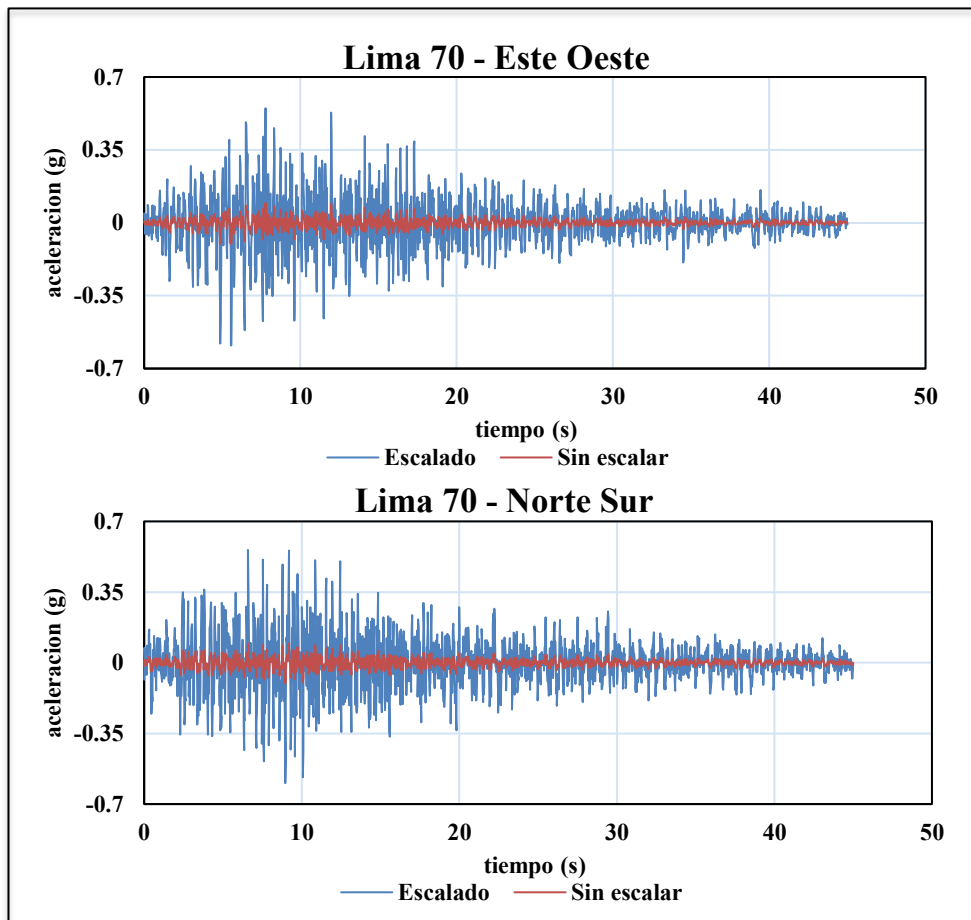


*Nota.* Los 15 espectros escalados al espectro de la Norma E-030

Una vez ajustados los espectros de los 15 registros sísmicos, se determinó el factor de escala con el cual se trabajará en las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur. Dicho factor fue aplicado a los registros sísmicos originales en sus respectivas componentes, obteniéndose así los registros escalados en ambas direcciones, como se muestra en la Figura 18.

**Figura 18**

*Registro Escalado de Lima 70*



*Nota.* Registro escalado de Lima 70 en ambos sentidos.

#### 4.3.5. *Introducción de los Registros Sísmicos en el OpenSeesPy*

Para introducir los registros sísmico-escalados en ambos sentidos Norte-Sur y Este-Oeste, hallaremos la resultante máxima para eso trabajaremos ambas componentes con la siguiente función.

$$A1(\theta) = aE \cdot \sin(\theta) + aN \cdot \cos(\theta)$$

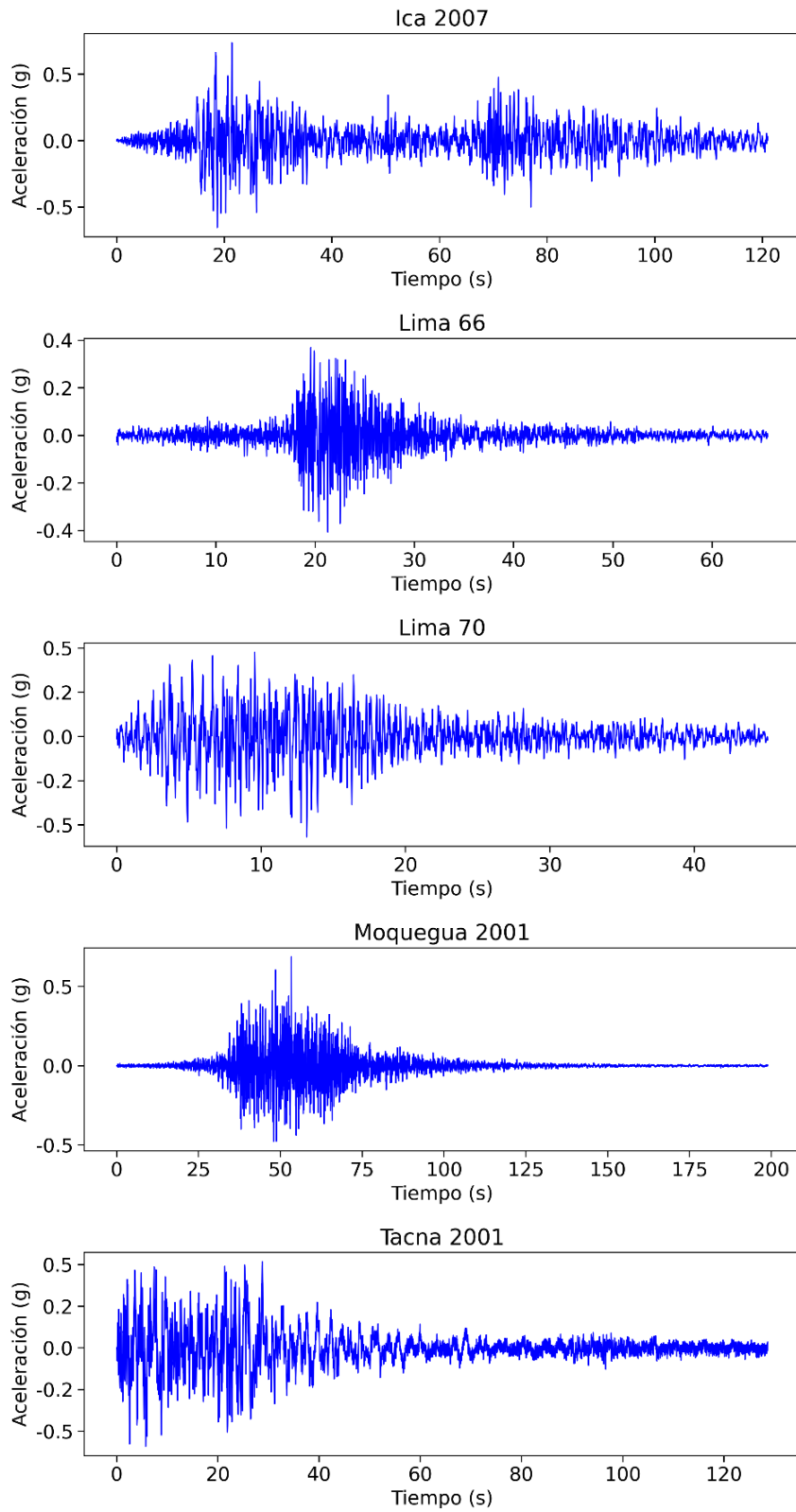
aE: componente Este-Oeste (E-O)

aN: componente Norte-Sur (N-S)

$\theta$ : ángulo de rotación respecto al eje (en grados sexagesimales)

## Figura 19

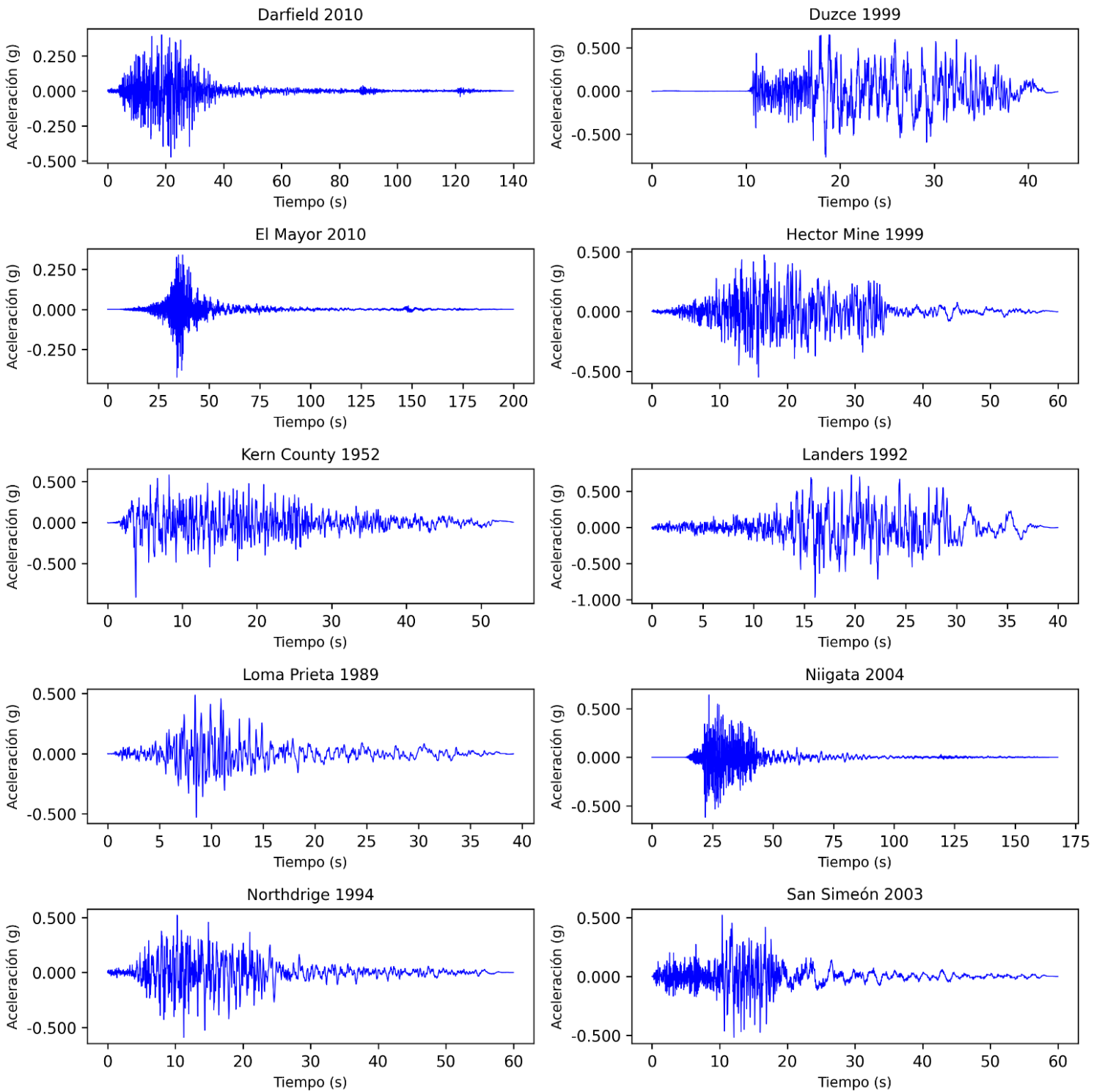
### Registros Sísmicos Nacionales escalados



*Nota.* Los 5 registros nacionales fueron escalados al espectro de la Norma E-030

**Figura 20**

*Registros Internacionales escalados*



*Nota.* Los 10 registros internacionales fueron escalados al espectro de la Norma E-030

#### **4.4. Análisis Dinámico no Lineal Tiempo Historia en OpenSeesPy**

El mencionado análisis permite evaluar la respuesta estructural frente a sismos considerando efectos inerciales, no linealidades de material y cambios en la geometría durante la carga. En esta etapa se aplica una acción sísmica al modelo, y se calcula su comportamiento tiempo a tiempo, lo que permite identificar concentraciones de daño, mecanismos de plastificación y posibles fallas. OpenSeesPy ofrece herramientas versátiles para implementar este tipo de análisis de manera eficiente y personalizable mediante programación en Python.

##### **4.4.1. Definición de librerías en Python**

Para el modelado y análisis estructural de la edificación, se utilizó Python, que es un lenguaje que sirve para programar, junto a la librería OpenSeesPy, que permite realizar análisis numéricos avanzados en estructuras en el lenguaje ya mencionado. Al inicio del desarrollo, se realizó la importación de las librerías necesarias para definir el modelo, ejecutar el análisis y visualizar los resultados. Se importó la librería OpenSeesPy, en la cual se creó el código necesario para construir el modelo de la edificación, y posteriormente para ejecutar el análisis dinámico tiempo historia en el mismo.

Asimismo, se incorporó `openseespy.postprocessing.ops_vis` como `opsv`, útil para la representación gráfica del modelo y de los desplazamientos o deformadas.

Para el manejo de datos y operaciones numéricas, se utilizaron las librerías `pandas` y `numpy`, fundamentales en la organización de información y el cálculo de matrices o vectores.

Luego, se incorporaron herramientas de visualización como “`matplotlib.pyplot`” y “`mpl_toolkits.mplot3d`”, que permitieron graficar tanto en dos como en tres dimensiones, facilitando la interpretación visual del comportamiento estructural de la edificación, como se puede apreciar en la figura 21.

## Figura 21

*Inserción de librerías y sistema de unidades*

```
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)
```

*Nota.* La figura muestra el uso del software OpenSeesPy.

### 4.4.2. Introducción de Nodos

Se procedió a la definición de los nodos que conforman la geometría de la edificación, para ello, se utilizó la función “np.loadtxt” de la librería NumPy para cargar las coordenadas nodales desde un archivo externo denominado “nodosfinal.txt”, lo que permitió automatizar la lectura de los datos y facilitar la creación de nodos. Cada nodo fue definido con su respectiva coordenada en el espacio tridimensional (X, Y, Z) mediante el comando “ops.node”.

Además, se definieron manualmente un total de 146 nodos en un archivo aparte, de los cuales 21 corresponden a la base y los restantes a los pisos superiores de la edificación, incluyendo los 4 pisos y la azotea, los nodos maestros, vienen a ser nodos claves en cada nivel del edificio para la posterior aplicación de diafragmas rígidos. Los nodos maestros fueron asignados con sus respectivas coordenadas, el primer nivel cuenta con el nodo maestro 143, el segundo nivel con el nodo 144, el tercer nivel con el nodo 145 y el último nivel con el nodo 146, asegurando una representación adecuada del comportamiento estructural.

## Figura 22

### *Introducción de Nodos y Nodos Maestros*

```
# --- Leer nodos desde archivo ---
nodos = np.loadtxt('nodosfinal.txt', delimiter=',')
num_nodos = len(nodos)
# --- Inicializar modelo OpenSees ---
ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 3, '-ndf', 6)
# --- Crear nodos desde archivo ---
for i in range(num_nodos):
    nodo_id = int(nodos[i, 0])
    x, y, z = nodos[i, 1:4]
    ops.node(nodo_id, x, y, z)
# --- Crear nodos maestros ---
nodos_maestros = {
    143: (4000.0, 8900.0, 2800.0),
    144: (4000.0, 8900.0, 5600.0),
    145: (4000.0, 8900.0, 8400.0),
    146: (4000.0, 8900.0, 11200.0)
}
for nodo_id, coord in nodos_maestros.items():
    ops.node(nodo_id, *coord)
```

*Nota.* Lectura de nodos desde archivo.txt y definición de nodos

Seguidamente, se implementaron las restricciones de apoyo en el soporte de la edificación. En este caso, se consideró que los primeros 21 nodos corresponden a apoyos completamente empotrados, por lo que se asignaron seis grados de libertad restringidos el numero uno indica al programa empotramiento ( $fix = [1, 1, 1, 1, 1, 1]$ ), lo cual impide cualquier desplazamiento y giros en dichos nodos, la figura 23 nos permite apreciar estas restrcciones.

**Figura 23**

*Nodos empotrados en la base de la edificación*

Nodo	X	Y	Z	Tipo Restricciones	(DX,DY,DZ,RX,RY,RZ)
1	7510.0	0.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
2	7510.0	2630.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
3	7510.0	5130.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
4	7510.0	7780.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
5	7510.0	10780.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
6	7510.0	14430.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
7	7510.0	17010.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
8	4630.0	0.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
9	3380.0	0.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
10	3380.0	2630.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
11	3380.0	5130.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
12	3380.0	7780.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
13	3380.0	10780.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
14	3380.0	14430.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
15	3380.0	17010.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
16	0.0	0.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
17	0.0	2630.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
18	0.0	5130.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
19	0.0	7780.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
20	0.0	10780.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
21	0.0	14430.0	0.0	Empotrado	[1, 1, 1, 1, 1, 1]

*Nota.* La figura muestra el uso de 21 nodos de empotramiento, donde el valor 1 representa las restricciones en la base.

La definición de diafragmas rígidos se facilitó mediante la identificación de nodos maestros en cada nivel, lo cual permitirá posteriormente aplicar condiciones de diafragma que vinculen nodos secundarios con su nodo maestro respectivo, logrando que todos se desplacen como un solo conjunto en el plano del nivel correspondiente.

Se establecieron restricciones parciales en los nodos que no pertenecen a la base del edificio. Estas restricciones permiten simular el comportamiento de ciertos grados de libertad mientras se mantienen otros libres, lo cual es útil para representar apoyos intermedios o condiciones especiales en la estructura. En este caso, a los nodos que no corresponden a la base, los nodos mayores a 21 se les aplicaron restricciones en los grados de libertad correspondientes al desplazamiento en Z y las rotaciones en X e Y, de la siguiente forma (fix = [0, 0, 1, 1, 1, 0]).

**Figura 24**

*Configuración de restricciones en la base de la estructura*

```
# --- Aplicar restricciones y registrar ---
for i in range(num_nodos + len(nodos_maestros)):
    nodo = i + 1
    if nodo <= 22:
        fix = [1, 1, 1, 1, 1, 1]
        tipo = "Empotrado"
    else:
        fix = [0, 0, 1, 1, 1, 0]
        tipo = "Parcial (GDL 3,4,5)"
    ops.fix(nodo, *fix)
    # Obtener coordenadas
    if nodo <= num_nodos:
        x, y, z = nodos[nodo - 1, 1:4]
    else:
        x, y, z = nodos_maestros[nodo]
    # Guardar en tabla
    tabla_restricciones.append({
        "Nodo": nodo,
        "X": x,
        "Y": y,
        "Z": z,
        "Tipo": tipo,
        "Restricciones (DX,DY,DZ,RX,RY,RZ)": fix
    })
```

*Nota.* Aplicación de nodos en la base y en los diferentes niveles

Luego, se añadieron diafragmas rígidos a los diferentes niveles del edificio, esto se hizo con el comando "ops.rigidDiaphragm", el cual conecta los movimientos en el plano (en las direcciones X, Y y rotación en Z) de todos los nodos de un nivel a un nodo maestro. En este modelo, se definieron cuatro diafragmas rígidos, uno nodo maestro por cada nivel, cada diafragma tiene un conjunto de nodos secundarios y también contiene un nodo maestro específico.

## Figura 25

*Creación de diafragma por cada nivel*

```
# --- Mostrar tabla en consola ---  
df = pd.DataFrame(tabla_restricciones)  
print(df.to_string(index=False))  
# --- Diafragmas rígidos ---  
ops.rigidDiaphragm(3, 143, *range(23, 53))  
ops.rigidDiaphragm(3, 144, *range(53, 83))  
ops.rigidDiaphragm(3, 145, *range(83, 113))  
ops.rigidDiaphragm(3, 146, *range(113, 143))
```

*Nota.* Asignación de nodos maestros en los diafragmas

### 4.4.3. Asignación de cargas y transformación los elementos

Luego de definir la geometría básica del modelo y establecer las restricciones y diafragmas rígidos, se cargó en archivos externos la totalidad de los nodos y elementos estructurales. Para ello, se utilizó nuevamente la función “np.loadtxt” de la librería NumPy, la cual permitió leer los archivos “nodosfinal.txt” y “elementos\_final\_01.txt.”, el cual contiene, la ubicación de todos los nodos y como se conectan los elementos más representativos de la estructura como son las columnas, además de las vigas.

A partir de los datos cargados, cada nodo fue identificado por su ID y vinculado a su correspondiente posición espacial en el eje X, Y y Z. Esto facilitó el acceso rápido a las coordenadas de cada nodo durante el proceso de visualización.

## Figura 26

### Creación de nodos y elementos

```
# Cargar TODOS los nodos y elementos
nodos = np.loadtxt('nodosfinal.txt', delimiter=',')
elementos = np.loadtxt('elementos_final_01.txt', delimiter=',')
# Crear diccionario con coordenadas por ID
coord_nodos = {int(n[0]): n[1:4] for n in nodos}
# Plot
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

for e in elementos:
    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')
    except KeyError as err:
        print(f"Nuevo nodo no encontrado: {err}") # Te avisa qué nodo falta

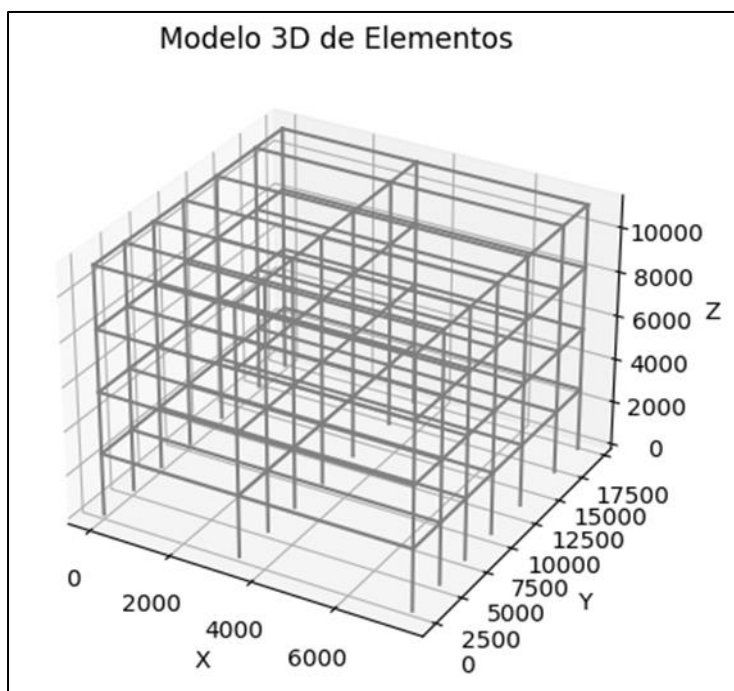
ax.set_xlabel('X')
ax.set_ylabel('Y')
ax.set_zlabel('Z')
plt.title("Modelo 3D de Elementos")
plt.show()
```

*Nota.* Importación de bibliotecas en Python utilizadas para la visualización 3D del modelo estructural

El resultado fue una visualización tridimensional del modelo estructural, esta representación gráfica fue clave para confirmar que la geometría había sido definida correctamente antes de proceder con la asignación de propiedades físicas y la ejecución del análisis.

**Figura 27**

*Modelo Inicial de la edificación en 3D*



*Nota.* Modelo en 3D según las coordenadas

Un paso fundamental para establecer cómo se orientan los sistemas locales de los elementos respecto al sistema de coordenadas global, para ello, se utilizó el comando “ops.geomTransf”, que permite especificar el tipo de transformación geométrica y el eje local del elemento que debe alinearse con un eje global. en este caso, se definieron dos transformaciones lineales del tipo 'Linear'

La primera transformación (ID = 101) se aplicó a las columnas, cuya orientación local se alineó con el eje global Y hacia abajo, mediante el vector  $[0, -1, 0]$ . Esta configuración indica que el eje local Z del elemento (usado para el análisis) coincide con el eje global Y, lo cual es coherente con la orientación vertical descendente típica de columnas.

La segunda transformación (ID=102) fue utilizada para las vigas, cuya orientación se alinea con el eje global Z, usando el vector  $[0, 0, 1]$ . Esto permitió que el eje local Z de las vigas coincidiera con el eje vertical global.

## Figura 28

### *Transformación de elementos*

```
# El eje z del elemento (local) con que eje global coincide
ops.geomTransf('Linear', 101, 0, -1, 0); # Columnas
ops.geomTransf('Linear', 102, 0, 0, 1); # Vigas en eje X e Y
```

*Nota.* Estas transformaciones garantizaron que los elementos estructurales se comportaran correctamente dentro del análisis, respetando la orientación física de cada elemento.

#### **4.4.4. Definición de materiales y secciones fibra**

En esta parte se definió los materiales participantes en el modelo estructural, fundamentales porque nos permite simular con precisión como reaccionaran las unidades que forman parte del concreto reforzado. Se definieron dos tipos principales de materiales uniaxiales utilizando comandos de OpenSeesPy: concreto y acero de refuerzo.

Primero se uso el modelo de Hognestand, para el concreto el cual es muy similar al Concrete01, que representa un comportamiento no lineal con aplastamiento a compresión. Los parámetros utilizados se observan en la figura 29, en cuanto al acero de refuerzo, se empleó el modelo Steel01, un material elastoplástico con endurecimiento cinemático, como se observa en la figura 30.

## Figura 29

### *Asignación de las propiedades a los materiales*

```
# DEFINICIÓN DE MATERIALES:
# Para el concreto
fpc = -20.601 # En MPA = N/mm2
epsc0 = -0.002 # Deformación para f'c (0.002)
Ec = 2*fpc/epsc0
fpcu = 0.85*fpc
epsU = -0.005 # Deformación para la tensión de rotura confinado (conservador)
# Para el acero de refuerzo
Fy = 412
Es = 196200
shr = 0.01
ops.uniaxialMaterial('Concrete01', 1, fpc, epsc0, fpcu, epsU)
ops.uniaxialMaterial('Steel01', 2, Fy, Es, shr)
#-----
```

*Nota.* Definición de las propiedades mecánicas del concreto y acero

Para las secciones fibras, tenemos que ver las dimensiones de la vigas y columnas y para ellos en la parte de estructuras nos detallan dos tipos de columnas, perimetrales y centrales, las perimetrales son de 300x300 mm en los cuatro niveles, y las centrales de 450x350mm en los cuatro niveles, se creó una sección fibra para cada columna, primero se especificó el valor de rigidez torsional GJ para que se pueda desarrollar una correcta transmisión de momentos torsionales, luego se introdujo los datos según el comando “ops.section”, la sección fibra con etiqueta 1, y la rigidez torsional como se muestra en la figura 30.

Por consiguiente, se utilizó el comando patch, en ella se introdujo el material que es el concreto, luego la subdivisión en una malla de 10x10 fibras, y por último la sección de la columna, para el acero se usó el comando layer, donde primero se definió el material, el cual es el acero de refuerzo.

### Figura 30

#### *Creación de las secciones de columna*

```
# Columnas perimetrales C1 300x300 nivel 1 2 3 y 4
GJ1 = 1.01E+13
# 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, -150], *[150, 150])
# layer('straight', matTag, numFiber, areaFiber, *start, *end)
ops.layer('straight', 2, 4, 129, *[-100, -100], *[-100, 100])
ops.layer('straight', 2, 4, 129, *[100, -100], *[100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 129, *[0, -100], *[0, 100])
# Columna central C2 400 x 350 nivel 1, 2, 3 y 4
GJ3 = 2.43E+13
ops.section('Fiber', 2, '-GJ', GJ3)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-200, -175], *[200, 175])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-150, -125], *[-150, 125])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[150, -125], *[150, 125])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -125], *[0, 125])
```

*Nota.* Definición de secciones de columnas mediante modelos de fibras

Por último, se colocaron las barras de refuerzo longitudinal, ubicando las fibras de acero en las posiciones adecuadas a lo largo de la sección (esquinas y centro), como se observa en la figura 31, este mismo procedimiento se realizó para la columna 400x350mm.

Para las vigas según el plano nos detallan dos tipos de vigas, que son de 250x400 mm y 300x350mm, se creó dos secciones fibras para los dos tipos de vigas, para la viga de 250x400mm, primero se especificó el valor de rigidez torsional GJ para que se pueda desarrollar momentos torsionales, luego se introdujo los datos según el comando “ops.section”, para las sección fibra, y la rigidez torsional.

Finalmente, se utilizó el comando ops.patch para definir el concreto de la viga, generando una malla de fibras de 10x10 que representa la sección transversal. Posteriormente, se empleó el comando ops.layer para introducir el material correspondiente al acero de refuerzo. En este paso, se definió el tipo de material y se colocaron las fibras de acero en las posiciones adecuadas dentro de la sección, principalmente en las esquinas y en el eje central, simulando la distribución de los acero longitudinales, este mismo procedimiento se aplicó a la viga con sección transversal de 300x500 mm.

### Figura 31

*Creación de las secciones de viga*

```
# Viga Ext 250x400
GJ4 = 1.13E+13
ops.section('Fiber', 3, '-GJ', GJ4)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -200], *[125, 200])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-95, -140], *[95, -140])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-95, 140], *[95, 140])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-95, 0], *[95, 0])
# Viga Int 300x500
GJ5 = 2.50E+13
ops.section('Fiber', 4, '-GJ', GJ5)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -250], *[150, 250])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-120, -190], *[120, -190])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-120, 190], *[120, 190])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-120, 0], *[120, 0])
#-----
```

*Nota.* Definición de secciones de vigas mediante modelos de fibras

Para crear las secciones elásticas del modelo estructural, se utilizó el comando “ops.section” con el tipo Elastic, con el cual se pudo apreciar como se comportan elásticamente los elementos estructurales. En cada sección se especificaron propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad (E), el área transversal (A), los momentos de inercia respecto a los ejes principales (Iz e Iy), el módulo de corte (G) y el momento de inercia polar (J). Estos parámetros fueron asignados a todas las columnas y vigas, tal como se muestra en la figura 32.

### Figura 32

Asignación de propiedades elásticas a los elementos estructurales

```
# Secciones Elásticas
# section('Elastic', secTag, E_mod, A, Iz, Iy, G_mod, Jxx, alphaY=None, alphaZ=None)
ops.section('Elastic', 5, Ec, 90000, 6.75E+8, 6.75E+8, 8881.99, 1.14E+09) #C1 300x300
ops.section('Elastic', 6, Ec, 140000, 1.87E+09, 1.43E+09, 8881.99, 2.74E+09) #C3 400x350
ops.section('Elastic', 7, Ec, 100000, 1.33E+9, 5.21E+8, 8881.99, 1.28E+9) #VigaExt250x400
ops.section('Elastic', 8, Ec, 150000, 3.125E+9, 1.125E+9, 8881.99, 2.82E+9) # VigaInt300x500
```

*Nota.* En el código se definen propiedades elásticas para las columnas y vigas

#### 4.4.5. Definición de los elementos inelásticos y carga

En la creación de elementos inelásticos se empleó el comando “forceBeamColumn”, el cual permite modelar elementos tipo columna y viga con comportamiento no lineal distribuido mediante la forma de integración por fibras. Para esto, primero se cargó los datos con todos los elementos representativos desde el archivo “elementos\_final\_01.txt”, obteniendo el número total de elementos a modelar.

Por consiguiente, se usó el comando de integración plástica utilizando el método “HingeRadau”, que permite simular concentraciones de no linealidad en los extremos del elemento, comúnmente asociadas a las rótulas plásticas que se forman bajo cargas sísmicas. Se definieron cuatro integraciones diferentes, cada una a una configuración específica de sección, longitud de rótula plástica y tipo de elemento.

### Figura 33

#### Asignación de inelasticidad a secciones

```
elementos = np.loadtxt('elementos_final_01.txt', delimiter = ',')
num_elementos = len(elementos)
# beamIntegration('HingeRadau', tag, secI, lpI(d/2), secJ, lpJ, secE(seccion central))
ops.beamIntegration('HingeRadau', 1, 1, 150, 1, 150, 5)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 2, 2, 200, 2, 200, 6)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 3, 3, 200, 3, 200, 7)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 4, 4, 250, 4, 250, 8)
```

*Nota.* Definición de secciones compuestas con extremos inelásticos y zona central elástica en columnas y vigas.

Con estas integraciones definidas, se iteró sobre todos los elementos estructurales, y se asignaron individualmente según su posición y tipo.

Los primeros 84 elementos fueron clasificados como columnas. Se distinguieron las columnas centrales y las columnas perimetrales, asignando a cada grupo la transformación geométrica correspondiente (101, para columnas verticales) y su integración adecuada (integración 2 o 1, respectivamente), como se puede apreciar en la figura 34.

### Figura 34

#### Distribución y definición de elementos

```
for i in range(1, num_elementos + 1):
    if i <= 84:
        if i in [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77]:
            #Columnas centrales C1 nivel 1, 2, 3 y 4
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 2)
        else:
            #Columnas Perimetrales C2 nivel 1, 2, 3 y 4
            # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transfTag, integrationTag,
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 101, 1)
```

*Nota.* En el código se utiliza un bucle for para definir las columnas del modelo estructural.

Los elementos restantes fueron considerados vigas, y fueron diferenciados entre vigas interiores y vigas exteriores. Las vigas exteriores se identificaron mediante una lista específica de identificadores (basado en su ubicación en el modelo), y se les asignó la transformación

geométrica 102 (alineadas con el eje X o Y) y la integración 4. Las vigas interiores recibieron la misma transformación, pero con la integración 3.

### Figura 35

#### *Distribucion y definicion de elementos viga*

```
elif i in [104, 105, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 106, 97, 107,
          127, 128, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 129, 120, 130, |
          150, 151, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 152, 143, 153,
          173, 174, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 175, 166, 176]:
    ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 102, 4)
else:
    ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]), int(elementos[i-1, 2]), 102, 3)
```

*Nota.* En el código se utiliza un bucle else para definir las vigas del modelo estructural

Continuando con la creación del código seguidamente se aplicó las cargas gravitacionales que representan el peso propio y las cargas permanentes actuantes sobre las vigas y columnas. Para esto se empleó el comando “ops.pattern”, que permite asignar cargas distribuidas a lo largo de los elementos del modelo.

Las cargas distribuidas se aplicaron de acuerdo al tipo de elemento, para los elementos tipo columna (los primeros 84 del total), se aplicó una carga uniformemente distribuida de magnitud  $W_x=3.36$  N/, orientada en la dirección del eje X, para los elementos tipo viga (desde el elemento 85 en adelante), se aplicó una carga uniforme de  $W_z=3.6$  N/mm.

### Figura 36

#### *Asignación de cargas*

```
# timeSeries/Constaint (no depende ddl tiempo) | tSTag | 1 (fact de escala, opcional)
ops.timeSeries('Constant', 1)
# Creando patron de carga
# pattern('Plain', patternTag, tSTag, '-fact', fact) solo aplica a la seccion de 300*300 y 400*350
# de igual manera para las vigas
ops.pattern("Plain", 1, 1)
Wx = 3.36 #N/mm
Wz = 3.6
for i in range(len(elementos)):
    if i < 84:
        # eleLoad('-ele', *eleTags, '-range', eleTag1, eleTag2, '-type', '-beamUniform', Wy, <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)
```

*Nota.* Aplicación de cargas distribuidas sobre columnas y vigas

#### 4.4.6. Asignación de masas y análisis Modal

Se procedió a asignar las masas modales a los niveles de la edificación, esenciales para continuar creando el código que nos permita realizar el análisis, en este caso, se trabajó con la función `ops.mass (Node_Tag, masX, masY, masZ, JX, JY, JZ)`, el cual permite definir las propiedades inerciales en los nodos maestros.

Las masas se asignaron a los nodos maestros correspondientes a cada nivel de piso (nodos 143, 144, 145 y 146), utilizando valores representativos de masa traslacional en las direcciones X y Y, así como masa rotacional alrededor del eje Z. Para las direcciones verticales Z y los ejes de rotación X e Y, se colocó un valor muy pequeño  $M_{zero}=1.0 \times 10^{-6}$ , para evitar problemas numéricos durante el análisis, pero sin contribuir significativamente al sistema dinámico.

Los valores de masa traslacional y rotacional para los tres primeros niveles fueron iguales, es decir en los nodos 143, 144 y 145, sin embargo, para el último nivel (nodo 146), se asignaron masas menores, debido a una disminución en la carga permanente sobre ese piso, la masa es de  $95.17 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{mm}$  en X e Y traslacional y  $2.65 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^2$  de masa rotacional, como se observa en la figura 37, la masa rotacional fue calculada aplicando el teorema de Steiner.

#### Figura 37

*Asignacion de masa a los nodos maestros*

```
# mass(NODE_TAG, masX N s2/mm), masY, masZ, JX, JY, JZ)
Mzero = 1.0e-6;
ops.mass(143, 132.17, 132.17, Mzero, Mzero, Mzero, 3.68E+9)
ops.mass(144, 132.17, 132.17, Mzero, Mzero, Mzero, 3.68E+9)
ops.mass(145, 132.17, 132.17, Mzero, Mzero, Mzero, 3.68E+9)
ops.mass(146, 95.17, 95.17, Mzero, Mzero, Mzero, 2.65E+9)
```

*Nota.* Se restringieron los grados de libertad en Z y a las rotaciones en los ejes X e Y

Dado que el modelo corresponde a una edificación de cuatro niveles ( $n = 4$ ), se consideró conveniente analizar tres grados de libertad por nivel (traslacionales y rotacionales en planta), resultando en un total de 12 modos de vibración ( $N = 3 \times n$ ), para esto se utilizó el comando: `OmegaSq = ops.eigen('-fullGenLapack', N)`, en la figura 38 podemos apreciar estos modos.

### Figura 38

#### *Periodos de vibración de la estructura*

```
nn = 4      # Nro de niveles
N = (3*nn)  # Nro de modos
OmegaSq = ops.eigen('-fullGenLapack', N)
OmegaSq = np.array(OmegaSq)
Omega = OmegaSq**0.5
Periodo = 2*np.pi/Omega

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

Modo 1	T = 0.412 s
Modo 2	T = 0.385 s
Modo 3	T = 0.312 s
Modo 4	T = 0.144 s
Modo 5	T = 0.135 s
Modo 6	T = 0.110 s
Modo 7	T = 0.096 s
Modo 8	T = 0.090 s
Modo 9	T = 0.080 s
Modo 10	T = 0.075 s
Modo 11	T = 0.073 s
Modo 12	T = 0.061 s

*Nota.* Se observa los 12 modos de vibración de la estructura

#### 4.4.7. *Carga Axial y ploteo*

Después de definir completamente la geometría, los elementos estructurales, las propiedades mecánicas, las masas y realizar el análisis modal, se procedió a aplicar la carga del peso propio de la edificación y sus cargas permanentes antes de someter el modelo a cargas sísmicas, para realizar esta etapa, se configuró el análisis estático.

Luego, se definió el integrador LoadControl para aplicar la carga en 30 pasos incrementales, permitiendo que el análisis se aproxime progresivamente al estado final de carga. La instrucción ops.analyze, ejecutó el análisis estático, verificando que el modelo alcanzara el equilibrio bajo las cargas gravitacionales.

Finalmente, se incluyó una condición para verificar si el análisis fue exitoso, nos resultó como mensaje “Carga axial aplicada”; de lo contrario nos informaría de un posible error durante el proceso, en este caso el proceso fue el correcto, en la figura 39 se puede apreciar esta parte del código.

### Figura 39

*Código para el ploteo de la edificación en 3D*

```
# 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

*Nota.* Se aplico correctamente las cargas gravitacionales. En Z y a las rotaciones en los ejes X e Y.

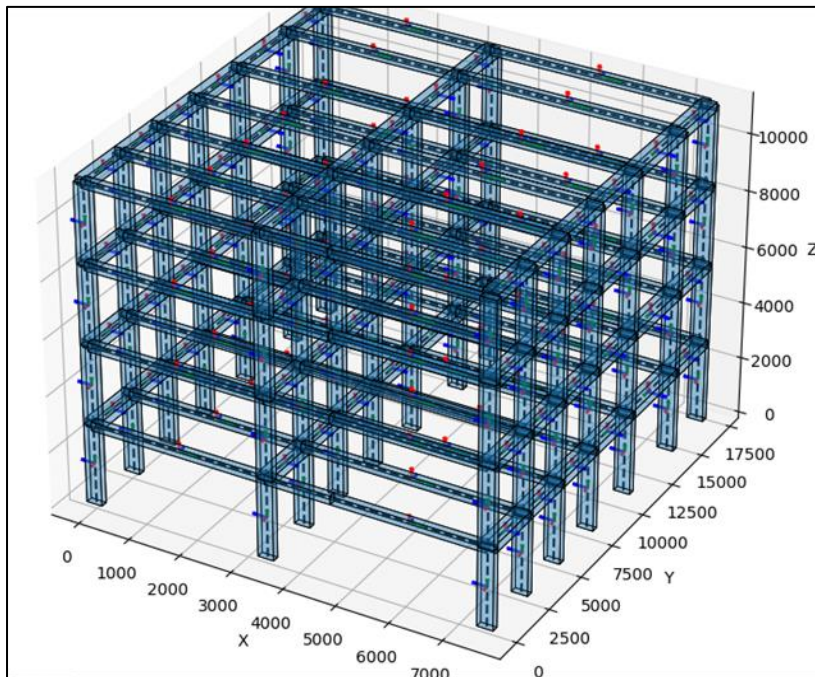
A continuación, se creó un diccionario llamado ele\_shapes donde se asignó a cada elemento su tipo de sección y dimensiones correspondientes. Se aplico una sección típica de

300 mm × 300 mm como base para todos los elementos, lo cual puede modificarse posteriormente según el tipo de viga o columna, como se muestra en la figura 40.

El ploteo tridimensional fue ejecutado con la función “plot\_extruded\_shapes\_3d” de la biblioteca “opsviz”, que permite representar en 3D.

#### **Figura 40**

*Visualización en 3D de la edificación*



*Nota.* Edificación conformada por columnas y vigas

#### **4.4.8. Análisis Dinámico no lineal**

Luego de validado el modelado que se realizó y aplicado la evaluación estática, se procedió a ejecutar el análisis dinámico no lineal que nos permitirá evaluar cómo responde la edificación frente a un registro acelerográfico real. Esta etapa considera tanto las propiedades inerciales como la rigidez y no linealidad de nuestro sistema de pórticos.

Necesitamos primero incorporar amortiguamiento estructural, queriendo lograr esto usamos el modelo de amortiguamiento Rayleigh, el cual introduce términos proporcionales a la rigidez y a la masa. La situación nos permitió que se asumieran coeficientes de

amortiguamiento modal del 3% para el primer modo y del 2% para el tercer modo, estos coeficientes fueron luego aplicados mediante el comando “ops.rayleigh”.

Se utilizó un registro sísmico real correspondiente al archivo “lima\_70.txt”, con un paso de tiempo de 0.02 segundos y una escala que considera la aceleración gravitacional en mm/s<sup>2</sup>.

**Figura 41**

*Código para el análisis no lineal dinámico*

```
# Amortiguamiento Rayleigh ---- consultar en clase o buscar teoria
zeta1 = 0.03
zeta3 = 0.02
# Determinar los coef alpha y beta... resolviendo un sist matricial
B = np.zeros(shape=(2,2))
B[0,0] = 1/Omega[0]; B[0,1] = Omega[0]
B[1,0] = 1/Omega[2]; B[1,1] = Omega[2]

b = np.zeros(2)
b[0] = 2*zeta1
b[1] = 2*zeta3
a = np.linalg.solve(B,b) # a[0] = alphaM, a[1] = beta
# ops.rayleigh(alphaM, betaK, betaKinit, betaKcomm)
ops.rayleigh(a[0], 0.0, 0.0, a[1])

# Definir la función de aceleración
ops.timeSeries('Path', 2, '-filePath', 'lima_1966_raiz_02.txt', '-dt', 0.02, '-factor', (1*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') # Para 38
ops.numberer('RCM') # Para 3D
ops.system('UmfPack')
# ops.test('NormDispIncr', Tolerancia, pasos)
ops.test('NormDispIncr', 1e-9, 100)
ops.algorithm('KrylovNewton')
ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25)
ops.analysis('Transient')
```

*Nota.* Se utilizó un acelerograma (Lima 1970) como entrada sísmica

Se establecieron grabadores para almacenar resultados en archivos de salida, incluyendo:

- Desplazamiento del nodo techo (nodo 146) en la dirección del sismo.
- Fuerzas cortantes en los elementos de la estructura (elementos 1 al 88).
- Desplazamientos de los nodos maestros del diafragma superior (nodos 143 al 146).

El análisis se ejecutó en un bucle, que avanzó paso a paso hasta alcanzar la duración total del registro sísmico. Si durante el proceso se detectaba inestabilidad o divergencia, se

imprimiría un mensaje de error indicando el tiempo en el que ocurrió la falla. Si no ocurre esto, se mostrará el mensaje de confirmación de análisis completado.

Finalmente, se eliminaron los objetos del análisis y los grabadores con `ops.wipeAnalysis` y `ops.remove`, para dejar el modelo limpio para posibles análisis posteriores.

## Figura 42

### *Desplazamientos y fuerzas*

```
t = ops.getTime()
ops.recorder('Node', '-file', 'DespDinRoof.out', '-time', '-node', 146, '-dof', 1, 'disp')
ops.recorder('Element', '-file', 'FzCortDin.out', '-time', '-eleRange', 1, 88, '-dof', 1, 'globalForce')
ops.recorder('Node', '-file', 'DisDin.out', '-time', '-node', 143, 144, 145, 146, '-dof', 1, 'disp')
dt = 0.02
Acel = np.loadtxt('lima_1966_raiz_02.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('Anaálisis Completado')
ops.wipeAnalysis()
ops.remove('recorders')

Anaálisis Completado
```

*Nota.* El análisis ha sido correctamente ejecutado

### 4.4.9. *Gráfico RPTA NL Dinámico y derivas relativas*

Una vez culminado el análisis dinámico no lineal, continuamos con la lectura, procesamiento y representación gráfica de los resultados para evaluar el desempeño estructural, los datos registrados durante el análisis fueron extraídos desde los archivos generados por los recorders de OpenSees y analizados en Python mediante NumPy y Matplotlib.

Se graficó la historia de desplazamientos del nodo correspondiente al techo de la estructura (nodo 146) en función del tiempo. Esta curva permite visualizar el comportamiento dinámico del edificio frente a la acción sísmica, identificando el desplazamiento máximo absoluto y su evolución a lo largo del registro, lo que se puede apreciar en la figura 43.

**Figura 43**

*Código de ploteo de graficas*

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

D = np.loadtxt('DisDin.out')
F = np.loadtxt('FzCortDin.out')

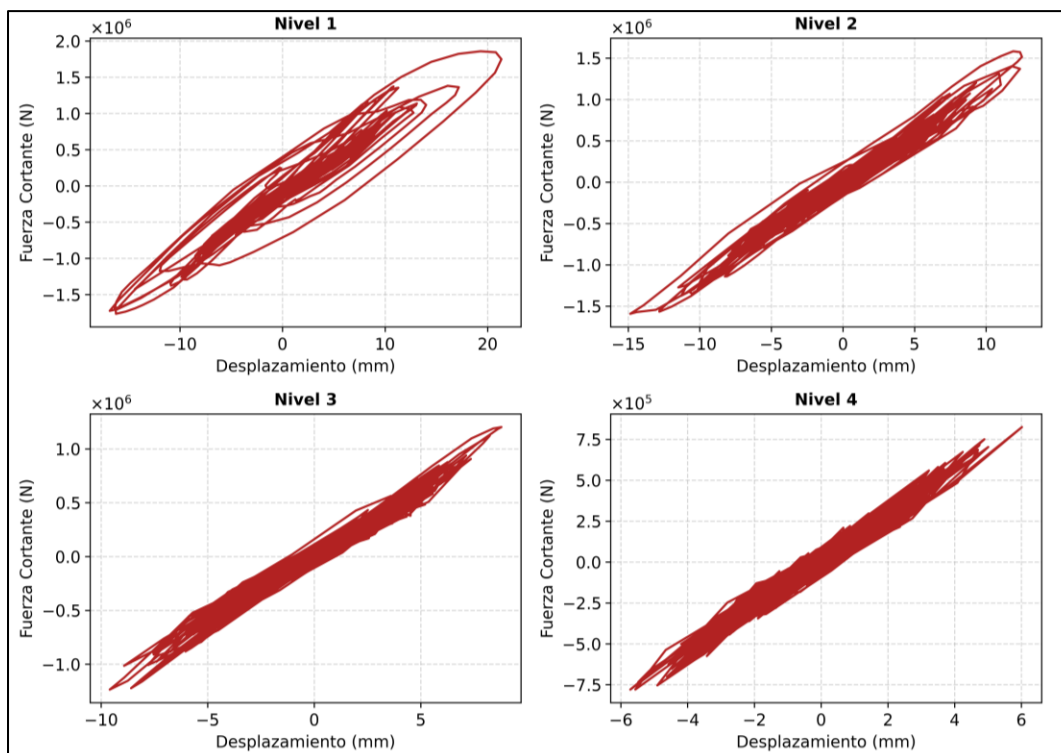
V1 = -F[:,1]-F[:,2]-F[:,3]-F[:,4]-F[:,5]-F[:,6]-F[:,7]-F[:,8]-F[:,9]-F[:,10]-F[:,11]-F[:,12]-F[:,13]-F[:,14]-F[:,15]-F[:,16]-F[:,17]-F[:,18]-F[:,19]-F[:,20]-F[:,21]-F[:,22]-F[:,23]-F[:,24]-F[:,25]-F[:,26]-F[:,27]-F[:,28]-F[:,29]-F[:,30]-F[:,31]-F[:,32]-F[:,33]-F[:,34]-F[:,35]-F[:,36]-F[:,37]-F[:,38]-F[:,39]-F[:,40]-F[:,41]-F[:,42]-F[:,43]-F[:,44]-F[:,45]-F[:,46]-F[:,47]-F[:,48]-F[:,49]-F[:,50]-F[:,51]-F[:,52]-F[:,53]-F[:,54]-F[:,55]-F[:,56]-F[:,57]-F[:,58]-F[:,59]-F[:,60]-F[:,61]-F[:,62]-F[:,63]-F[:,64]-F[:,65]-F[:,66]-F[:,67]-F[:,68]-F[:,69]-F[:,70]-F[:,71]-F[:,72]-F[:,73]-F[:,74]-F[:,75]-F[:,76]-F[:,77]-F[:,78]-F[:,79]-F[:,80]-F[:,81]-F[:,82]-F[:,83]-F[:,84]-F[:,85]-F[:,86]-F[:,87]-F[:,88]-F[:,89]-F[:,90]-F[:,91]-F[:,92]-F[:,93]-F[:,94]-F[:,95]-F[:,96]-F[:,97]-F[:,98]-F[:,99]
```

*Nota.* La figura nos muestra las fuerzas cortantes en cada columna

Este resultado es clave para estimar la demanda máxima de desplazamiento, los datos de fuerza obtenidos se procesaron para determinar el corte dinámico total por nivel, Se generaron cuatro gráficas individuales para cada nivel de la edificación (DR1–V1, DR2–V2, DR3–V3 y DR4–V4), donde se observa el comportamiento no lineal del sistema estructural frente a la acción sísmica, estos resultados se pueden apreciar en la figura 44.

**Figura 44**

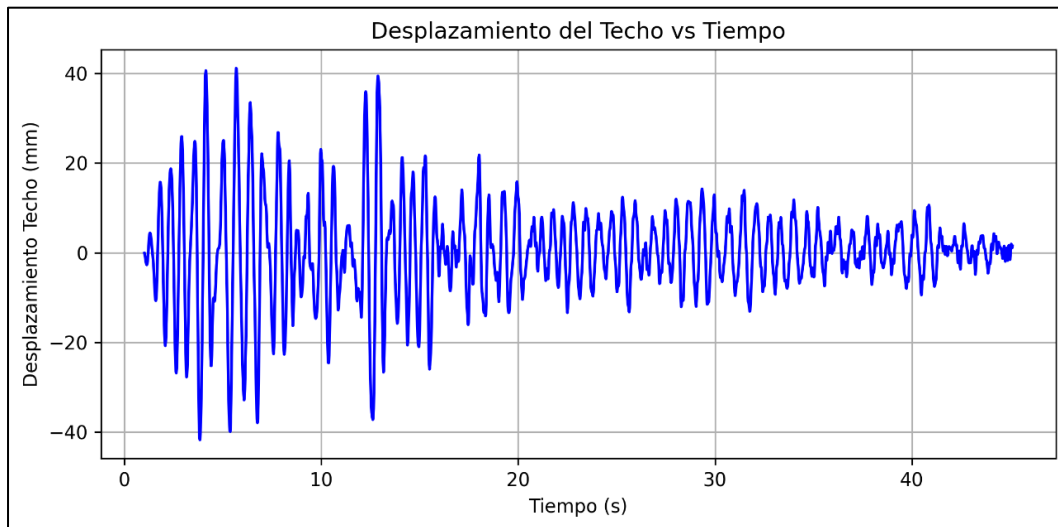
*Curvas Histéreticas del sismo Lima 70*



*Nota.* Estas curvas permiten evidenciar los efectos de acumulación de daño, degradación de rigidez y energía absorbida en cada piso.

**Figura 45**

*Respuesta no Lineal del sismo Lima 70*



*Nota.* Respuesta no lineal de la edificación frente al sismo de Lima 70.

#### **4.5. Comparativa de Análisis Dinámico no Lineal**

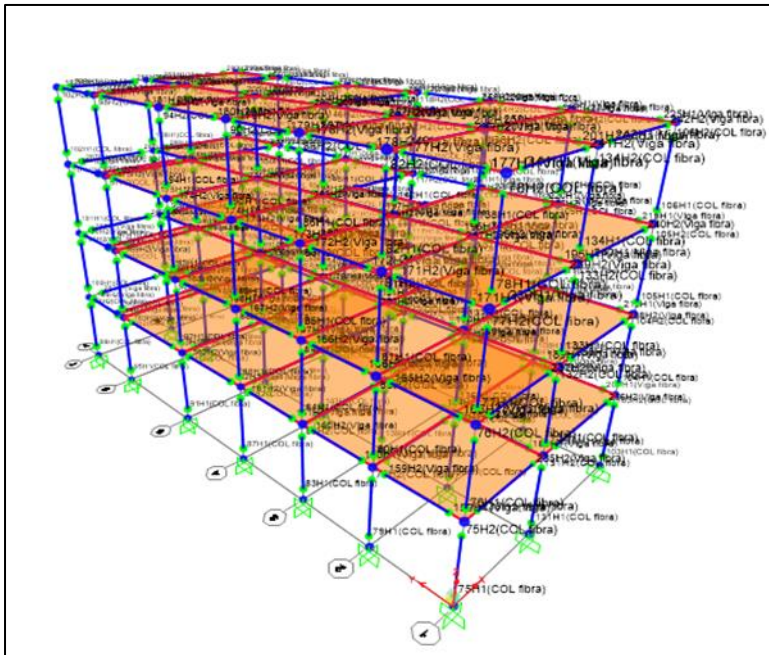
##### **4.5.1. Análisis dinámico no lineal tiempo-historia en SAP 2000**

###### **4.5.1.1. Asignación de modelos de plasticidad en los elementos**

Luego del análisis lineal dinámico, se asignaron rótulas plásticas tipo fibra en los extremos de las columnas y vigas, con el objetivo de simular el comportamiento inelástico localizado. De este modo, se modeló una respuesta inelástica en los extremos de los elementos estructurales representativos, como apreciamos en la figura 46.

**Figura 46**

*Asignación de rotulas tipo fibra*



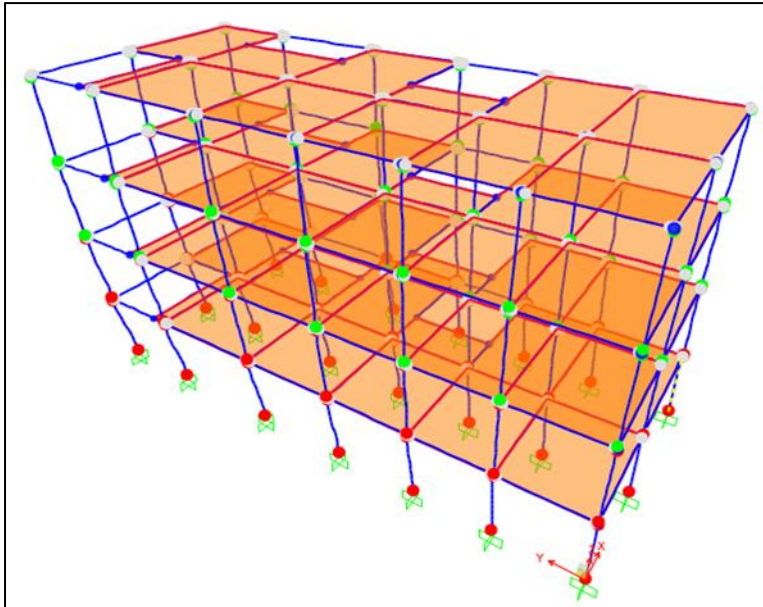
*Nota.* Rotulas tipo fibra en las columnas y vigas

Modificamos el modelo estructural donde se implementaron rótulas plásticas tipo fibra en vigas y columnas buscando el objetivo de determinar el esfuerzo y deformación de los elementos representativos de nuestra edificación mediante análisis no lineal. Los resultados indican diversos niveles de daño representados por colores, según la curva de capacidad de las rótulas, las rótulas en color gris permanecen en el rango elástico, sin daño.

En la figura 47 podemos apreciar que las de color verde, indican el inicio de la fluencia, el color celeste, representa daño moderado, asociado a un desempeño aceptable, finalmente, las rótulas en rojo han sobrepasado su capacidad última, indicando un posible fallo estructural localizado.

**Figura 47**

*Desempeño sísmico de la estructura*



*Nota.* Se observa los colores rojo y verde en parte de los tres niveles

#### **4.5.1.2. Creación del caso de carga no lineal por gravedad**

En la figura 48 se puede apreciar cómo se configuraron las cargas correspondientes al peso propio y a las cargas muertas bajo el patrón denominado Dead, así como las cargas vivas bajo el patrón Live. Posteriormente, ambos patrones de carga fueron ajustados y empelados en el análisis no lineal dinámico tipo tiempo-historia.

**Figura 48**

*Introducción de carga de gravedad para un análisis no lineal*

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	1.
Load Pattern	LIFE	0.25

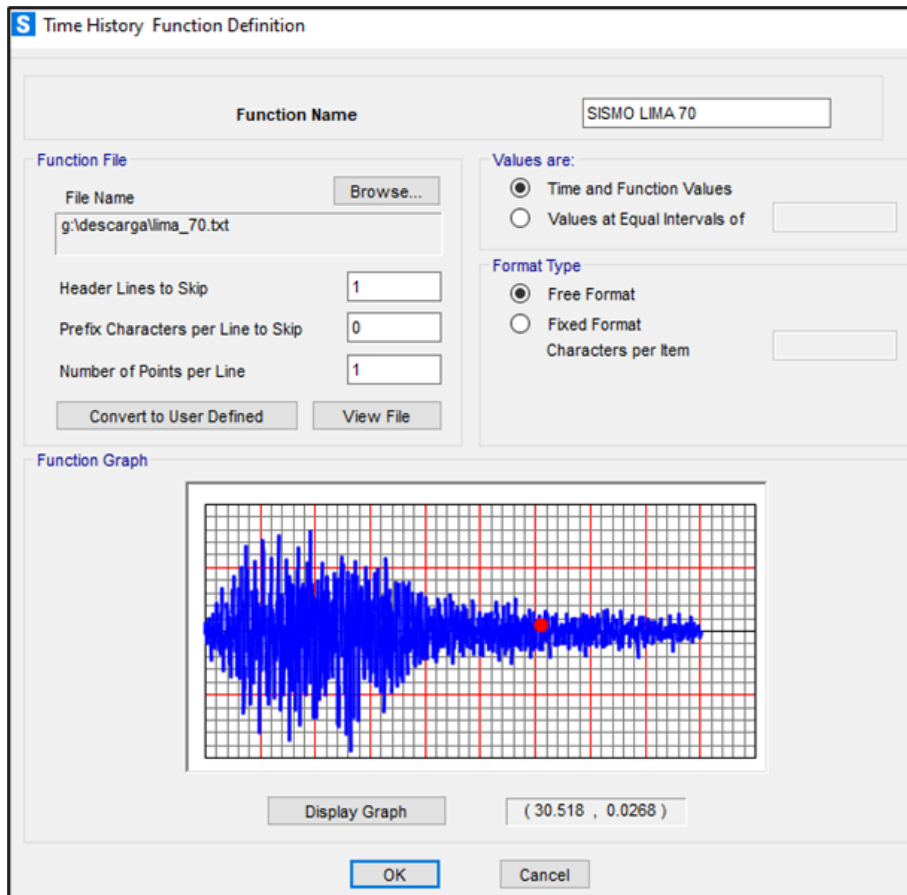
*Nota.* Se observa que se está considerando la carga muerta como el 100% y la carga viva como 25%

**4.5.1.3. Creación del caso de carga dinámico no lineal tiempo historia**

Una vez obtenido el sismo escalado, este fue ingresado al software SAP2000 como un registro de aceleración para realizar el análisis dinámico no lineal tiempo-historia, como se muestra en la figura 49. El objetivo principal de este análisis es evaluar la respuesta dinámica de la edificación, particularmente los desplazamientos en cada uno de los niveles, bajo la acción del movimiento sísmico considerado.

**Figura 49**

*Ingreso del sismo 70 en el SAP 2000*



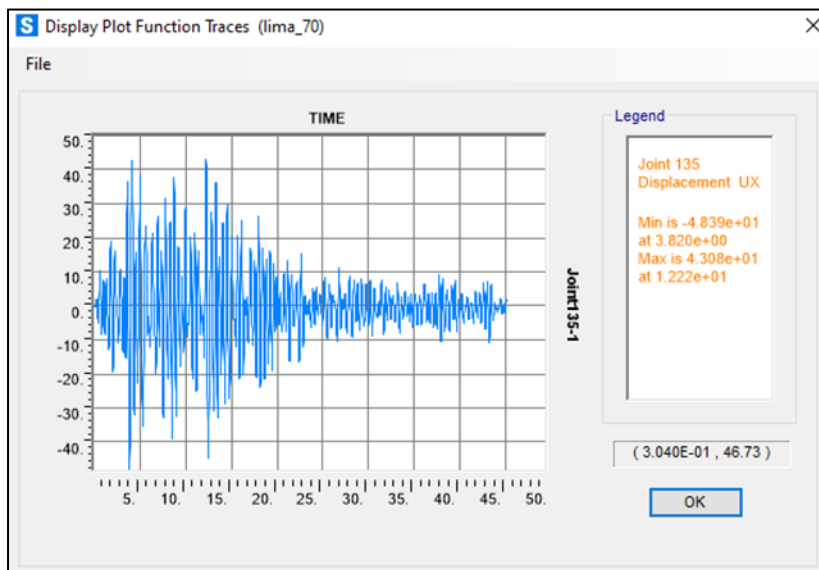
*Nota.* La figura nos muestra el sismo de aceleración vs tiempo, escalado, se ingresó solo un sismo para la comprobación de desplazamiento que también nos da el OpenSeesPy.

#### **4.5.1.4. Respuesta del caso Lima 70 entre el OpenSeesPy y SAP 2000**

En este caso puntual se ha comparado la respuesta luego de haber realizado el análisis dinámico no lineal, para el sismo ocurrido en Lima del año 1970, como se muestra en la figura 50 y 51.

**Figura 50**

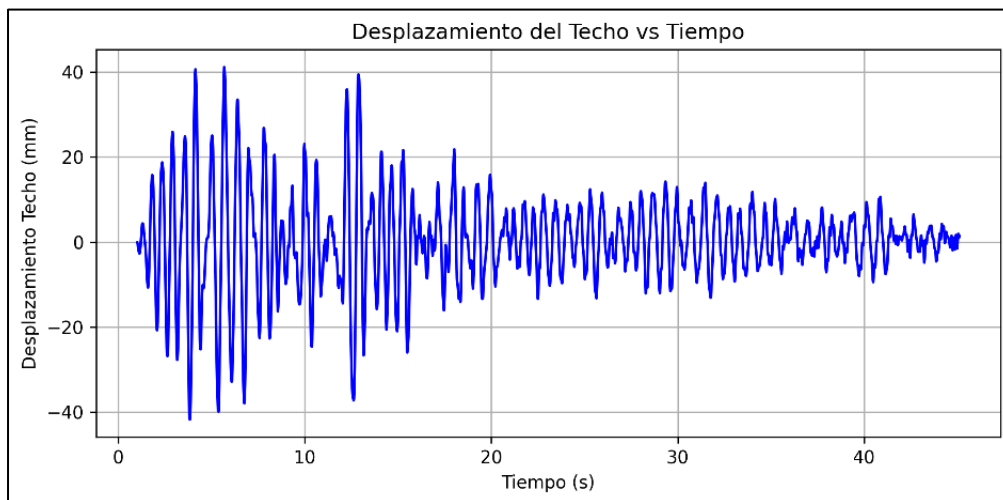
*Respuesta sísmica no lineal del caso Lima 70-SAP 2000*



*Nota.* La respuesta sísmica de Lima 70, con tiempo de 45 segundos, en el último nivel de la edificación.

**Figura 51**

*Respuesta no lineal del caso Lima 70-OpenSeesPy*



*Nota.* La respuesta sísmica de Lima 70, con tiempo de 45 segundos, en el último nivel de la edificación.

#### **4.6. Resultados finales**

Después de finalizado el análisis dinámico no lineal con todos los casos sísmicos con ayuda del OpenSeesPy, se obtienen resultados los cuales se organizaron en tablas y gráficos para su apreciación, los cuales se muestran a continuación.

#### 4.6.1. Resultados de la distribución de energía sísmica

Gracias al OpenSeesPy, pudimos obtener la gráfica histéretica en cada piso en la estructura, el área de esta curva es la energía en cada nivel el cual organizamos en la tabla 12, para luego apreciar en el grafico 52 como se distribuye la energía de manera porcentual en los 4 niveles de la edificación.

**Tabla 11**

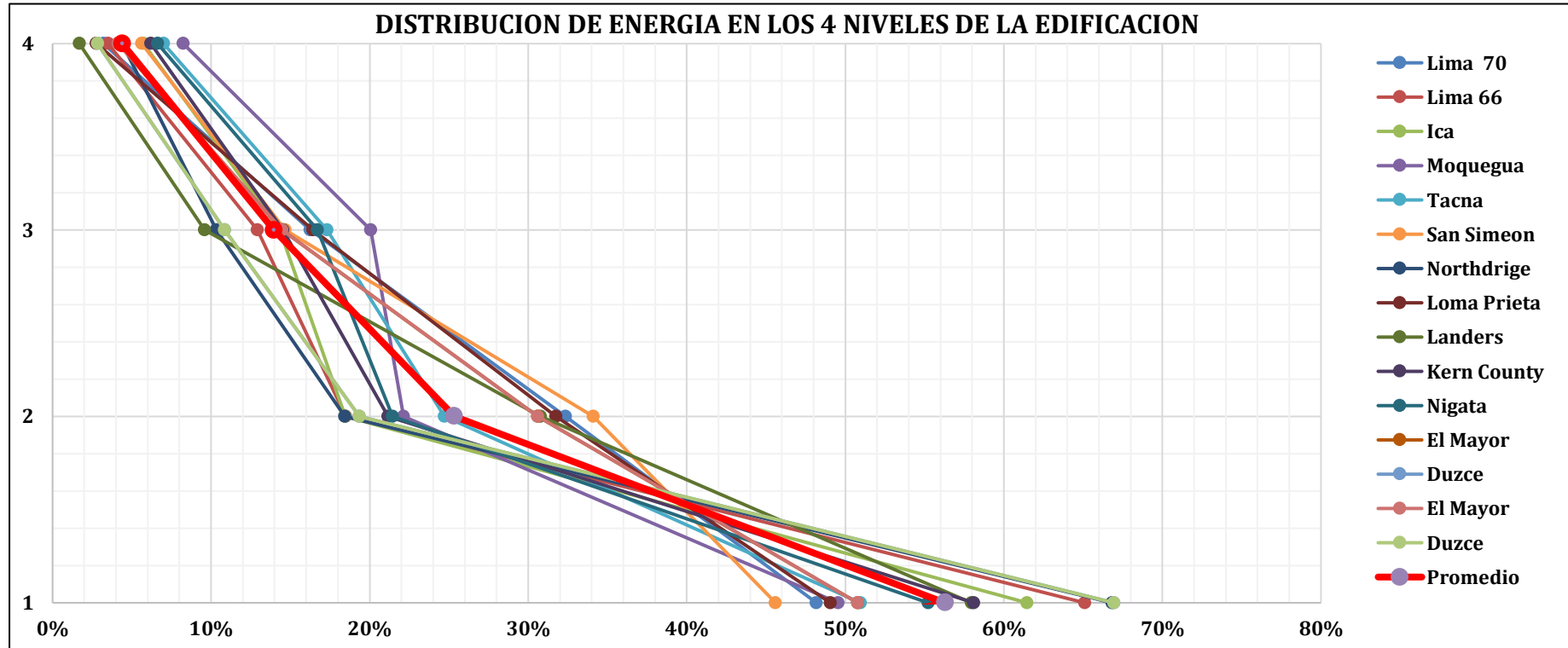
*Energía disipada en la edificación*

CUADRO DE ENERGIA DISIPADA POR PISO EN EDIFICACIÓN DE 4 NIVELES												
SISMO	DESCRIPCIÓN DEL SISMO			E Nivel 1 (KJ)	%	E Nivel 2 (KJ)	%	E Nivel 3 (KJ)	%	E Nivel 4 (KJ)	%	E Total (KJ)
	AÑO	MAGNITUD	LUGAR									
1	1966	8.1	Lima 70	285.34	48.18%	191.68	32.36%	96.22	16.25%	19.02	3.21%	592.26
2	1970	6.6	Lima 66	411.44	65.10%	116.89	18.49%	81.62	12.91%	22.10	3.50%	632.05
3	2007	7.0	Ica	603.86	61.47%	181.39	18.46%	140.82	14.33%	56.33	5.73%	982.40
4	2001	6.9	Moquegua	476.92	49.55%	213.15	22.15%	193.08	20.06%	79.32	8.24%	962.47
5	1999	6.5	Tacna	368.48	50.95%	178.86	24.73%	125.19	17.31%	50.63	7.00%	723.15
6	2001	7.0	Darfield	672.59	60.35%	313.21	28.10%	103.55	9.29%	25.09	2.25%	1114.44
7	2001	7.1	Hector mine	588.36	58.38%	284.16	28.20%	117.03	11.61%	18.18	1.80%	1007.73
8	2001	6.5	San Simeon	179.79	45.60%	134.47	34.11%	57.82	14.67%	22.19	5.63%	394.27
9	2001	6.7	Northdrige	362.40	66.82%	99.97	18.43%	56.14	10.35%	23.81	4.39%	542.31
10	2001	6.9	Loma Prieta	274.61	49.06%	177.77	31.76%	91.92	16.42%	15.49	2.77%	559.80
11	2001	7.3	Landers	311.59	57.95%	165.44	30.77%	51.60	9.60%	9.07	1.69%	537.70
12	2001	7.4	Kern County	276.95	58.12%	100.78	21.15%	69.28	14.54%	29.54	6.20%	476.55
13	2001	6.6	Nigata	412.18	55.22%	160.00	21.44%	124.77	16.72%	49.46	6.63%	746.41
14	2001	7.2	El Mayor	345.84	50.77%	208.54	30.62%	98.59	14.47%	28.19	4.14%	681.16
15	2001	7.1	Duzce	312.78	66.95%	90.43	19.36%	50.73	10.86%	13.24	2.83%	467.18

*Nota.* Se Observa los 15 sismos, donde el sismo Ica genera mayor energía y va disminuyendo en los niveles superiores.

Figura 52

Distribución de energía en la edificación



Nota. En la figura podemos apreciar que al introducir nuestros 15 sismos a nuestra edificación estos de aquí generan mayor energía absorbida en el primer piso, viendo en la figura que todos los sismos generan mayor fuerza desplazamiento en el primer nivel lo cual esto produce energía, el sismo San Simeón provocó una energía de 179.79 KJ siendo el menor, sin embargo el sismo de Ica provocó una energía de 603.86 KJ siendo el mayor, para lo cual se obtuvo el promedio de 392.21 KJ, que representa el 56 %.

#### 4.6.2. Derivas Finales

Gracias al análisis dinámico no lineal en el OpenSeesPy pudimos obtener los desplazamientos máximos relativos en cada piso de la vivienda, con esa información logramos hallar las derivas finales de cada nivel, los cuales fueron organizados en la tabla 13, y luego organizadas de manera grafica en la figura 53 y ver que tanto excede a la deriva permitida por la normativa E-030.

**Tabla 12**

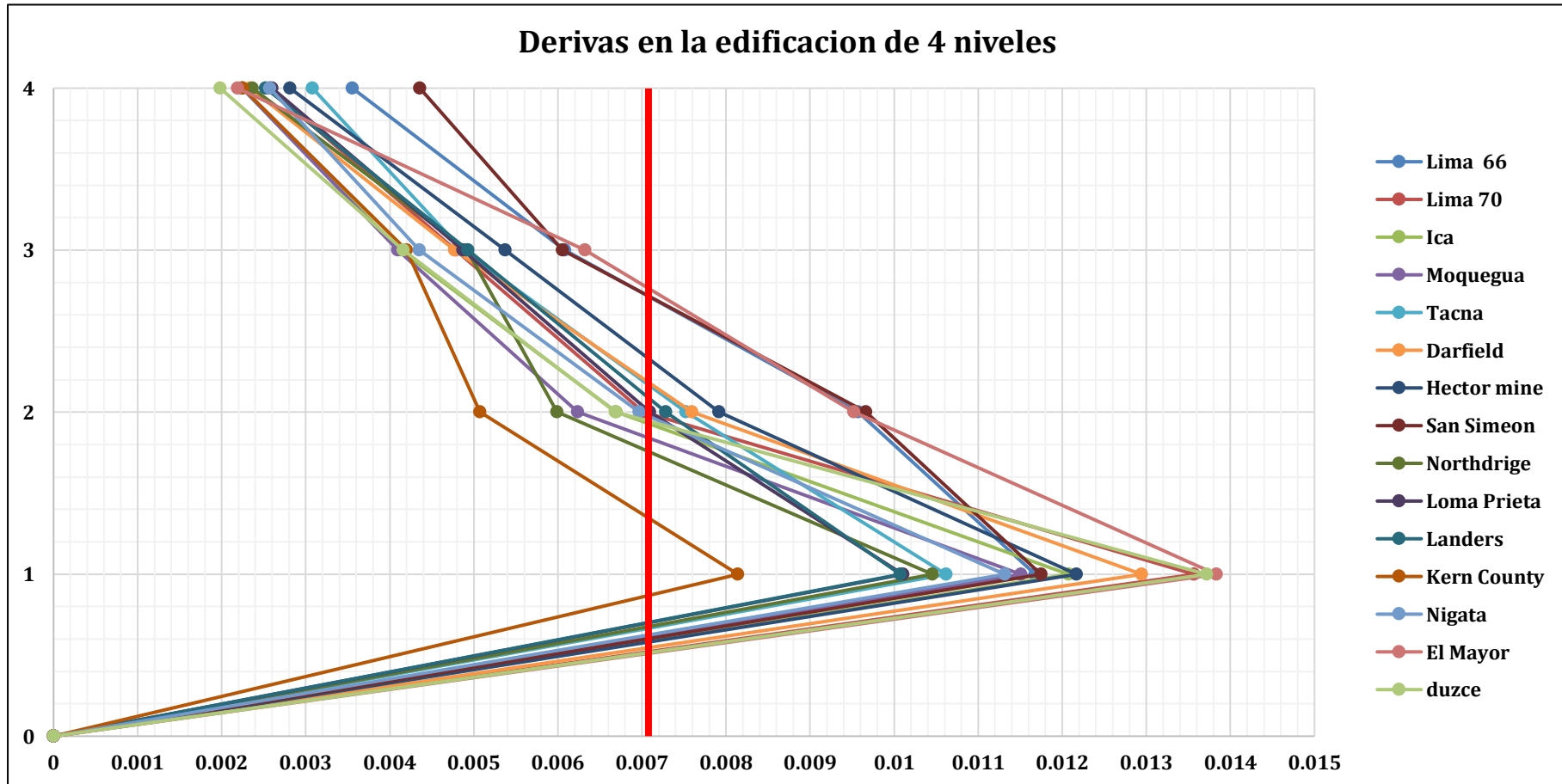
*Derivas finales por cada casi sísmico*

SISMO	DESCRIPCIÓN DEL SISMO			DERIVAS EN LOS 4 NIVELES DE LA EDIFICACION							
	AÑO	MAGNITUD	LUGAR	DR max Nivel 1 (mm)	Deriva Nivel 1	DR max Nivel 2 (mm)	Deriva Nivel 2	DR max Nivel 3 (mm)	Deriva Nivel 3	DR max Nivel 4 (mm)	Deriva Nivel 4
1	1966	8.1	Lima	32.70	0.0117	26.79	0.0096	17.03	0.0061	9.96	0.0036
2	1970	6.6	Lima	37.99	0.0136	19.65	0.0070	13.39	0.0048	7.18	0.0026
3	2007	7.0	Ica	33.81	0.0121	18.75	0.0067	11.55	0.0041	6.29	0.0022
4	2001	6.9	Moquegua	29.74	0.0106	18.60	0.0066	12.95	0.0046	6.44	0.0023
5	1999	6.5	Tacna	29.73	0.0106	21.07	0.0075	13.62	0.0049	8.63	0.0031
6	2001	7.0	Darfield	36.25	0.0129	21.27	0.0076	13.36	0.0048	6.55	0.0023
7	2001	7.1	Hector mine	34.08	0.0122	22.17	0.0079	15.05	0.0054	7.88	0.0028
8	2001	6.5	San Simeon	32.89	0.0117	27.05	0.0097	16.95	0.0061	12.20	0.0044
9	2001	6.7	Northdrige	29.28	0.0105	16.77	0.0060	13.78	0.0049	6.62	0.0024
10	2001	6.9	Loma Prieta	28.29	0.0101	19.86	0.0071	13.63	0.0049	7.28	0.0026
11	2001	7.3	Landers	28.21	0.0101	20.39	0.0073	13.80	0.0049	7.07	0.0025
12	2001	7.4	Kern County	22.80	0.0081	14.21	0.0051	11.76	0.0042	6.30	0.0023
13	2004	6.6	Nigata	31.69	0.0113	19.51	0.0070	12.19	0.0044	7.20	0.0026
14	2001	7.2	El Mayor	38.73	0.0138	26.66	0.0095	17.70	0.0063	6.13	0.0022
15	2001	7.1	Duzce	38.41	0.0137	18.71	0.0067	11.65	0.0042	5.55	0.0020

*Nota.* Se observa que las derivas son mayores en el primer nivel para todos los sismos, y van disminuyendo conforme se sube de nivel de igual manera ocurre esto para todos los sismos.

**Figura 54**

*Derivas finales después del análisis dinámico no lineal*



*Nota.* Se observa que, una vez ingresados los sismos, estos generan derivas mayores en el primer nivel para todos los sismos y que exceden a la deriva 0.007 permitida por la Norma E-030, a la vez que van disminuyendo conforme se sube de nivel de igual manera ocurre esto para todos los sismos.

## Discusión de Resultados

El análisis dinámico no lineal realizado para la edificación de cuatro pisos permitió evaluar detalladamente el comportamiento energético del sistema cuando se le somete a diferentes tipos de excitaciones sísmicas.

La energía disipada total que se obtiene gracias a la histéresis se puede apreciar en la columna final de la Tabla 9, y esta representa la respuesta energética de la vivienda frente a sismos fuertes.

Centrándonos en la distribución de energía podemos observar al ver la tabla, que los resultados confirman que existe un patrón descendente desde el primer piso hacia los niveles superiores. El primer nivel (E Nivel 1) concentró el mayor porcentaje de energía para todos los sismos tal y como se puede apreciar en la tabla.

Por el contrario, los niveles superiores mostraron una participación decreciente, como se puede observar en las columnas de E Nivel 2, E Nivel 3 y E Nivel 4, donde los porcentajes disminuyen progresivamente. Por ejemplo, para el Sismo 1 (Lima 1966), la distribución es 48.18% (N1), 32.36% (N2), 16.25% (N3) y 3.21% (N4). Esta transición progresiva en la disipación energética entre niveles en todos los sismos analizados sugiere una respuesta estructural ordenada y sin evidencia de formación de mecanismos de piso débil o concentraciones anómalas de energía en niveles intermedios o superiores, lo cual demuestra que el desempeño estructural es positivo.

Los resultados evidencian claramente que la respuesta energética de la estructura cambia de manera significativa de acuerdo al contenido espectral de cada acelerograma. La Magnitud y el Lugar de origen de cada sismo, así como el año, sugieren diferentes características espectrales para cada registro. Por ejemplo, sismos como Darfield 2001 (Sismo 6, Magnitud 7.0) con una E Total de 1114.44 KJ, o Hector Mine 2001 (Sismo 7, Magnitud 7.1)

con 1007.73 KJ, generaron los mayores niveles de disipación total. En contraste, sismos como San Simeon 2001 (Sismo 8, Magnitud 6.5) con solo 394.27 KJ, o Duzce 2001 (Sismo 15, Magnitud 7.1) con 467.18 KJ, provocaron una disipación total de energía mucho menor.

El análisis no lineal dinámico realizado permitió evaluar el comportamiento sísmico de una edificación de cuatro pisos mediante simulaciones detalladas con ayuda del OpenSeesPy. Este tipo de análisis es ampliamente recomendado en estudios modernos de ingeniería sísmica, ya que permite capturar el comportamiento inelástico con mayor realismo que los métodos lineales (Chopra, 2017).

Una observación crítica derivada del análisis es que, bajo ciertos registros, como el de Lima 1970, la deriva inter-piso en el primer nivel superó los límites normativos establecidos por la norma técnica E.030 (Ministerio de Vivienda, 2018), alcanzando valores de hasta 0.0112 (aproximadamente 31 mm), frente a un máximo permisible de 0.0075 h (21 mm para 2.80 m de altura). Esta situación evidencia una demanda sísmica excesiva en el primer nivel, que podría estar asociada a una configuración estructural deficiente en términos de rigidez y capacidad de disipación, fenómeno ampliamente documentado en estudios sobre estructuras aporticadas (Priestley et al., 2007).

Además, la distribución de energía sísmica mostró una concentración en los niveles inferiores, especialmente en el primero, donde se generaron ciclos histéricos de mayor área y amplitud. Esto va de acuerdo a lo propuesto por Mazzoni et al. (2006), quienes indican que una acumulación de esfuerzos inerciales y el diseño convencional de marcos aporticados tiende a generar mayores demandas en los niveles bajos. Esta observación también refuerza el concepto del "piso débil", una condición estructural que debe ser tratada con especial atención en el diseño basado en desempeño.

Comparando con herramientas tradicionales como SAP2000, OpenSeesPy demostró una capacidad superior para capturar como las rótulas plásticas se van generando

progresivamente, gracias a su enfoque de modelado por fibras y la flexibilidad de análisis paso a paso (Mazzoni et al., 2006). Esto permitió una visualización más precisa de la evolución del daño y los mecanismos de plastificación.

Con el objetivo de analizar comportamiento inelástico de los materiales, se emplearon los modelos Concrete01 para el concreto y Steel01 para el acero, ambos implementados en OpenSeesPy. El modelo Concrete01 simula el comportamiento no lineal del concreto confinado, reproduciendo la degradación de rigidez post-pico, el comportamiento en compresión y la tracción limitada. Su forma de respuesta es funcionalmente equivalente al modelo parabólico propuesto por Hognestad (1951), ampliamente reconocido en la simulación estructural del concreto. En tanto, Steel01 corresponde a un modelo bilineal elastoplástico que representa el comportamiento clásico del acero estructural sometido a cargas cíclicas, incluyendo el endurecimiento cinemático. Este tipo de idealización ha sido extensamente utilizado en estudios de diseño sísmico y es recomendado en simulaciones de respuesta histerética del acero (Chopra, 2017). La combinación de estos materiales permitió idealizar el comportamiento estructural de forma coherente con la realidad física, cumpliendo con el primer objetivo específico del estudio.

Finalmente, los resultados obtenidos de la tabla, y el contraste con las afirmaciones previas nos muestran que, si bien la estructura presenta un comportamiento adecuado en la mayoría de los niveles, el primer nivel requiere revisión o reforzamiento, ya que concentra demandas sísmicas significativas. Esta conclusión es coherente con las recomendaciones del diseño sísmico moderno, que plantea la necesidad de proteger los elementos primarios frente a concentraciones de daño para garantizar la seguridad global de la edificación (Priestley et al., 2007).

## Conclusiones

- Se logró hallar como se distribuye la energía sísmica en la edificación de cuatro niveles ubicada en Tacna mediante un análisis no lineal dinámico, lo que permitió identificar la demanda fuerza-desplazamiento lo cual produce una disipación de energía de la edificación asociada a cada nivel durante la acción sísmica, los resultados evidenciaron cómo la energía se concentra principalmente en los niveles inferiores, debido a la mayor rigidez estructural y la acumulación de esfuerzos en esos pisos. Esta distribución de energía aporta información clave para la identificación de zonas críticas, la evaluación de cómo es absorbida la energía y consecuentemente ayuda a tomar decisiones para futuras intervenciones de refuerzo o rediseño.
- Se cumplió con la idealización de los modelos de cómo se comportan de manera no lineal de los materiales empleados, para ello, se representó el concreto mediante el modelo Hognestad, el cual permite capturar la degradación de rigidez, la pérdida de resistencia y el comportamiento post-pico bajo cargas cíclicas, en cuanto al acero estructural, se utilizó el modelo bilineal elastoplástico, que reproduce adecuadamente el comportamiento inelástico bajo cargas de tensión y compresión, incluyendo el efecto de fluencia, estos modelos fueron implementados en un entorno de análisis no lineal sección tipo fibra.
- La aplicación de una metodología para el análisis no lineal dinámico en la estructura de cuatro pisos ubicada en Tacna (2024) permitió simular de manera eficaz y realista el comportamiento inelástico de la edificación ante eventos sísmicos severos. Esta metodología, basada en la norma ASCE/SEI 41-17, los pasos de diseño del ACI 318 además de recomendaciones técnicas que se encuentran en la guía NIST GCR 17-917-46v3, resultó ser efectiva y técnicamente sólida.

- Se halló exitosamente las fuerzas de corte y los desplazamientos máximos relativos en cada piso, para lo cual en el primer nivel el valor de la fuerza fue de 1.5 Mega Newtons y el desplazamiento relativo máximo fue de 21.35 mm, y en el cuarto nivel el valor de la fuerza fue de 1.1 Mega Newtons y el desplazamiento relativo máximo fue de 6.02 mm, observándose que la curva fuerza vs desplazamiento es mayor en el primer nivel que el cuarto nivel, lo que finalmente nos sugirió que el primer nivel debía de recibir un reforzamiento.

### **Recomendaciones y/o Sugerencias**

- Se recomienda seguir investigando y perfeccionando los modelos no lineales de materiales, incorporando efectos como daño acumulado, fatiga y comportamiento post-pico, con el fin de lograr simulaciones más precisas y realistas. Esta línea de investigación puede ser para profesionales del análisis estructural no lineal, y estudiantes de ingeniería civil que deseen especializarse en el comportamiento avanzado de materiales estructurales.
- Luego de haber usado el modelo para el concreto Hognestad, y el Bilineal elastoplástico para el acero, se recomienda a futuros investigadores emplear otro modelo más complejo tanto para el acero como para el concreto que permita apreciar un mayor detalle que no se pudo aplicar por razones de procesamiento computacional.
- Luego de haber seguido, cumplido y realizado todas las indicaciones de la norma ASCE 41-17, ASCE 318-19, NIST GCR 17-917-46v3, se recomienda a estudiantes que deseen conocer sobre el análisis dinámico no lineal y el comportamiento inelástico de edificaciones de concreto armado adopten esta misma metodología. Estas normativas y guías proporcionan criterios detallados para la caracterización de materiales, la representación de la no linealidad, y la evaluación del desempeño sísmico, lo que permite obtener modelos más realistas, confiables y alineados con estándares internacionales.
- Dado que el análisis no lineal evidenció una mayor concentración de energía en el primer nivel, recomendamos llevar a cabo estrategias específicas para volver más fuerte dicho nivel. Para edificaciones con características similares, una opción viable es el uso de dispositivos de disipación de energía u otras soluciones de control sísmico. Estas

intervenciones deben ser diseñadas e implementadas por profesionales especializados en ingeniería estructural, con el fin de garantizar su eficacia y seguridad.

## Referencias Bibliográficas

- American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 41-17: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*.
- Applied Technology Council. (2017). *Guidelines for nonlinear structural analysis for design of buildings – Part I: General (ATC-72-1)*. ATC. <https://www.atcouncil.org>
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica*. 6ta. Fideas G. Arias Odón.
- ATC 40 (1996). *Seismic evaluation and Retrofit of concrete Building"*. Volumen 1. California: Applied Technology Council, Redwood City.
- Barbat, A. H., Vargas, Y. F., Pujades, L. G., & Hurtado, J. E. (2016). *Evaluación probabilista del riesgo sísmico de estructuras con base en la degradación de rigidez*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería, 32(1), 39-47.
- Bedecarratz Salvadores, E. A. (2018). *Modelación no lineal de un edificio de hormigón armado y aplicación de metodología de diseño por desempeño*.
- Boore, D. M., & Watson-Lamprey, J. (2007). *Orientation-independent measures of ground motion*. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(5), 1502–1511. <https://doi.org/10.1785/0120060209>
- Calcina Peña, R. M. (2017). *Evaluación del desempeño sísmico de un edificio de once pisos utilizando análisis estático y dinámico no-lineal*.
- Esteba Apaza, A. E. (2017). *Análisis estático y dinámico no lineal en el desempeño de un edificio de concreto armado diseñado bajo la norma E-030 en Puno*.
- Falconí, R. A. (2008). *Análisis sísmico de edificios*. Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2018). *Seismic performance assessment of buildings. Volume 1 – Methodology (FEMA P-58-1)*. <https://www.fema.gov>

- FEMA 356 (2000). *Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of Building*. Virginia-USA: Kris Ingle.
- Garay Galindo, M. L., & Llaure Enriquez, L. N. (2020). *Evaluación de la capacidad sísmica de viviendas conformadas por sistemas estructurales de albañilería confinada y pórticos de concreto armado en el distrito de La Victoria, Lima*.
- Guerrero, G. (1983). *Teoría y diseño de estructuras de concreto armado*. Limusa.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación (Vol. 6, pp. 102-256)*. México: McGraw-Hill.
- 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.
- Huarachi Quispe, D. A., & Jinez Mendoza, S. I. (2023). *Análisis no lineal y evaluación de desempeño según ASCE/SEI 41 del pabellón "A" de la IE Jorge Chávez de la ciudad de Tacna, 2022*.
- Jaramillo Rivera, R., & Riveros Pedraza, C. E. (2011). *Análisis no lineal dinámico tridimensional de edificios en concreto reforzado sometidos a los registros del sismo de Quetame (2008)*.
- Jiménez Orrego, D. (2017). *Identificación de la condición de diafragma rígido o flexible a partir de instrumentación sísmica y modelación de losas tipo Shell o membrana en sistemas de resistencia lateral*.
- López, N., Ugel, R., & Herrera, R. I. (2017). *Análisis no lineal de una junta experimental de columna y vigas de concreto armado-columna de acero para pórticos*. Gaceta Técnica, 18(1), 35-52.
- Medina Maquera, M. A., & Ayma Flores, R. E. (2023). *Evaluación del desempeño sísmico de una edificación de salud de primer nivel en la ciudad de Tacna–2022*.

- Muñoz, A. (2002). *Ingeniería Sismorresistente*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- NIST. (2010). NEHRP Seismic Design Technical Brief N°04: Nonlinear Estructural Analysis for Seismic Design: A guide for practicing engineers. <https://www.nehrp.gov/pdf/nistgcr10-917-5.pdf>
- NIST. (2017a). Guidelines for nonlinear structural analysis and design of buildings. partI - general. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.17-917-46v1>
- NIST. (2017b). Guidelines for nonlinear structural analysis and design of buildings. partIIb reinforced concrete frames. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.17-917>
- NIST. (2017c). Recommended modeling parameters and acceptance criteria for nonlinear analysis in support of seismic evaluation, retrofit, and design. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.17-917-45>
- Norma Técnica E.030 *Diseño Sismorresistente* (2018), (2018).
- Núñez Palacios, A. B. (2018). *Diseño por desempeño de un edificio de hormigón armado utilizando el método de análisis tiempo-historia* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil).
- Ottazzi, G. (2003). *Apuntes del Curso de Concreto Armado I*. Lima: Fondo Editorial PUCP.
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Ductile reinforced concrete frames: Some comments on the special provisions for seismic design of ACI 318-71 and on capacity design*. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 8(1), 70-90.
- Park, R., & Paulay, T. (1980). *Estructuras de Concreto Reforzado*. México: Limusa
- Paulay, T., & Priestley, M. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings* (Vol. 768). New York: Wiley.
- Ramirez Gonzales, R. M. *Comparación entre metodologías de las normas E. 030 y ASCE 7-16 para la obtención de aceleraciones en los diafragmas de edificaciones en el Perú*.

- Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). (2016) *Norma Técnica de Edificación NTE*.  
Lima, Perú.
- Reyes, J. C., & Chopra, A. K. (2011). *Three-dimensional modal pushover analysis of buildings subjected to two components of ground motion, including its evaluation for tall buildings*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(7), 789-806.
- Saavedra Online. (2016, octubre 29). Verificación del cortante basal según COVENIN 1756-2001. WordPress. <https://saavedraonline.wordpress.com/2016/10/29/verificacion-del-cortante-basal-segun-covenin-1756-2001/>
- Samaniego Rimache, Í. A., & Sánchez Bendezú, G. J. (2020). *Vulnerabilidad sísmica empleando el análisis dinámico no lineal incremental de una vivienda multifamiliar Ate-Lima 2020*.
- Villarreal Martínez, H. F. (2001). *Importancia de la aplicación de los métodos inductivo-hipotético y deductivo-inferencial como generadores de conocimientos en el nivel medio superior (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León)*.

## Matriz de Consistencia

Definición del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	<u>Variable Independiente</u> Análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles  Indicadores de la V.I: - Propiedades dinámicas - Regularidad - Sistema estructural - Modelos de comportamiento no lineal de los materiales	<u>Tipo de Investigación</u> Pura  <u>Nivel de investigación</u> Predictivo  <u>Método</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deductivo</li> <li>• Descriptivo</li> <li>• No Experimental</li> </ul> <u>Población</u> La población está representada por todas las edificaciones de 4 niveles que usan el sistema de pórticos en la ciudad de Tacna.  <u>Muestra</u> La muestra es una edificación típica de 4 niveles que usa el sistema de pórticos en la ciudad de Tacna
¿Como es la distribución de energía sísmica mediante análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles Tacna 2024?	Determinar la distribución de energía sísmica mediante análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles Tacna 2024	No se obtiene una adecuada distribución de energía sísmica mediante análisis no lineal dinámico de las respuestas de la edificación de 4 niveles Tacna 2024		
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	<u>Variable Dependiente</u> Distribución de energía sísmica en una edificación de 4 niveles.  Indicadores de la V.D: - Fuerzas corte - Desplazamientos	
- ¿Cuál es el modelo del comportamiento no lineal de los materiales que se emplean en la edificación de 4 niveles Tacna 2024?  - ¿Cómo se realiza un análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles Tacna 2024?  - ¿Qué respuesta se emplea para determinar la distribución de energía sísmica en plantas de la edificación de 4 niveles Tacna 2024?	Idealizar modelos del comportamiento no lineal de los materiales que se emplean en la edificación de 4 niveles Tacna 2024.  Aplicar una metodología para realizar el análisis no lineal dinámico en una edificación de 4 niveles Tacna 2024  Obtener respuestas de un análisis no lineal para obtener la energía sísmica en plantas de la edificación de 4 niveles Tacna 2024	Los modelos de comportamiento no lineal resultan ideales para analizar la distribución sísmica de una vivienda de 4 niveles, Tacna 2024  - Aplicando la metodología Tiempo – historia se realizará el análisis dinámico no lineal de una edificación de 4 niveles, Tacna 2024.  - la repuesta obtenida luego realizar el análisis dinámico no lineal no permite conocer la distribución de energía sísmica en una edificación de 4 niveles, Tacna 2024.		

# **Anexos**

# **Anexo A: Código Fuente del Modelo Estructural en OpenSeesPy**

## # Inicio

```
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 y Diafragmas

```
# --- Leer nodos desde archivo ---
nodos = np.loadtxt('nodosfinal.txt', delimiter=',')
num_nodos = len(nodos)

# --- Inicializar modelo OpenSeesPy ---
ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 3, '-ndf', 6)

# --- Crear nodos desde archivo ---
for i in range(num_nodos):
    nodo_id = int(nodos[i, 0])
    x, y, z = nodos[i, 1:4]
    ops.node(nodo_id, x, y, z)

# --- Crear nodos maestros ---
nodos_maestros = {
    143: (4000.0, 8900.0, 2800.0),
    144: (4000.0, 8900.0, 5600.0),
    145: (4000.0, 8900.0, 8400.0),
    146: (4000.0, 8900.0, 11200.0)
}
for nodo_id, coord in nodos_maestros.items():
    ops.node(nodo_id, *coord)

# --- Inicializar tabla de restricciones ---
tabla_restricciones = []

# --- Aplicar restricciones y registrar ---
for i in range(num_nodos + len(nodos_maestros)):
    nodo = i + 1
    if nodo <= 22:
        fix = [1, 1, 1, 1, 1, 1]
        tipo = "Empotrado"
    else:
        fix = [0, 0, 1, 1, 1, 0]
```

```

    tipo = "Parcial (GDL 3,4,5)"
    ops.fix(nodo, *fix)
ops.fix(nodo, *fix)
# Obtener coordenadas
if nodo <= num_nodos:
    x, y, z = nodos[nodo - 1, 1:4]
else:
    x, y, z = nodos_maestros[nodo]
# Guardar en tabla
tabla_restricciones.append({
    "Nodo": nodo,
    "X": x,
    "Y": y,
    "Z": z,
    "Tipo": tipo,
    "Restricciones (DX,DY,DZ,RX,RY,RZ)": fix
})
# --- Mostrar tabla en consola ---
df = pd.DataFrame(tabla_restricciones)
print(df.to_string(index=False))

# --- Diafragmas rígidos ---
ops.rigidDiaphragm(3, 143, *range(23, 53))
ops.rigidDiaphragm(3, 144, *range(53, 83))
ops.rigidDiaphragm(3, 145, *range(83, 113))
ops.rigidDiaphragm(3, 146, *range(113, 143))

```

## # Transformación de Elementos

```

# El eje z del elmto (local) con que eje global coincide
ops.geomTransf('Linear', 101, 0, -1, 0); # Columnas
ops.geomTransf('Linear', 102, 0, 0, 1); # Vigas en eje X e Y

```

## # Materiales y Secciones Fibra

```

# DEFINICIÓN DE MATERIALES:
fpc = -20.601      # En MPA = N/mm2
epsc0 = -0.002   # Deformación para f'c (0.002)
Ec = 2*fpc/epsc0
fpcu = 0.85*fpc
epsU = -0.005    # Deformación para la tensión de rotura confinado
Fy = 412
Es = 196200
shr = 0.01
ops.uniaxialMaterial('Concrete01', 1, fpc, epsc0, fpcu, epsU)
ops.uniaxialMaterial('Steel01', 2, Fy, Es, shr)

# Columnas perimetrales C1 300x300 nivel 1 2 3 y 4
GJ1 = 1.01E+13
# section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 1, '-GJ', GJ1)

```

```

ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -150], *[150, 150])
# layer('straight', matTag, numFiber, areaFiber, *start, *end)
ops.layer('straight', 2, 4, 129, *[-100, -100], *[-100, 100])
ops.layer('straight', 2, 4, 129, *[100, -100], *[100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 129, *[0, -100], *[0, 100])

# Columna central C2 400 x 350 nivel 1, 2, 3 y 4
GJ3 = 2.43E+13
ops.section('Fiber', 2, '-GJ', GJ3)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-200, -175], *[200, 175])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-150, -125], *[-150, 125])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[150, -125], *[150, 125])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -125], *[0, 125])

# Viga Ext 250x400
GJ4 = 1.13E+13
ops.section('Fiber', 3, '-GJ', GJ4)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -200], *[125, 200])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-95, -140], *[95, -140])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-95, 140], *[95, 140])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-95, 0], *[95, 0])

# Viga Int 300x500
GJ5 = 2.50E+13
ops.section('Fiber', 4, '-GJ', GJ5)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -250], *[150, 250])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-120, -190], *[120, -190])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-120, 190], *[120, 190])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[-120, 0], *[120, 0])

# Secciones Elásticas
# section('Elastic', secTag, E_mod, A, Iz, Iy, G_mod, Jxx, alphaY=None,
alphaZ=None)
ops.section('Elastic', 5, Ec, 90000, 6.75E+8, 6.75E+8, 8881.99, 1.14E+09)
# C1 300x300 nivel 1 2 3 y 4
ops.section('Elastic', 6, Ec, 140000, 1.87E+09, 1.43E+09, 8881.99, 2.74E+09)
# C3 400x350 nivel 1 2 3 y 4
ops.section('Elastic', 7, Ec, 100000, 1.33E+9, 5.21E+8, 8881.99, 1.28E+9)
# Viga Ext 250x400
ops.section('Elastic', 8, Ec, 150000, 3.125E+9, 1.125E+9, 8881.99, 2.82E+9)
# Viga Int 300x500

```

## # Elementos

```

elementos = np.loadtxt('elementos_final_01.txt', delimiter = ',')
num_elementos = len(elementos)
# beamIntegration('HingeRadau', tag, secI, lpI(d/2), secJ, lpJ, secE(seccion
central))
ops.beamIntegration('HingeRadau', 1, 1, 150, 1, 150, 5)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 2, 2, 200, 2, 200, 6)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 3, 3, 200, 3, 200, 7)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 4, 4, 250, 4, 250, 8)

```

```

for i in range(1, num_elementos + 1):
    if i <= 84:
        if i in [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 50, 51,
52, 53, 54, 55, 56, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77]:
            #Columnas centrales C1 nivel 1, 2, 3 y 4
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]),
int(elementos[i-1, 2]), 101, 2)
        else:
            #Columnas Perimetrales C2 nivel 1, 2, 3 y 4
            # element('forceBeamColumn', eleTag, *eleNodes, transfTag,
integrationTag,
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]),
int(elementos[i-1, 2]), 101, 1)

        elif i in [104, 105, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 106,
97, 107, 127, 128, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 129, 120,
130, 150, 151, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 152, 143, 153,
173, 174, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 175, 166, 176]:
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]),
int(elementos[i-1, 2]), 102, 4)
        else:
            ops.element('forceBeamColumn', i, int(elementos[i-1, 1]),
int(elementos[i-1, 2]), 102, 3)

```

## # Cargas en Elementos

```

# timeSeries|Constant (no depende ddl tiempo)| tSTag | 1 (fact de escala,
opcional)
ops.timeSeries('Constant', 1)

# Creando patron de carga

# pattern('Plain', patternTag, tSTag, '-fact', fact) solo aplica a la seccion de
300*300 faltaria de la seccion 350*350 y de la seccion 400*400

# de igual manera para las vigas
ops.pattern("Plain", 1, 1)
Wx = 3.36 #N/mm
Wz = 3.6

for i in range(len(elementos)):
    if i < 84:
        # eleLoad('-ele', *eleTags, '-range', eleTag1, eleTag2, '-type', '-
beamUniform', Wy, <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)

```

## # Cargas en Elementos

## # Masas

```
# mass(NODE_TAG, masX N s2/mm), masY, masZ, JX, JY, JZ) la masa rotacional
mediante steiner
Mzero = 1.0e-6;
ops.mass(143, 132.17, 132.17, Mzero, Mzero, Mzero, 3.68E+9)
ops.mass(144, 132.17, 132.17, Mzero, Mzero, Mzero, 3.68E+9)
ops.mass(145, 132.17, 132.17, Mzero, Mzero, Mzero, 3.68E+9)
ops.mass(146, 95.17, 95.17, Mzero, Mzero, Mzero, 2.65E+9)
```

## # Análisis Modal

```
nn = 4      # Nro de niveles
N = (3*nn)  # Nro de modos
OmegaSq = ops.eigen('-fullGenLapack', N)
OmegaSq = np.array(OmegaSq)
Omega = OmegaSq*0.5
```

## # Carga Axial

```
# 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')
```

## # Ploteo

```
fig_wi_he = 30., 20.
ele_shapes = {}

for i in range(len(elementos)):
    ele_shapes[i+1] = ['rect', [300, 300]] # Aquí agregas cada elemento
opsv.plot_extruded_shapes_3d(ele_shapes, fig_wi_he=fig_wi_he)
plt.show()
```

## # Analisis No lineal Dinámico

```
# Amortiguamiento Rayleigh ----- consultar en clase o buscar teoría
zeta1 = 0.03
zeta3 = 0.02
# Determinar los coef alpha y beta.... resolviendo un sist matricial
B = np.zeros(shape=(2,2))
B[0,0] = 1/Omega[0]; B[0,1] = Omega[0]
B[1,0] = 1/Omega[2]; B[1,1] = Omega[2]

b = np.zeros(2)
b[0] = 2*zeta1
b[1] = 2*zeta3
a = np.linalg.solve(B,b) # a[0] = alphaM, a[1] = beta
# ops.rayleigh(alphaM, betaK, betaKinit, betakcomm)
ops.rayleigh(a[0], 0.0, 0.0, a[1])

# Definir la función de aceleración
ops.timeSeries('Path', 2, '-filePath', 'lima_70_11_06_25.txt', '-dt', 0.02, '-factor', (0.65*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') # Para 38
ops.numberer('RCM') # Para 3D
ops.system('UmfPack')
# ops.test('NormDispIncr', Tolerancia, pasos)
ops.test('NormDispIncr', 1e-9, 100)
ops.algorithm('KrylovNewton')
ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25)
ops.analysis('Transient')

t = ops.getTime()

ops.recorder('Node', '-file', 'DespDinRoof.out', '-time', '-node', 146, '-dof', 1, 'disp')

ops.recorder('Element', '-file', 'FzCortDin.out', '-time', '-eleRange', 1, 84, '-dof', 1, ' globalForce')

ops.recorder('Node', '-file', 'DisDin.out', '-time', '-node', 143, 144, 145, 146, '-dof', 1, 'disp')
dt = 0.02
Acel = np.loadtxt('lima_70_11_06_25.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')
```

## # Graficas Analisis Dinámico No lineal

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.ticker import ScalarFormatter

# CONFIGURACIÓN DEL GRÁFICO PROFESIONAL
color_techo = 'blue'      # Azul oscuro profesional para desplazamiento techo
color_histeresis = '#B22222' # Rojo vino profesional para curvas histeréticas
plt.rcParams.update({'#4F81BD
    'font.size': 11,
    'font.family': 'sans-serif'
})

# CARGA DE ARCHIVOS
T_D = np.loadtxt('DespDinRoof.out')
D = np.loadtxt('DisDin.out')
F = np.loadtxt('FzCortDin.out')

# CÁLCULO DE FUERZAS POR NIVEL
V1 = -np.sum(F[:, 1:22], axis=1)
V2 = -np.sum(F[:, 22:43], axis=1)
V3 = -np.sum(F[:, 43:64], axis=1)
V4 = -np.sum(F[:, 64:85], axis=1)

# CÁLCULO DE DERIVAS POR NIVEL
DR1 = D[:, 1]
DR2 = D[:, 2] - D[:, 1]
DR3 = D[:, 3] - D[:, 2]
DR4 = D[:, 4] - D[:, 3]

# CREACIÓN DE DATAFRAMES
df_techo = pd.DataFrame({
    'Tiempo_s': T_D[:, 0],
    'Desplazamiento_Techo_mm': T_D[:, 1]
})
df_niveles = pd.DataFrame({
    'Tiempo_s': T_D[:, 0],
    'Deriva_Nivel_1_mm': DR1,
    'Fuerza_Nivel_1_N': V1,
    'Deriva_Nivel_2_mm': DR2,
    'Fuerza_Nivel_2_N': V2,
    'Deriva_Nivel_3_mm': DR3,
    'Fuerza_Nivel_3_N': V3,
    'Deriva_Nivel_4_mm': DR4,
    'Fuerza_Nivel_4_N': V4
})

# EXPORTACIÓN A EXCEL
with pd.ExcelWriter('resultados_dinamicos.xlsx') as writer:
    df_techo.to_excel(writer, sheet_name='Desplazamiento_Techo', index=False)
    df_niveles.to_excel(writer, sheet_name='Curvas_Histereticas', index=False)
```

```

print("✅ Archivo 'resultados_dinamicos.xlsx' creado exitosamente.")

# GRÁFICO 1: Desplazamiento del Techo vs Tiempo
plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.plot(T_D[:, 0], T_D[:, 1], color=color_techo, linewidth=1.5)
plt.xlabel('Tiempo (s)')
plt.ylabel('Desplazamiento Techo (mm)')
plt.title('Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Lima 70', fontsize=13,
fontweight='bold')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
plt.tight_layout()
plt.savefig('desplazamiento_techo.png', dpi=600, bbox_inches='tight',
facecolor='white')
plt.show()

# GRÁFICO 2: Curvas Histeréticas por Nivel (mismo color para uniformidad)
niveles = [1, 2, 3, 4]
derivadas = [DR1, DR2, DR3, DR4]
fuerzas = [V1, V2, V3, V4]

fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(10, 8))
axs = axs.flatten()

for i in range(4):
    axs[i].plot(derivadas[i], fuerzas[i], color=color_histeresis, linewidth=1.5)
    axs[i].set_xlabel('Desplazamiento (mm)', fontsize=11)
    axs[i].set_ylabel('Fuerza Cortante (N)', fontsize=11)
    axs[i].set_title(f'Nivel {niveles[i]}', fontsize=11, fontweight='bold')
    axs[i].grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)

# ✅ Aplicando formato correcto al eje Y
formatter = ScalarFormatter(useMathText=True)
formatter.set_scientific(True)
formatter.set_powerlimits((-3, 3)) # Ajusta cuándo aparece notación
científica
axs[i].yaxis.set_major_formatter(formatter)

fig.suptitle('Curvas Histeréticas - Lima 70', fontsize=12, fontweight='bold',
y=0.94)
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.95])
plt.savefig('curvas_histereticas.png', dpi=600, bbox_inches='tight',
facecolor='white')
plt.show()

```

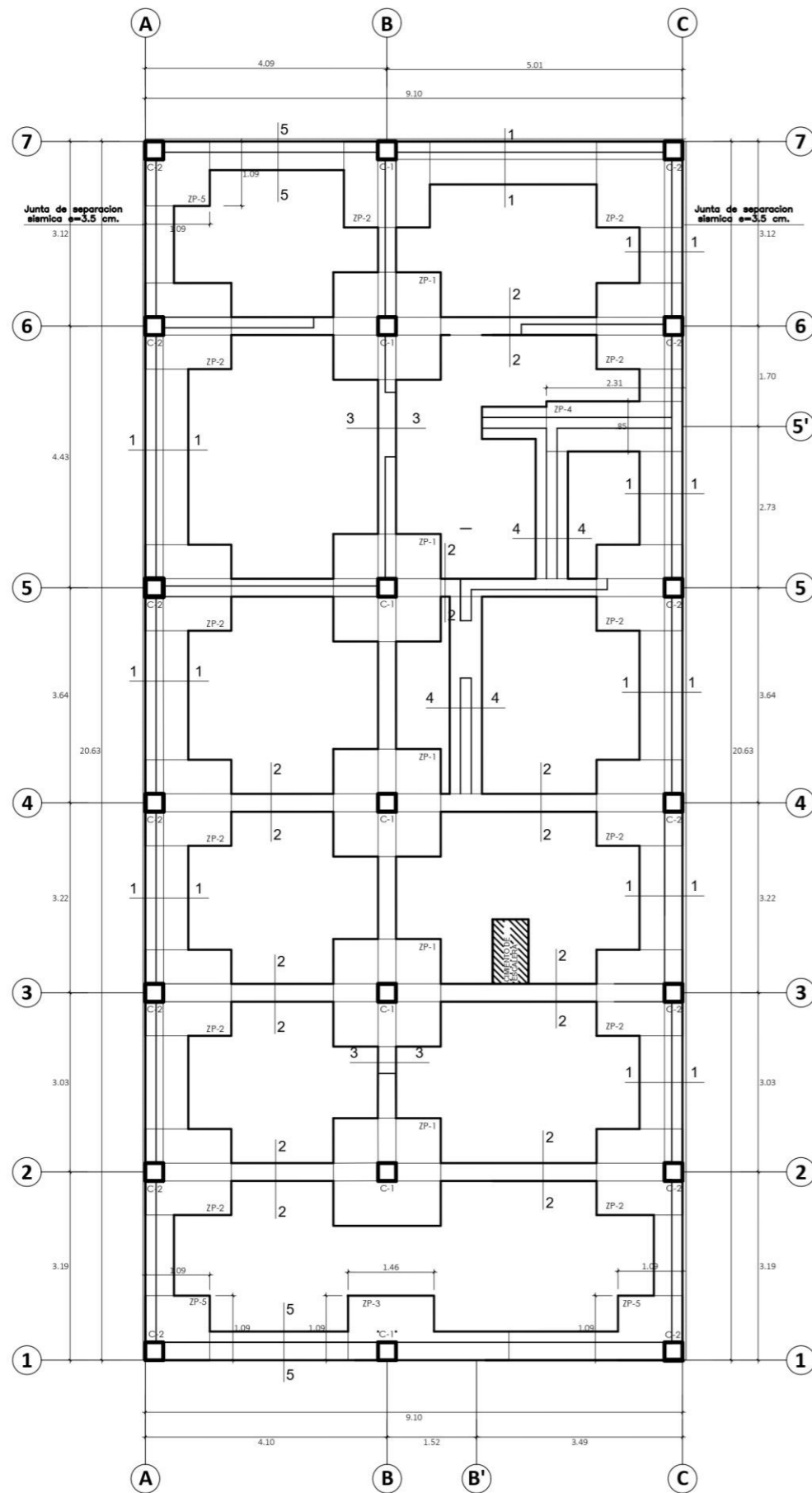
## # Desplazamientos Relativos Máximos y Energía en Plantas

```

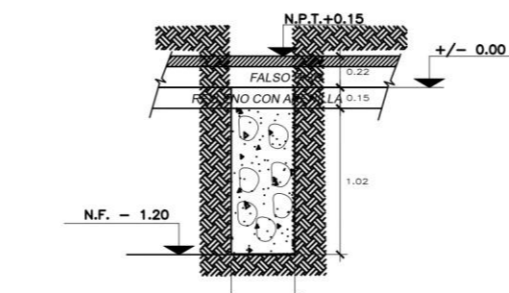
maxDR = round(max(abs(DR1)), 2), round(max(abs(DR2)), 2), round(max(abs(DR3)), 2),
round(max(abs(DR4)), 2)
Ep = round(np.trapz(V1, DR1)/1e3, 2), round(np.trapz(V2, DR2)/1e3, 2),
round(np.trapz(V3, DR3)/1e3, 2), round(np.trapz(V4, DR4)/1e3, 2)
for i in range(4):
    print('Max Dr', i+1, ' = ', maxDR[i], 'mm')
for i in range(4):
    print('Energía Planta', i+1, ' = ', Ep[i], 'J')

```

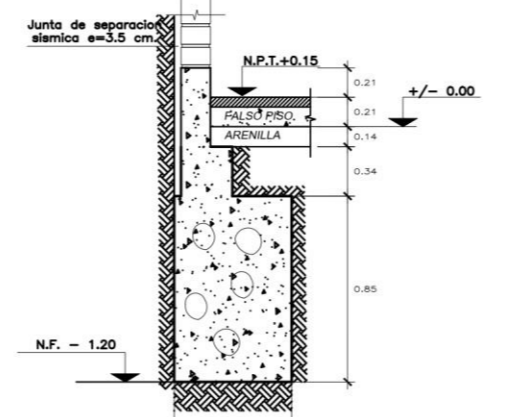
## **Anexo B: Planos de la Edificación**



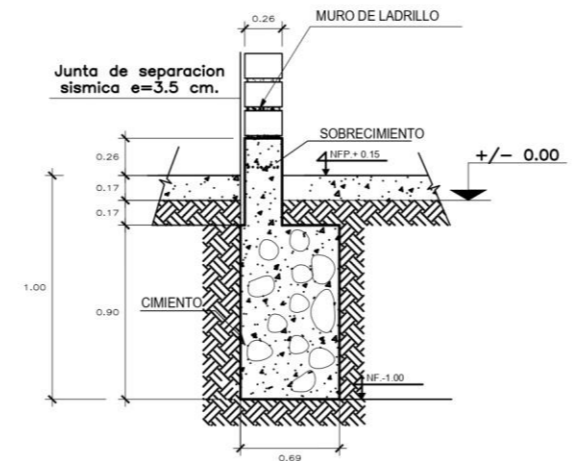
**CIMENTACION**  
Escala 1/50



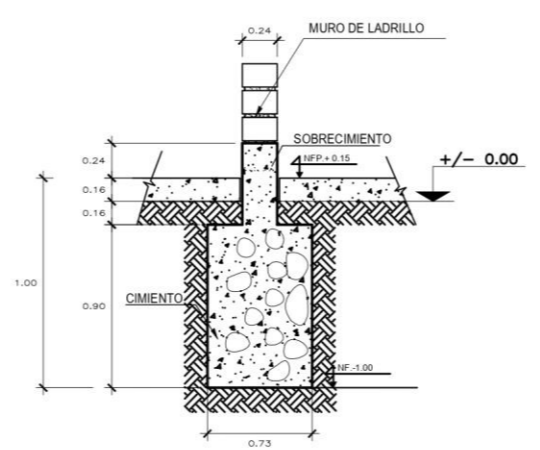
**CORTE 2-2**  
ESC. 1/25



**CORTE 1-1**  
ESC. 1/25



**CORTE 5-5**  
ESC. 1/25



**CORTE 4-4**  
ESC. 1/25

**TRASLAPES Y EMPALMES**

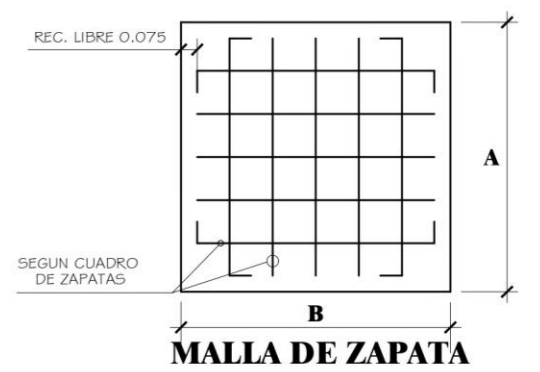
Ø	LOSAS VIGAS (cm)	COLUMNA (cm)	LOSAS Y VIGAS	COLUMNAS	ESTRIBOS	CUADRO DE GANCHOS STANDARD Y DOBLADO DE ESTRIBOS EN VARILLAS DE FIERRO CORRUGADAS	
						a	G(cm)
6 mm	30	-				1/4"	15
8 mm 3/8"	40	30				3/8"	20
1/2"	50	40				1/2"	25
5/8"	60	50				5/8"	35
3/4"	70	60				3/4"	45
1"	120	90				1"	45

**NOTA:** El acero utilizado en forma longitudinal en vigas, losas de cimentación, columnas, deberán terminar en ganchos standard, las cuales se alijan en el concreto con dimensiones especificas en el cuadro mostrado.

Ø	r(cm.)	a(cm.)
1/4"	1.3	6.5
3/8"	2.0	10.0
1/2"	2.5	12.5

**CUADRO DE ZAPATAS**

TIPO	DIMENSION A x B	CANT.	H	PARRILLA
Zp-1	1.50 x 1.50	05	0.60	Ø 1/2" @ 0.20
Zp-2	1.20 x 1.20	12	0.60	Ø 1/2" @ 0.20
Zp-3	0.90 x 2.15	01	0.60	Ø 1/2" @ 0.20
Zp-4	0.70 x 0.90	01	0.60	Ø 1/2" @ 0.20
Zp-5	0.90 x 0.90	03	0.60	Ø 1/2" @ 0.20



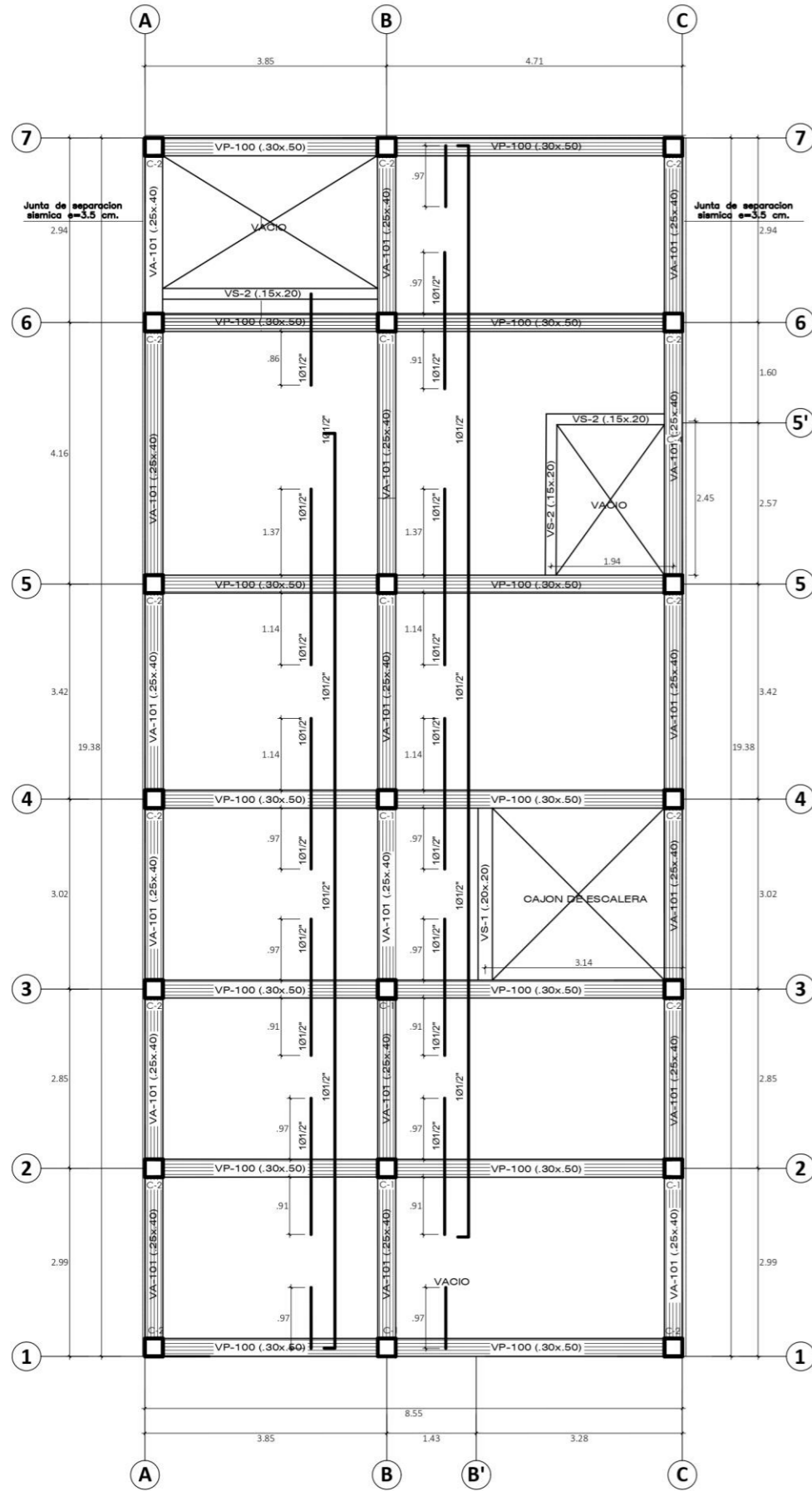
**CUADRO DE COLUMNAS**

SECCION	C-1	C-2	C-3
	<p>Ø 3/8"; 1 @ 0.05, 5 @ 0.10, 2 @ 0.15, Resto @ 0.20 C/EXT.</p>	<p>Ø 3/8"; 1 @ 0.05, 5 @ 0.10, 2 @ 0.15, Resto @ 0.20 C/EXT.</p>	<p>Ø 3/8"; 1 @ 0.05, 4 @ 0.10, Resto @ 0.25 C/EXT.</p>

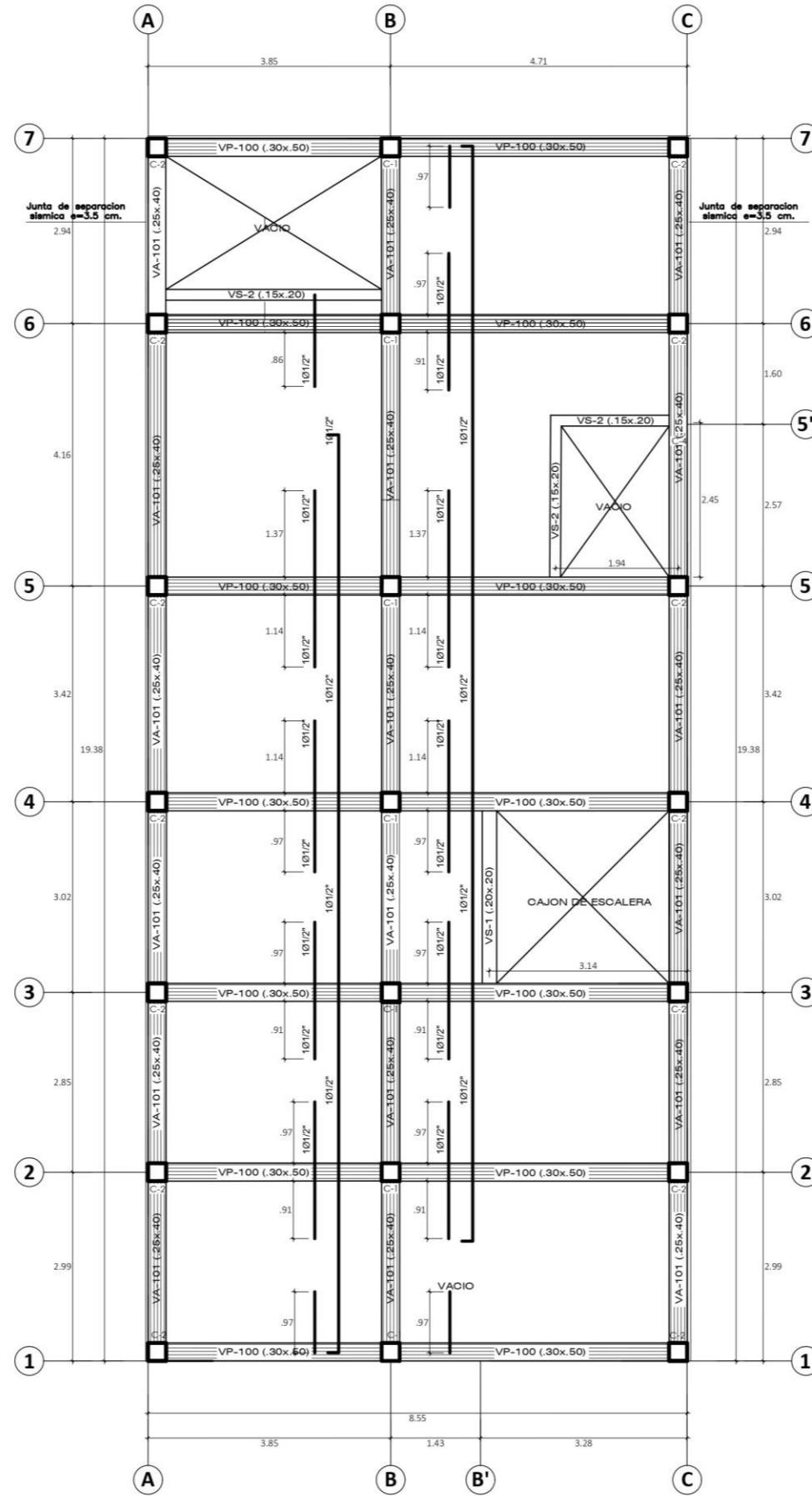
**ESPECIFICACIONES TECNICAS**

<p><b>-Condiciones del Suelo:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Capacidad Portante del Suelo = 0.80 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>Profundidad de Cimentación = -1.20 mts.</li> <li>Tipo de Cimentación: CIMENTACION ARMADA</li> <li>Estrado de Apoyo: Arcilla limosa</li> </ol> <p>5 -Agresividad del Suelo: Moderado, Usar Cemento Tipo MS</p> <p>6 -Suelo Licuefactable: No</p> <p>7 -Factor de Seguridad: 3</p> <p>8 -Recomendaciones Adicionales: No debe cimentarse sobre Turba, Suelo Organico, Tierra Vegetal, Desmonte o Reteno Sanitario. En Caso de encontrarlos remover dichos materiales y reemplazarlos por Material Granular seleccionado Tipo A-1-a, compactado en capas de espesor maximo de 20 cm. a una densidad menor al 95% del Proctor modificado.</p> <p><b>-Especificaciones Sobre Albañileria:</b></p> <p>-La Albañileria portante sera de ladrillo tipo IV (fb=130 kg/cm<sup>2</sup>)</p> <p>-La Resistencia a la Compresion Axial en Pilas sera: f<sub>m</sub>=85 kg/cm<sup>2</sup></p> <p>-El Mortero sera en proporcion Cemento: Arena 1:4 (P-2)</p> <p>-Los tabiques seran de ladrillo tubular o hueco, maquinado de arcilla cocida</p> <p>-Los tabiques tendran columnetas de armostres.</p> <p>-En los niveles superiores, las columnetas se anclaran en la losa de techo, en caso de caer en zona de ladrillo, este se retirara para asegurar un anclaje efectivo.</p>	<p><b>-Calidad del Concreto y del Acero:</b></p> <p>Cimentacion: f<sub>c</sub> = 210 kg/cm<sup>2</sup></p> <p>Cemento de Concreto Simple: 1.10 + 30% P.M</p> <p>Soldado e=0.10m: f<sub>c</sub> = 112</p> <p>Sobrecimiento Simple: f<sub>c</sub> = 140 kg/cm<sup>2</sup></p> <p>Zapatas y Vigas de Cimentacion: f<sub>c</sub> = 210 kg/cm<sup>2</sup></p> <p>Columnas:</p> <p>1° y 2° nivel: f<sub>c</sub> = 245 kg/cm<sup>2</sup></p> <p>Resto: f<sub>c</sub> = 210 kg/cm<sup>2</sup></p> <p>Columnas de confinamiento: f<sub>c</sub> = 175 kg/cm<sup>2</sup></p> <p>Concreto en Vigas, Losas, Escal.: f<sub>c</sub> = 210 kg/cm<sup>2</sup></p> <p>Acero de Refuerzo: f<sub>y</sub> = 420 kg/cm<sup>2</sup></p> <p><b>-Recubrimientos:</b></p> <p>Zapatas: fondo y costados: 5.0 cms</p> <p>Vigas de Cimentacion: 5.0 cms</p> <p>Columnas: 3.0 cms</p> <p>Columnas de confinamiento: 2.0 cms</p> <p>Vigas Peraltadas: 3.0 cms</p> <p>Vigas Chatas: 2.0 cms</p> <p>Losas: Escaleras: 2.0 cms</p> <p><b>-Normas de Diseño:</b></p> <p>Normas Tecnicas E-060 "Concreto Armado"</p> <p>Normas de Diseño Sismo-Resistente E-030</p> <p>Reglamento Nacional de Edificaciones - 2014</p> <p>Normas de Carga E-020</p> <p>Normas de Albañileria E-070</p>	<p><b>-Parametros Sismo - Resistente:</b></p> <p>a) Sistema Estructural: Albañileria</p> <p>b) Configuración estructural: Regular</p> <p>c) Parametro para definir Fuerza Sismica:</p> <p>-Factor de Zona 4: Z=0.45</p> <p>-Factor de Suelo (Tipo S-2): S=1.05</p> <p>-Factor de Uso (Categoría C): U=1.0 (Edif. Comunes)</p> <p>-Factor de Reduccion: (x-x) Rd= 8 (y-y) Rd= 8</p>
--	--	--

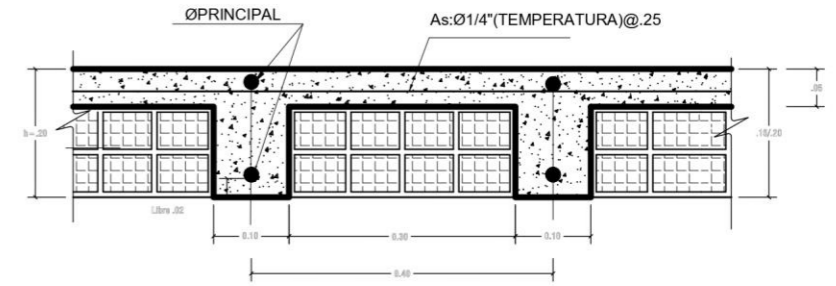
	TITULO: DISTRIBUCION DE ENERGIA SISMICA MEDIANTE ANALISIS DINAMICO NO LINEAL EN UNA EDIFICACION DE 4 NIVELES, TACNA 2024	ASesor: ING. MTR. WILBER MENDOZA RAMIREZ
	PRESENTADO POR: BACH. ANDRES DIEGO CATACORA SITHICALA BACH. LUIS GUSTAVO COLQUE MAMANI	LÁMINA Nº: E-01
UBICACION: TACNA	PLANO: CIMENTACIONES	FECHA: 30 DE AGOSTO DEL 2025 ESCALA: INIDICADA



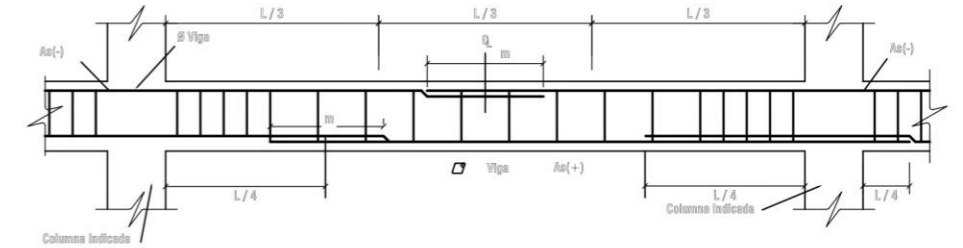
**ALIGERADO 1°, 2° y 3° PISO**  
Escala 1/50



**ALIGERADO 4° PISO**  
Escala 1/50



**CORTE TIPICO DE ALIGERADO h=20**  
ESC.: 1/10



Ø	La
3/8"	.40
1/2"	.60
5/8"	.80
3/4"	.70
1"	1.70

**NOTA:**  
- NO EMPALMADAR MAS DEL 60 % DEL AREA TOTAL EN UNA MISMA SECCION  
- LA DISTANCIA ENTRE EMPALMES CONSECUTIVOS DEBE SER:  
- PARA ALIGERADOS Y LIGAS EL ACERO INFERIOR DE EMPALMADA SOBRE LOS APOYOS CON UNA LONGITUD UNA LONGITUD MINIMA DE 0.30 m.

Ø	Sup.	Inf.
3/8"	0.40	0.40
1/2"	0.50	0.40
5/8"	0.60	0.50
3/4"	0.75	0.60

**NOTA:** ZONAS EN LAS QUE NO SE EFECTUAN TRASLAPES  
1.- ARMADURA INFERIOR EN EL TERCIO CENTRAL.  
2.- ARMADURA SUPERIOR EN APOYOS CONTINUOS.  
3.- ARMADURA SUPERIOR EN VOLADIZOS.

**TRASLAPES DE ACERO EN VIGAS**  
ESC.: 1/25

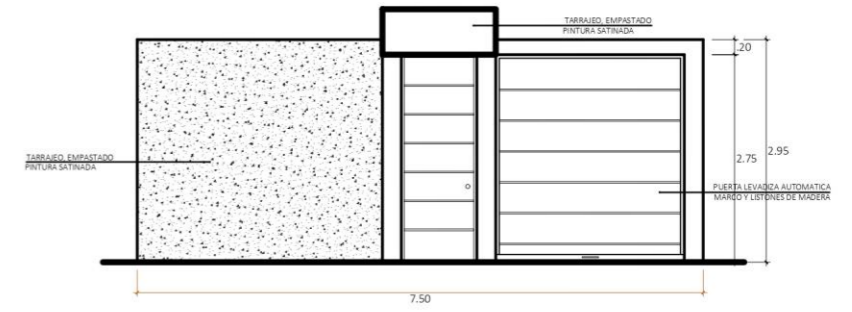
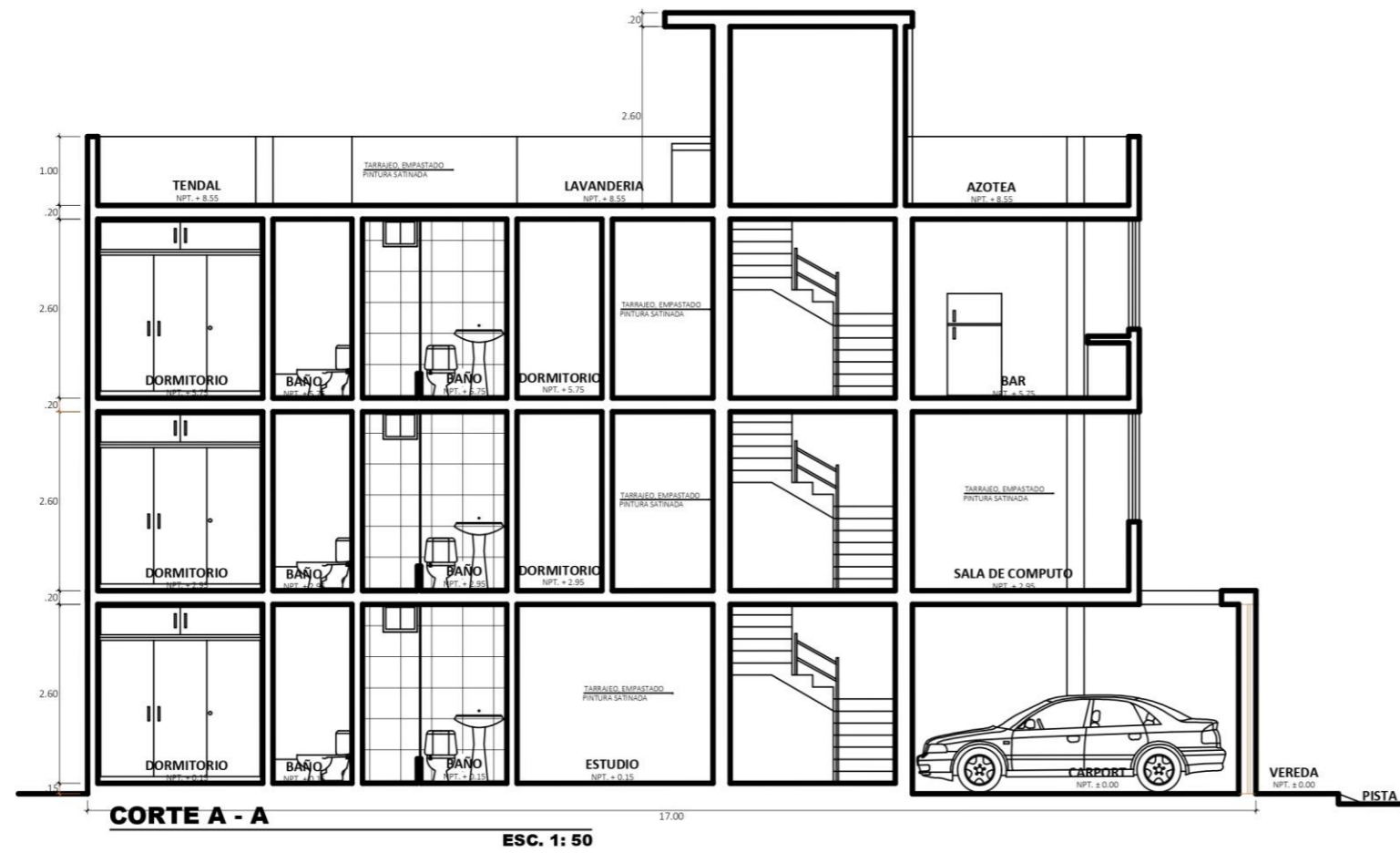
	SECCION: VP-100-200	SECCION: VA-101	SECCION: VCH	SECCION: VS-1
SECCION	30 x 50	25 x 40	25 x 20	15 x 20
REFUERZO	5 Ø 5/8" + 3Ø1/2"	3 Ø 5/8" + 3Ø1/2"	5 Ø1/2"	4 Ø1/2"
	TIPO 1	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 2

ESCALA 1/25

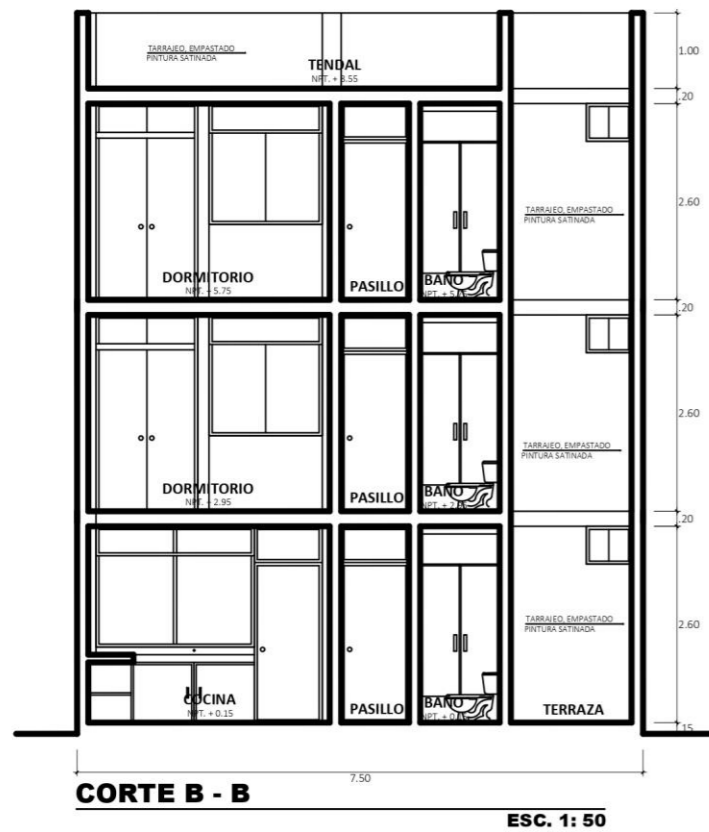
**CUADRO DE ESTRIBOS**

TIPO	Ø	ESPACIAMIENTO
1	3/8"	1@.05, 5@.10, 2@.15 rto.@.20
2	3/8"	1@.05, 6@.10, rto. @.25

	TESIS: DISTRIBUCION DE ENERGIA SISMICA MEDIANTE ANALISIS DINAMICO NO LINEAL EN UNA EDIFICACION DE 4 NIVELES, TACNA 2024 PRESENTADO POR: BACH. ANDRES DIEGO CATAFORA SINTECALA BACH. LUIS GUSTAVO COLOQUE MAMANI	ASESOR: ING. MTR. WILBER MENDOZA RAMIREZ
	LUBICACION: TACNA PLANO: ALIGERADOS FECHA: 30 DE AGOSTO DEL 2025 ESCALA: INDICADA	LAMINA Nº: <b>E-02</b>



**ELEVACION CERCO PERIMETRICO**  
ESC. 1: 50



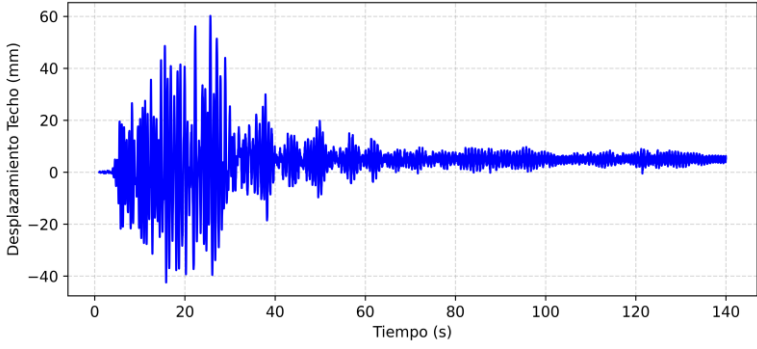
**ELEVACION PRINCIPAL**

ESC. 1: 50

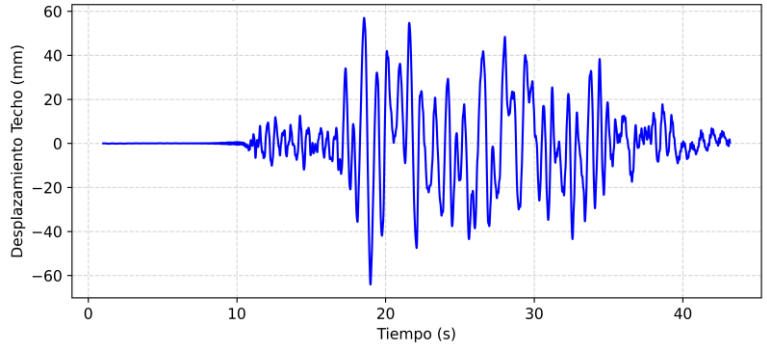
	TESIS: DISTRIBUCION DE ENERGIA SISMICA MEDIANTE ANALISIS DINAMICO NO LINEAL EN UNA EDIFICACION DE 4 NIVELES, TACNA 2024	ASESOR: ING. MTR. WILBER MENDOZA RAMIREZ
	PRESENTADO POR: BACH. ANDRES DIEGO CATACORA SNIETCALA BACH. LUIS GUSTAVO COLQUE MAMANI	LABORATORIO:
UBICACION: TACNA	PLANO: CORTES Y ELEVACIONES	FECHA: 30 DE AGOSTO DEL 2025
		ESCALA: INDICADA
<b>A-01</b>		

# **Anexo C: Respuesta de la Edificación Frente a los Sismos**

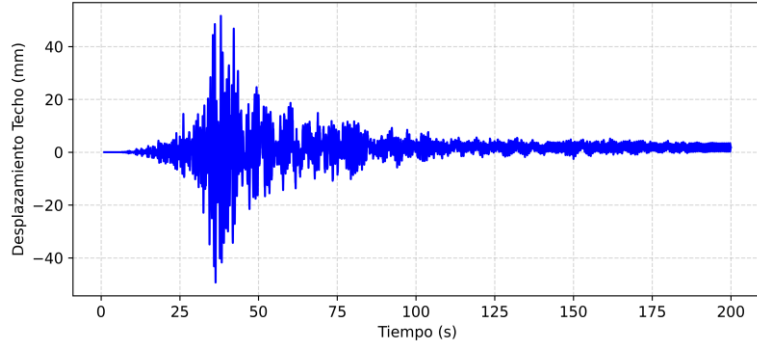
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Darfield**



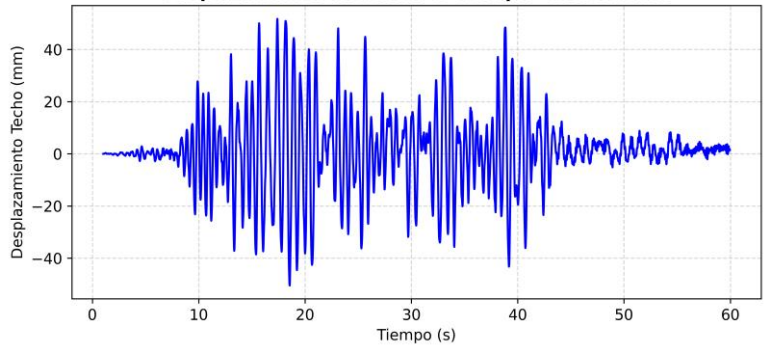
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Duzce**



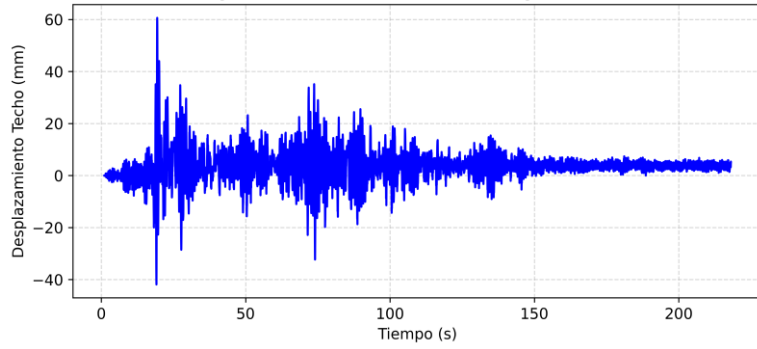
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - El Mayor**



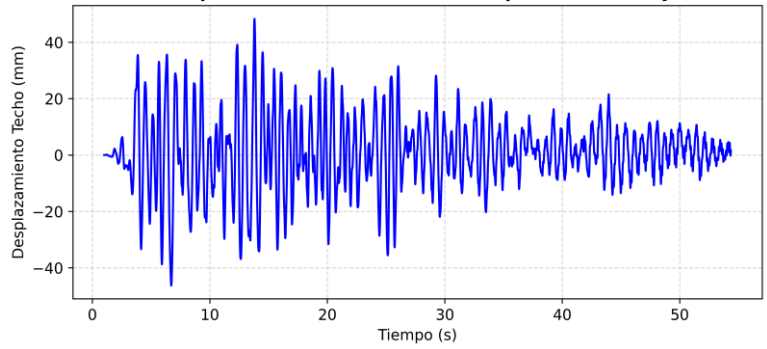
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Hector Mine**



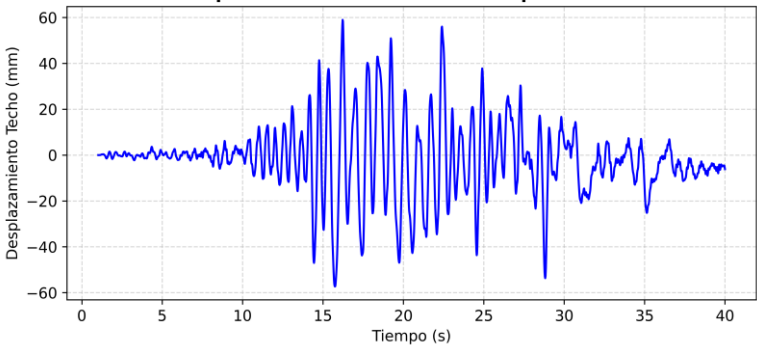
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Ica 2007**



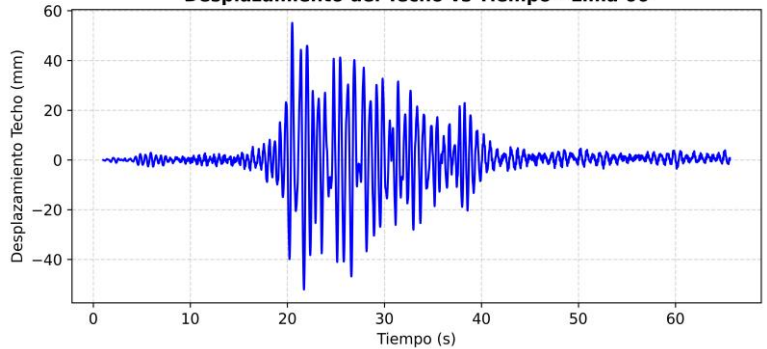
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Kern County**



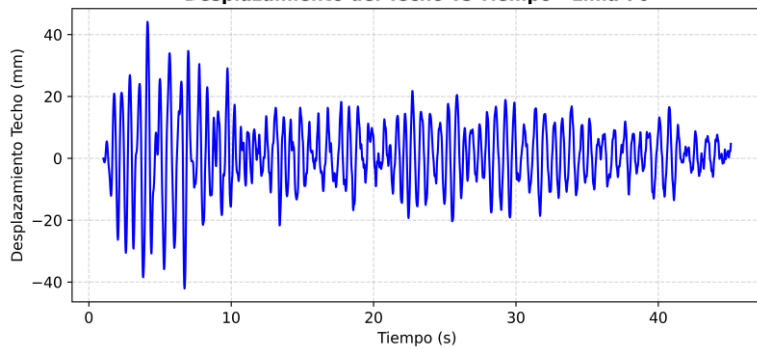
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Landers**



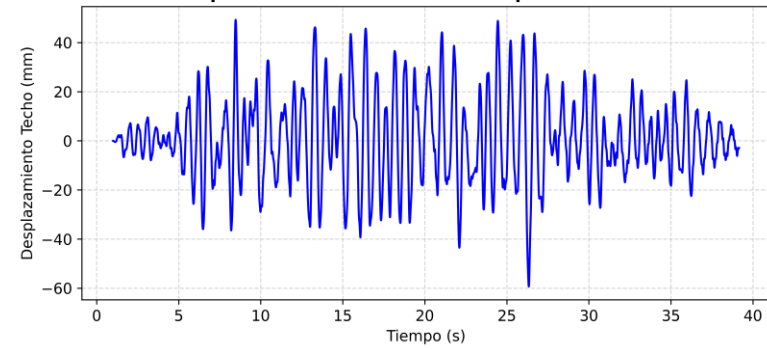
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Lima 66**



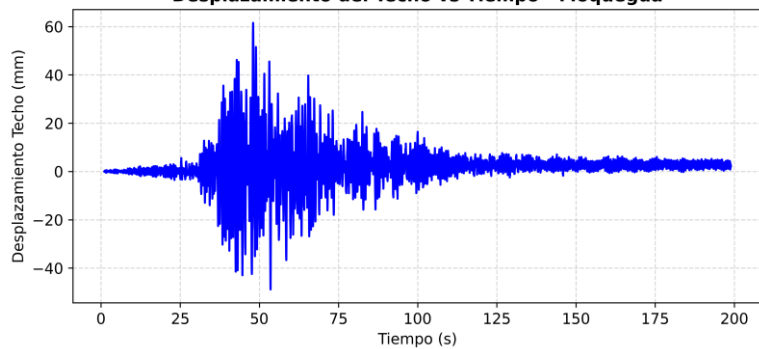
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Lima 70**



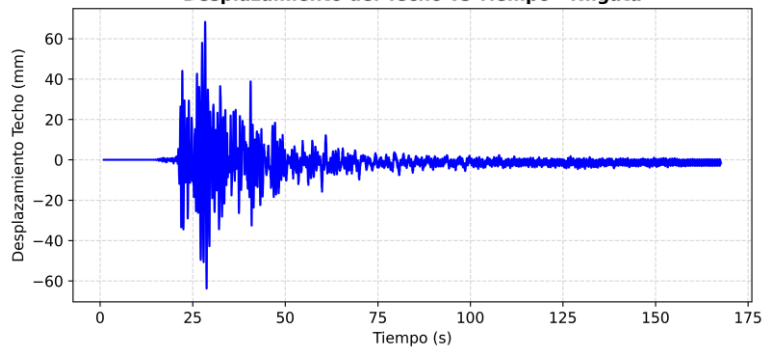
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Loma Prieta**



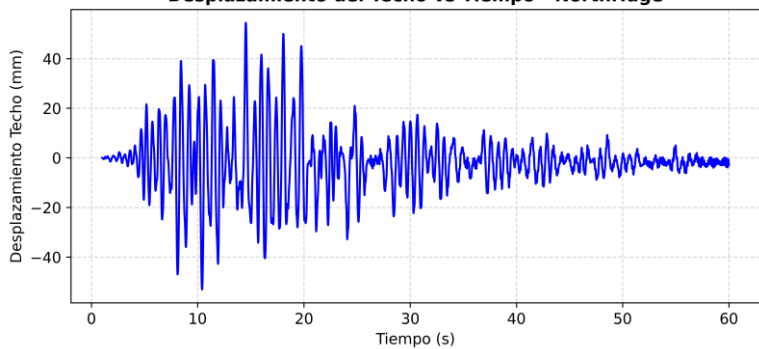
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Moquegua**



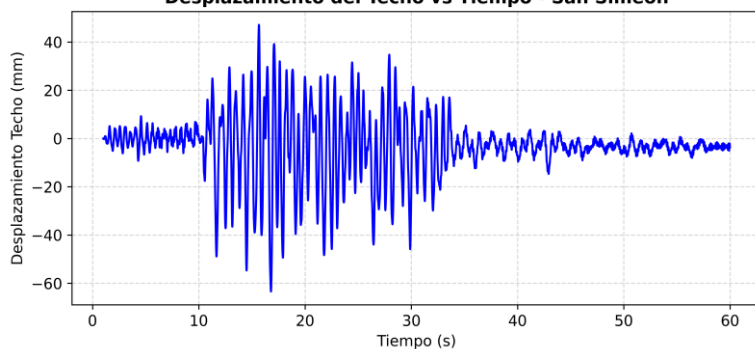
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Niigata**



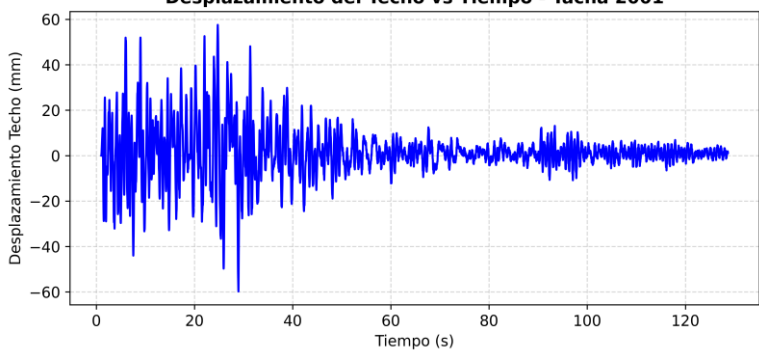
**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Northridge**



**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - San Simeon**

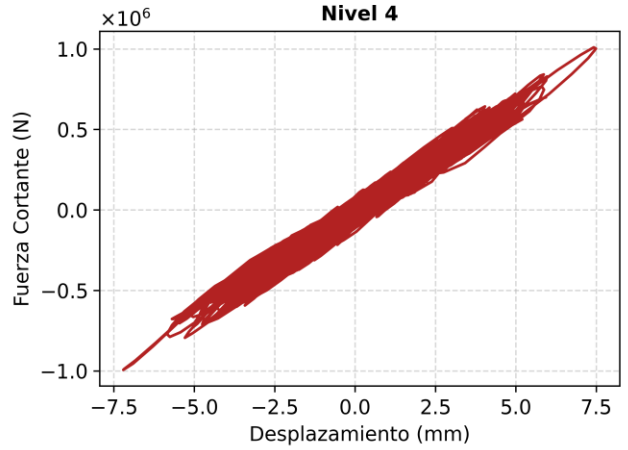
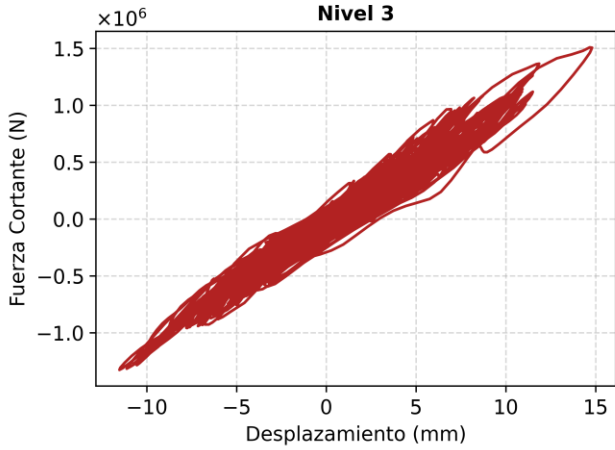
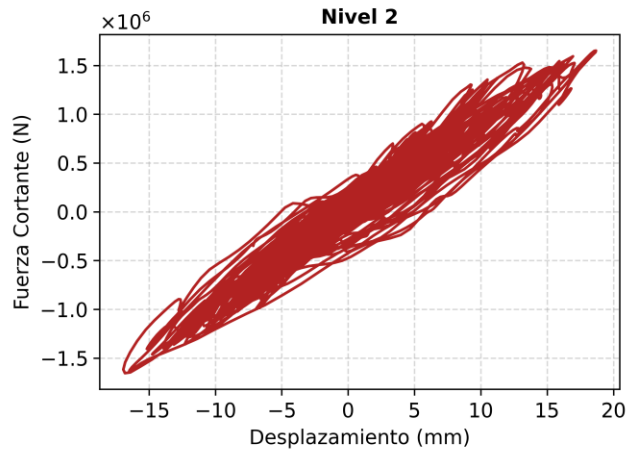
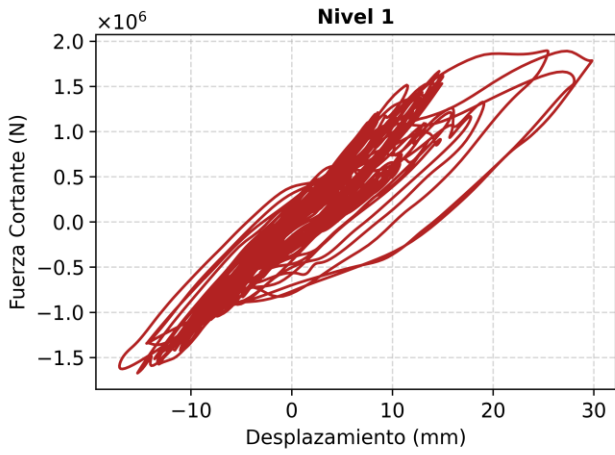


**Desplazamiento del Techo vs Tiempo - Tacna 2001**

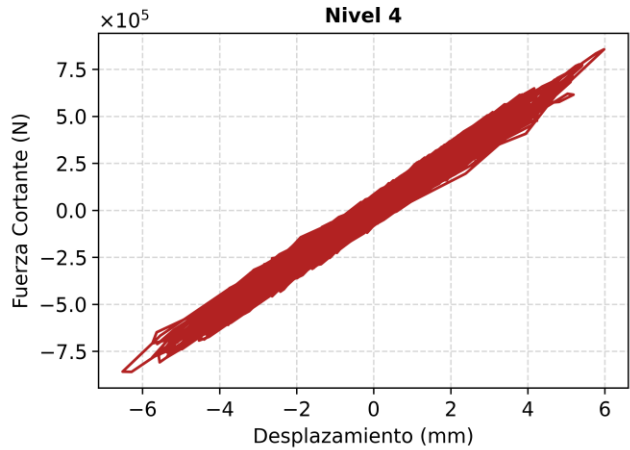
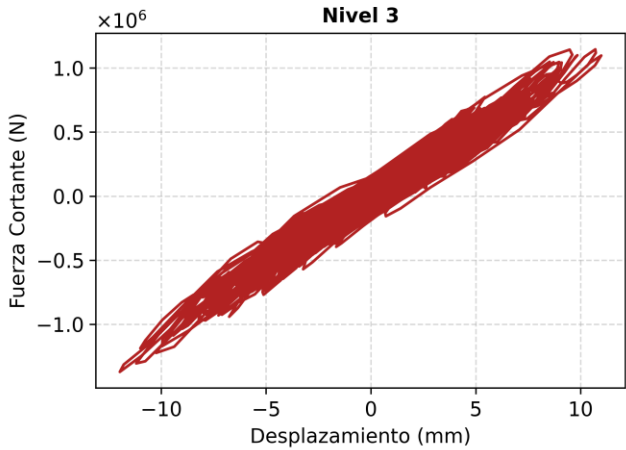
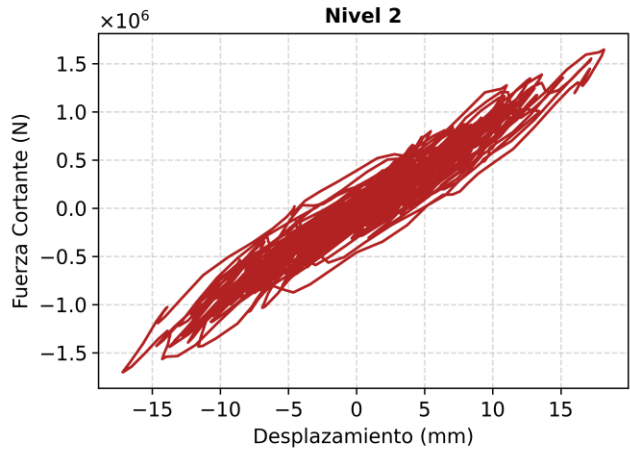
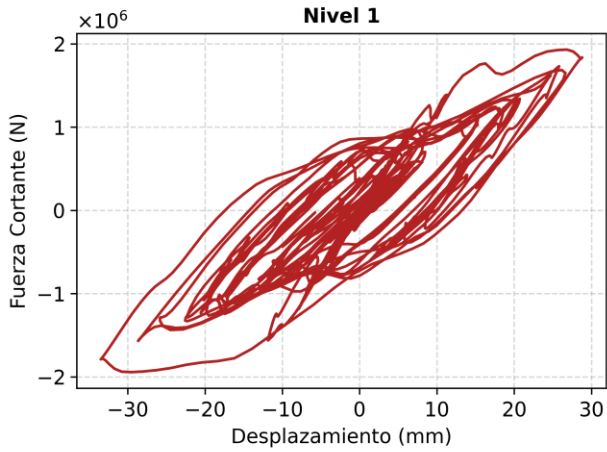


# **Anexo D: Curvas Histéreticas de la Edificación Frente a los Sismos**

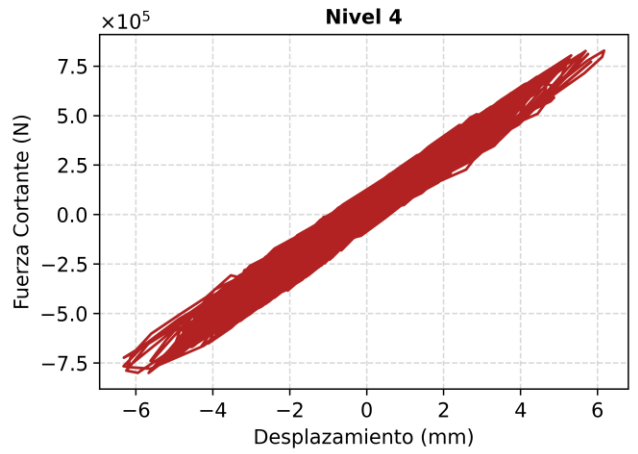
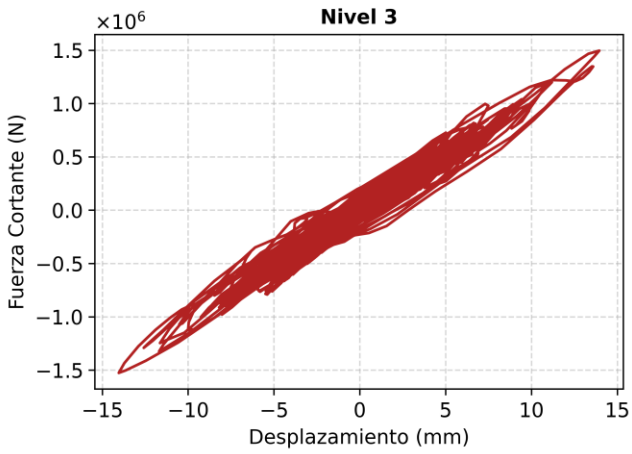
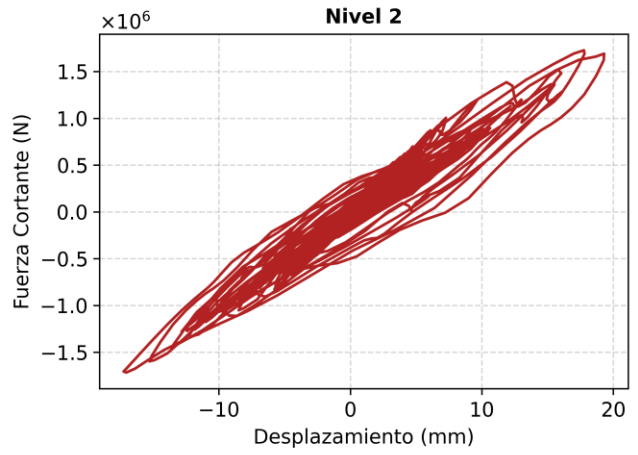
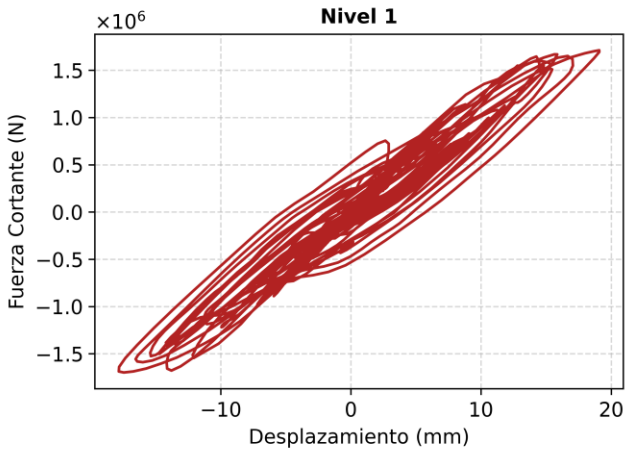
### Curvas Histeréticas - Darfield



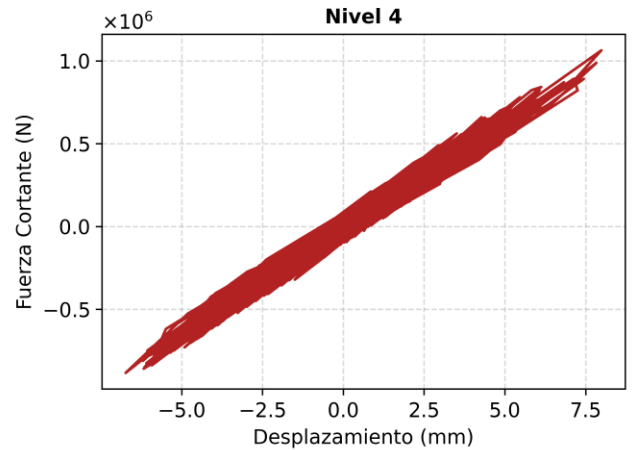
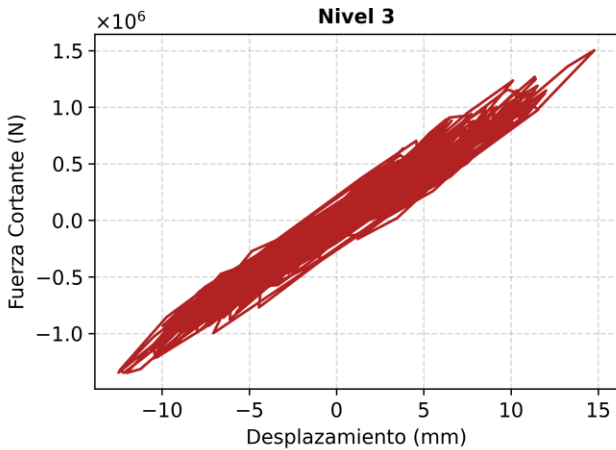
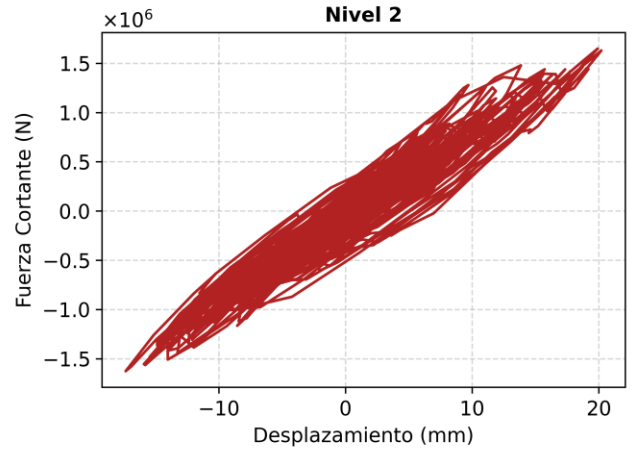
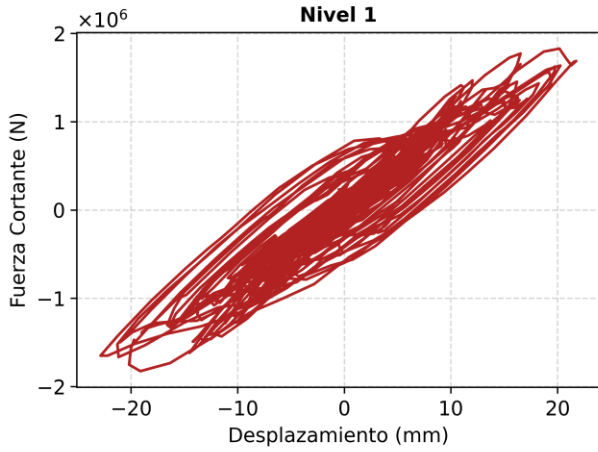
### Curvas Histeréticas - Duzce



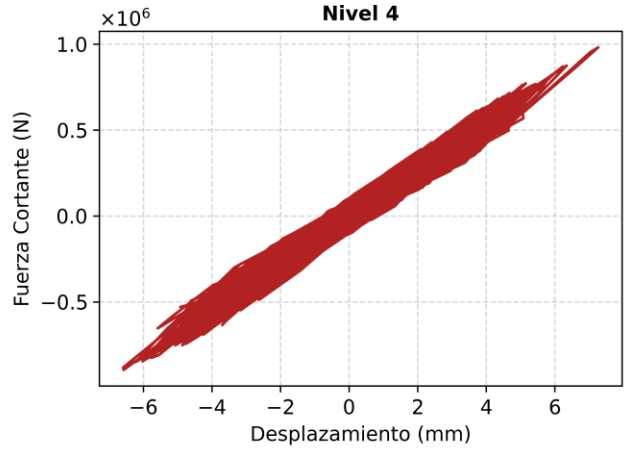
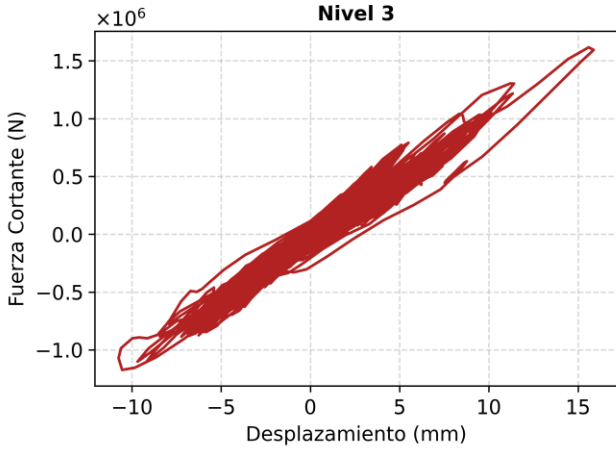
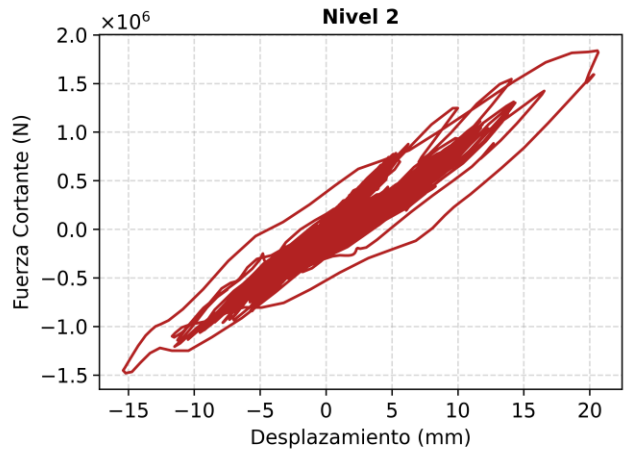
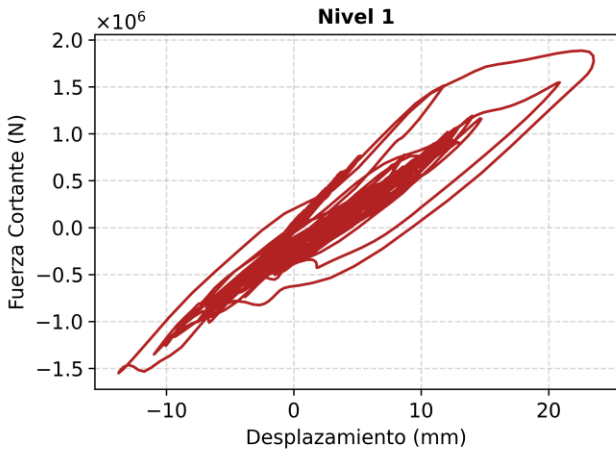
### Curvas Histeréticas - El Mayor



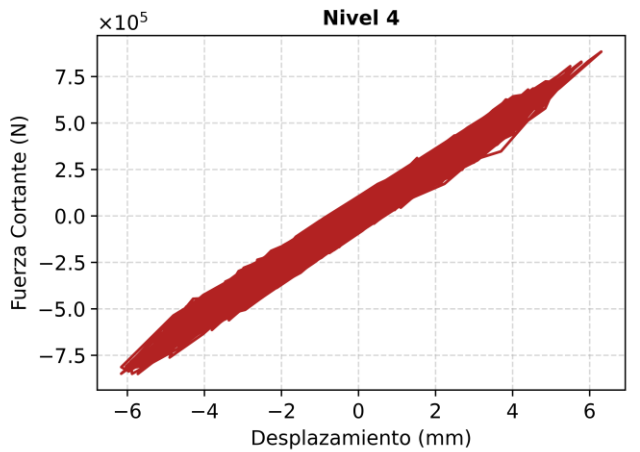
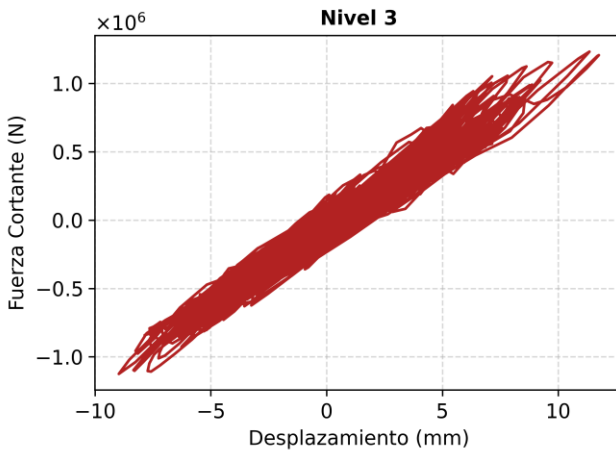
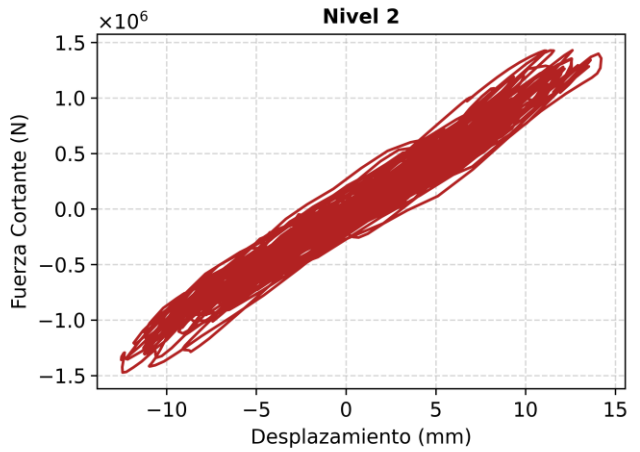
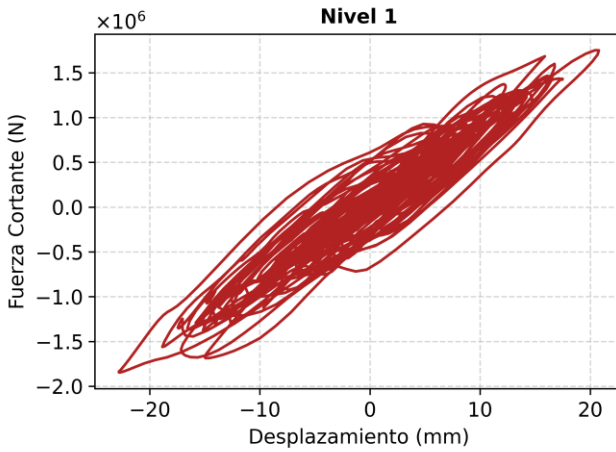
### Curvas Histeréticas - Hector Mine



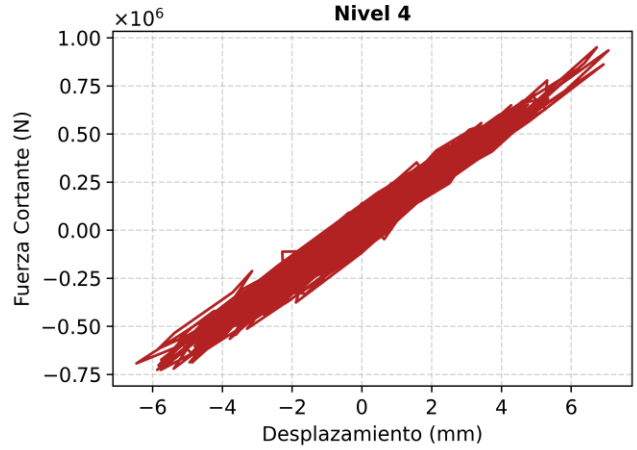
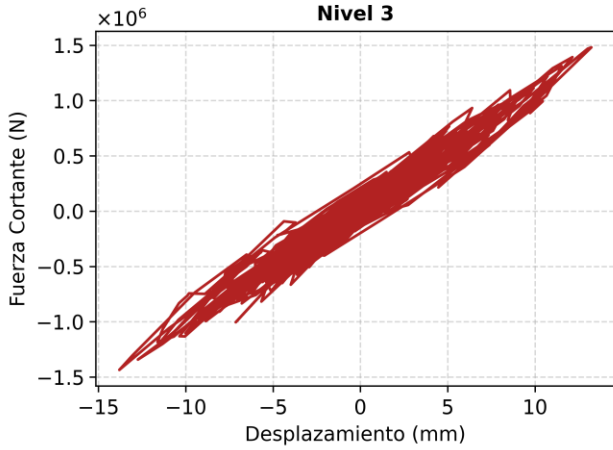
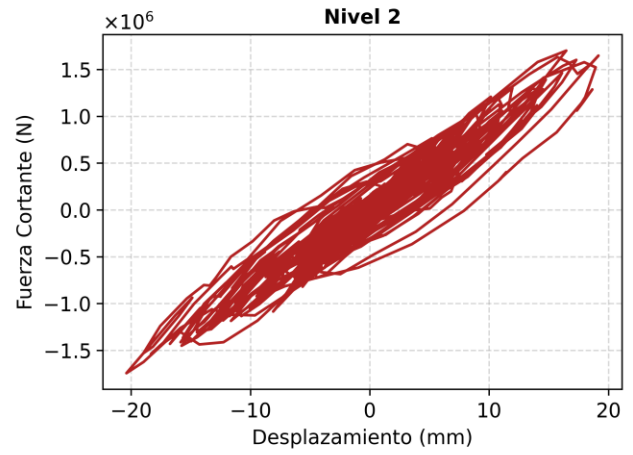
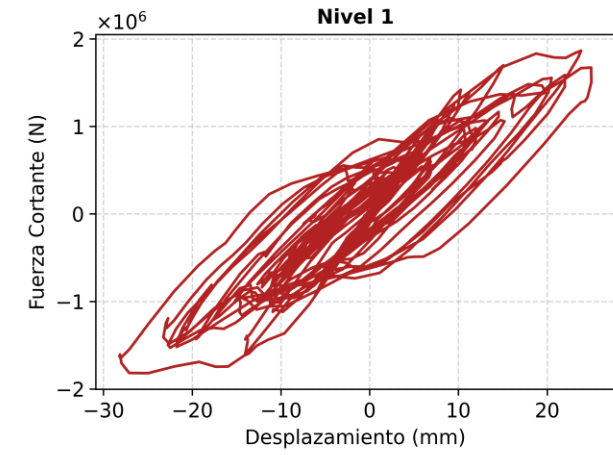
### Curvas Histeréticas - Ica 2007



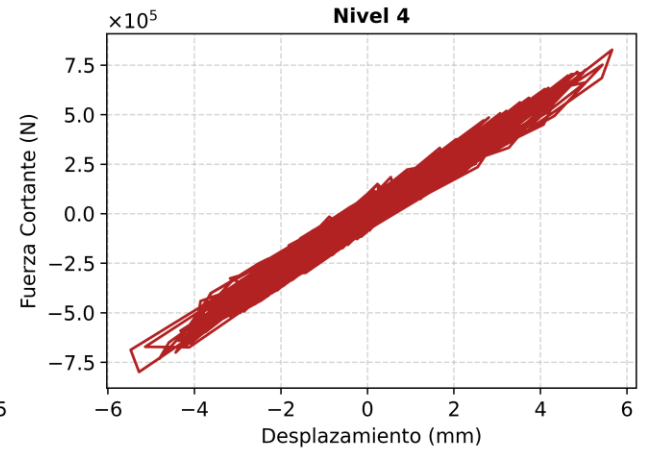
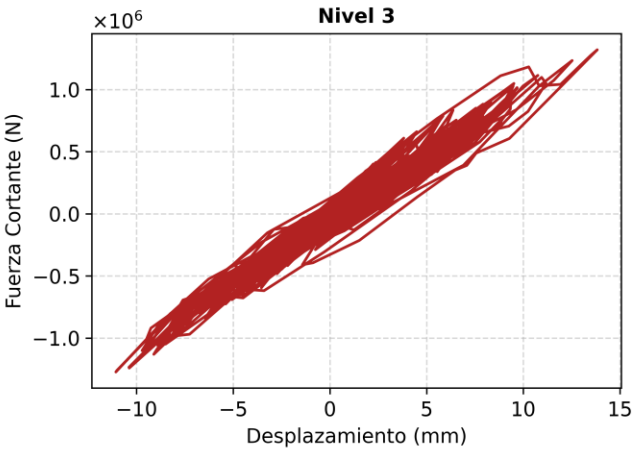
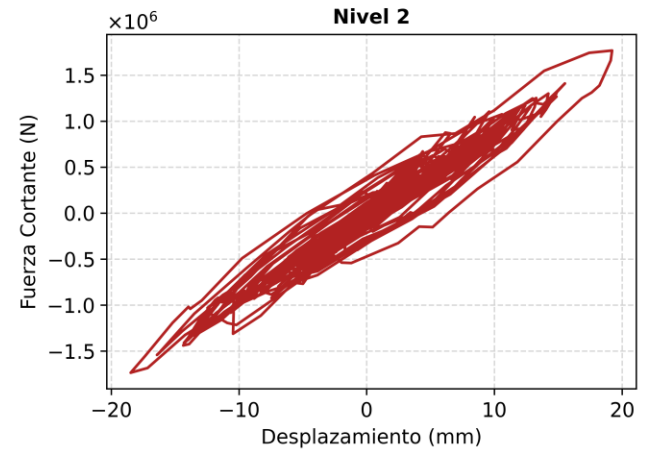
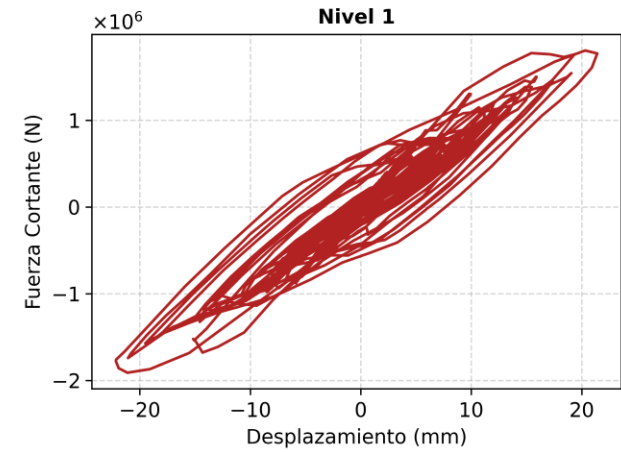
### Curvas Histeréticas - Kern County



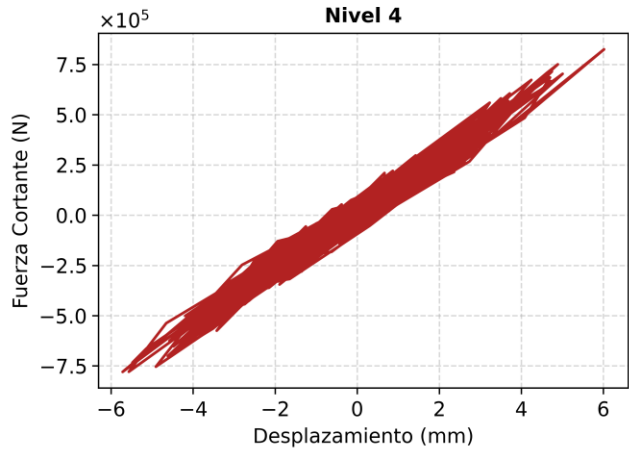
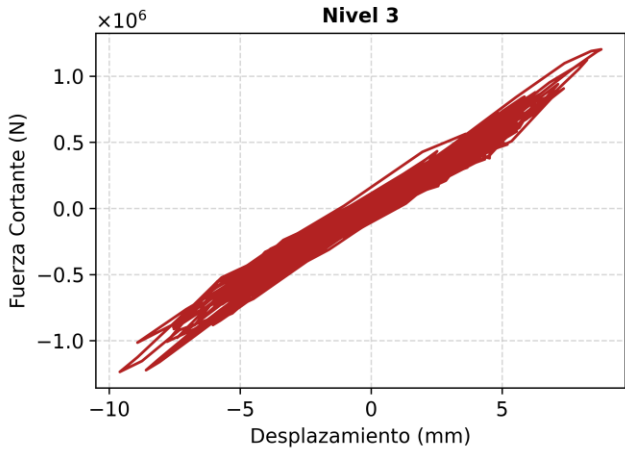
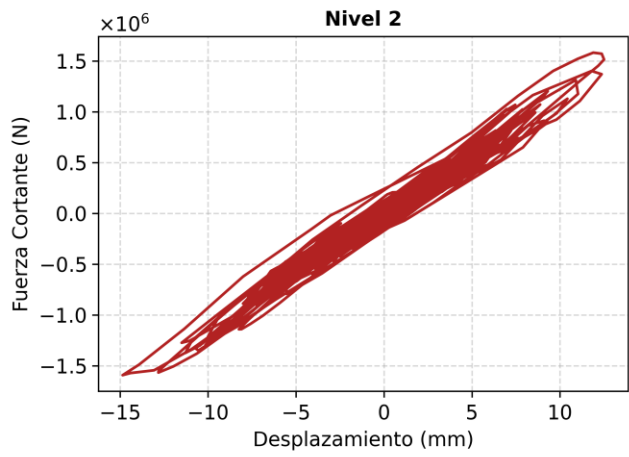
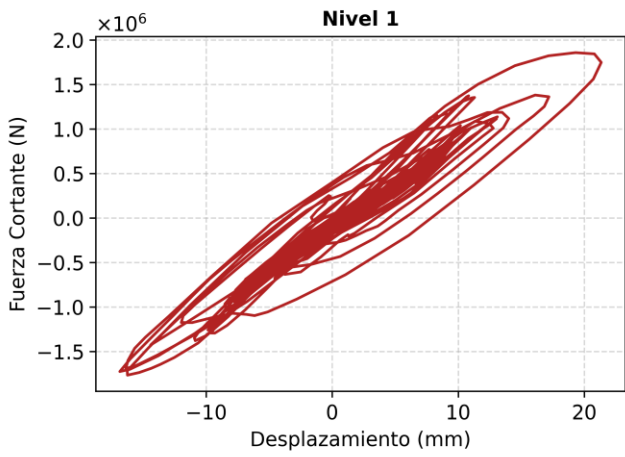
### Curvas Histeréticas - Landers



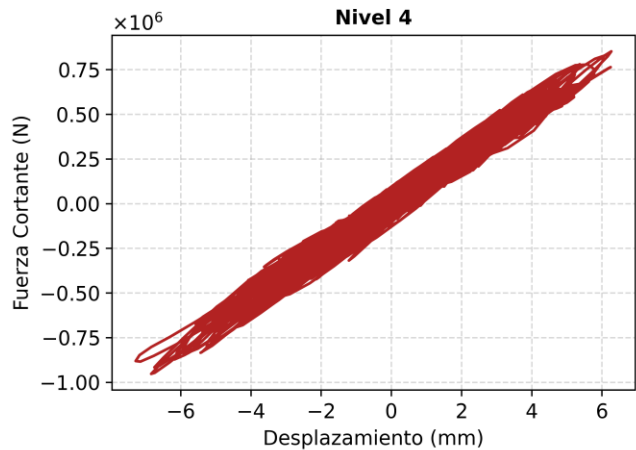
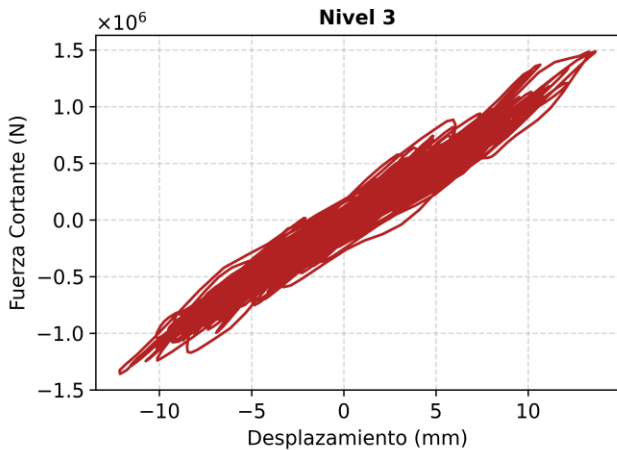
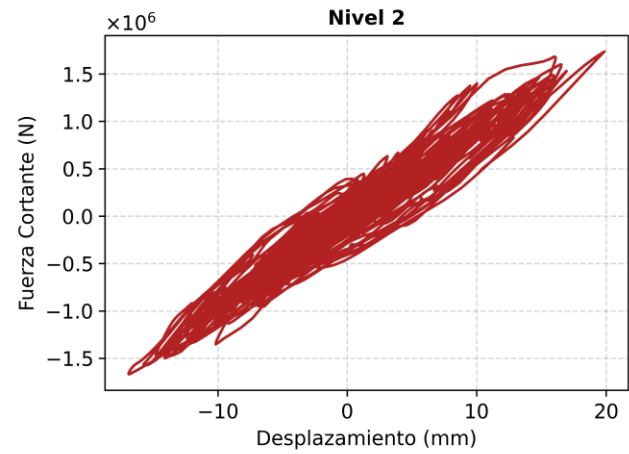
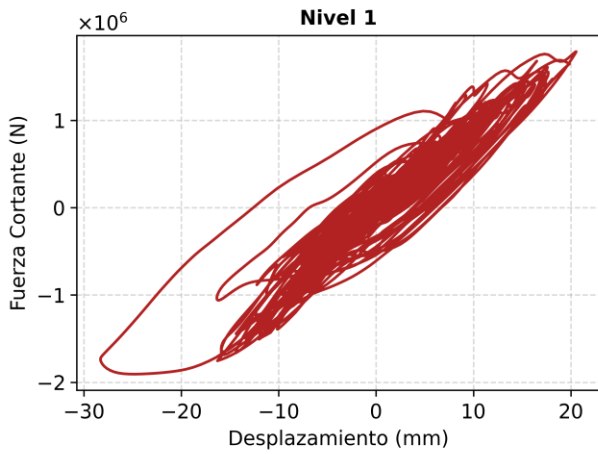
### Curvas Histeréticas - Lima 66



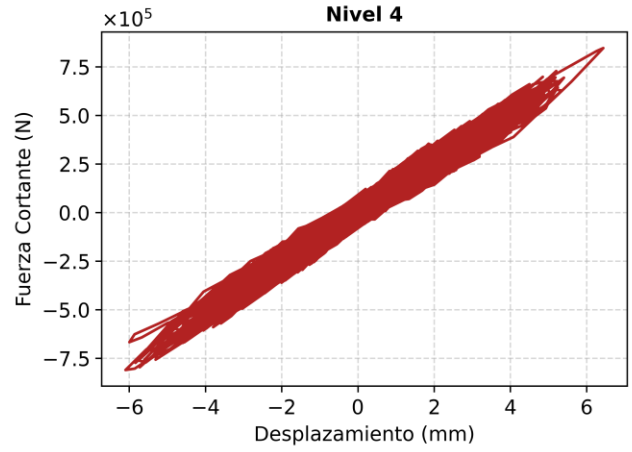
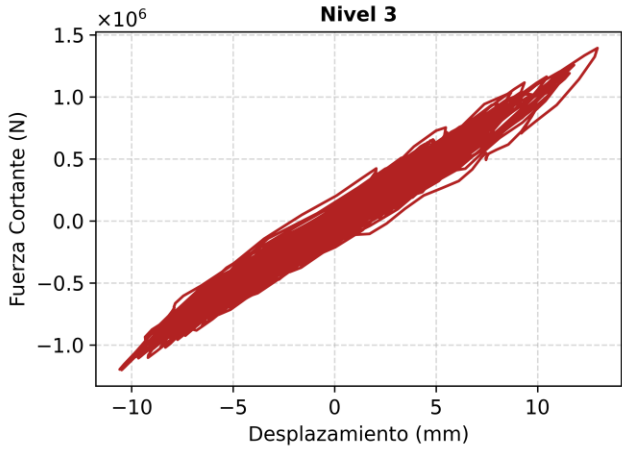
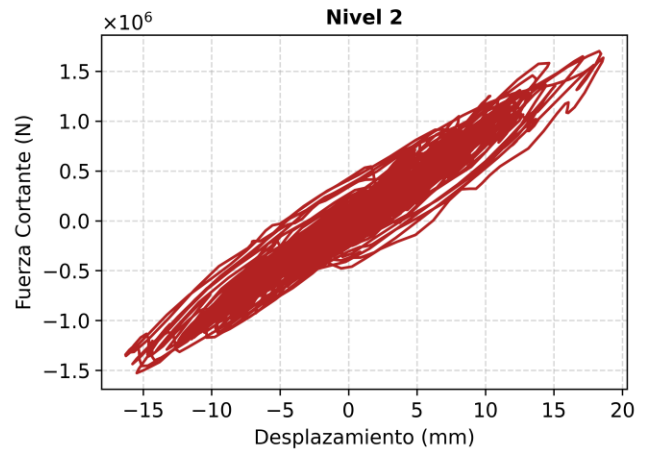
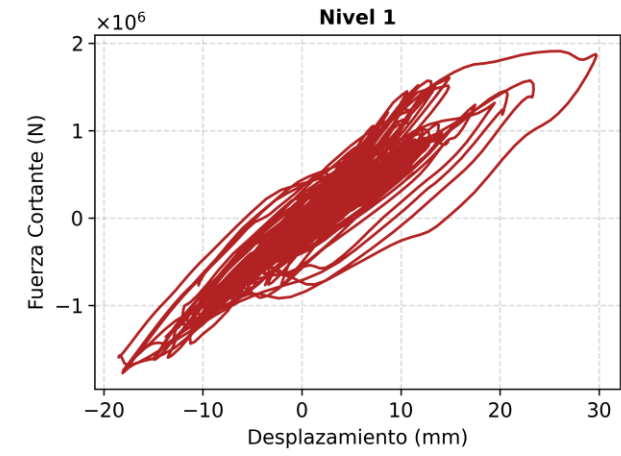
### Curvas Histeréticas - Lima 70



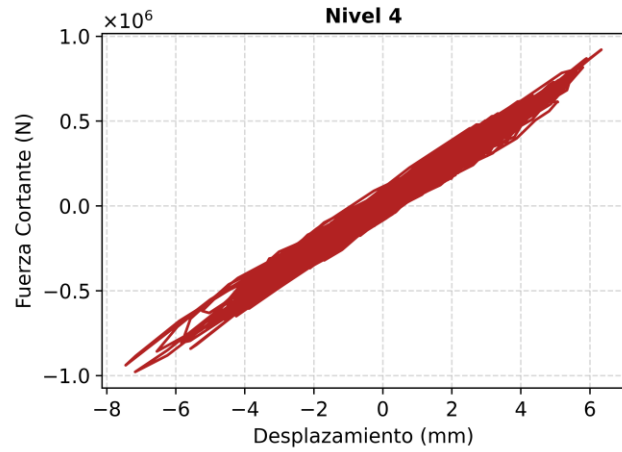
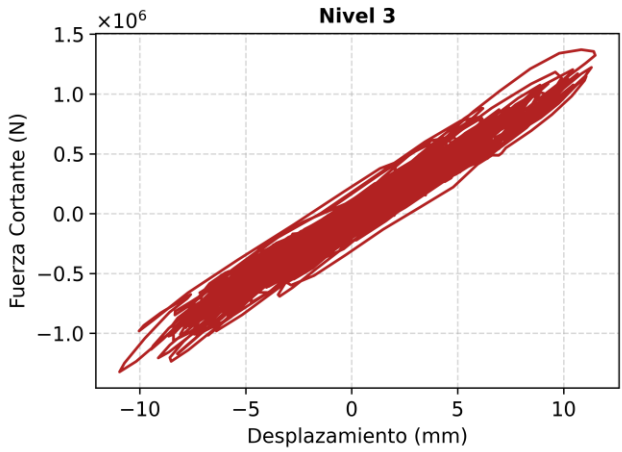
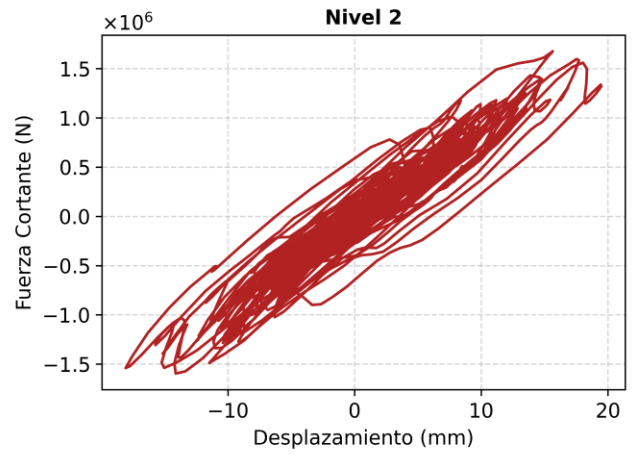
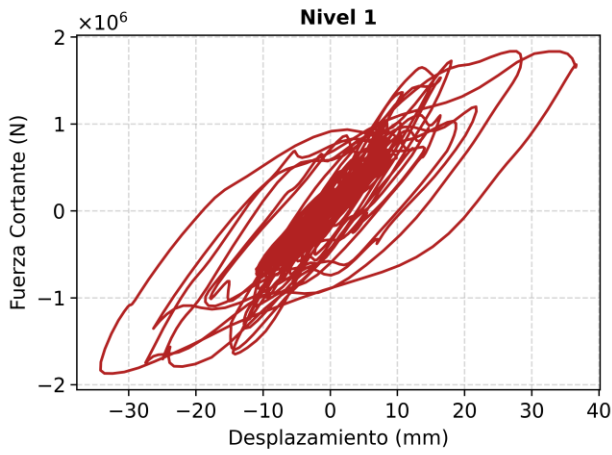
### Curvas Histeréticas - Loma Prieta



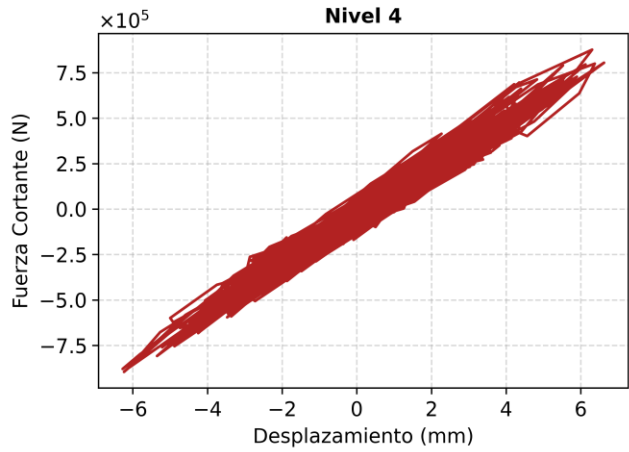
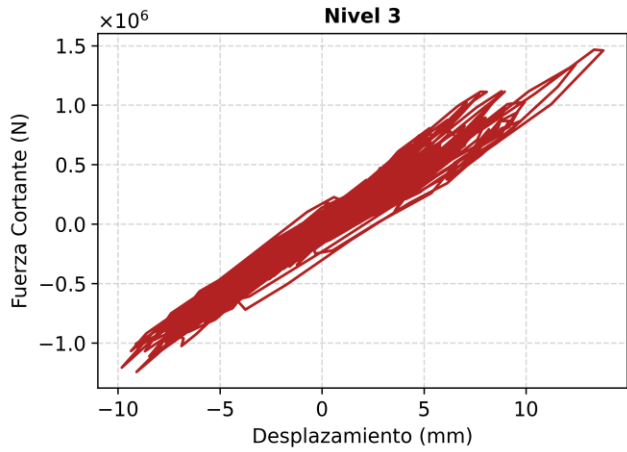
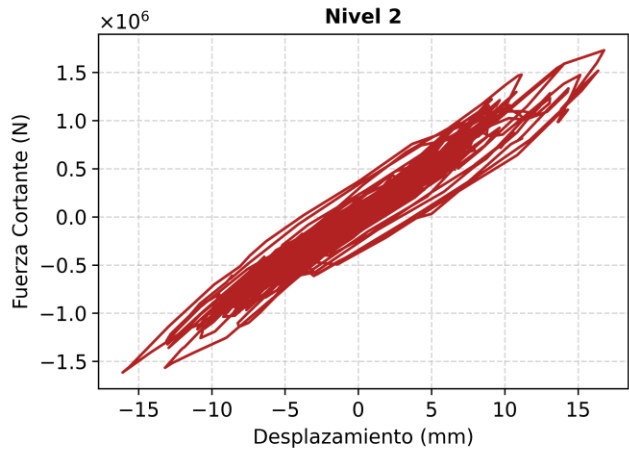
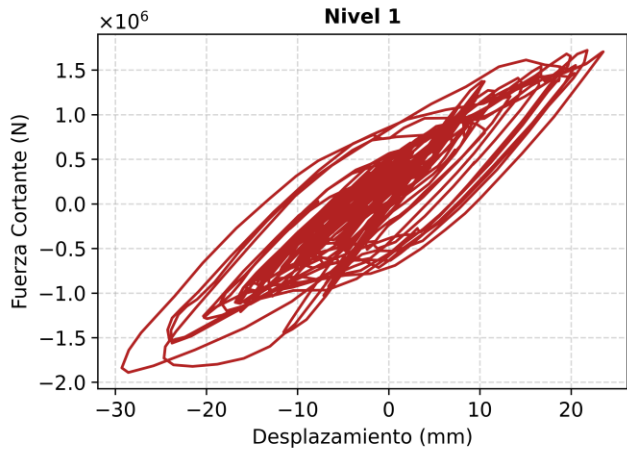
### Curvas Histeréticas - Moquegua



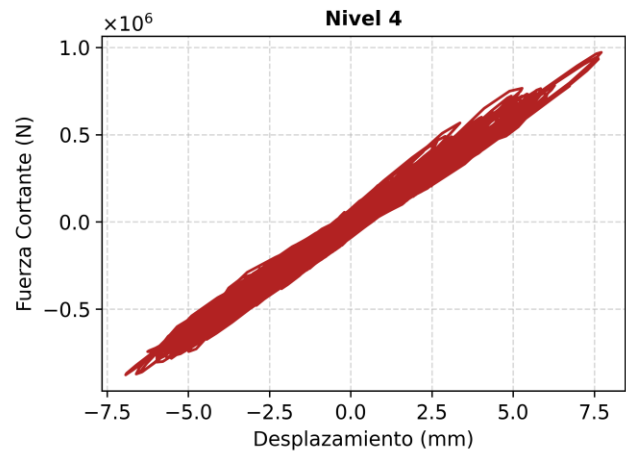
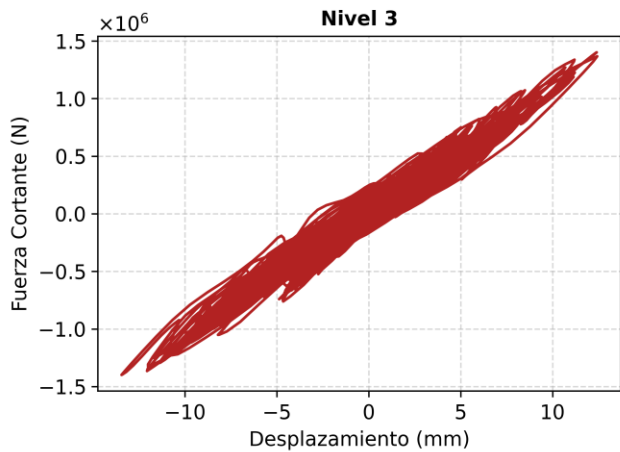
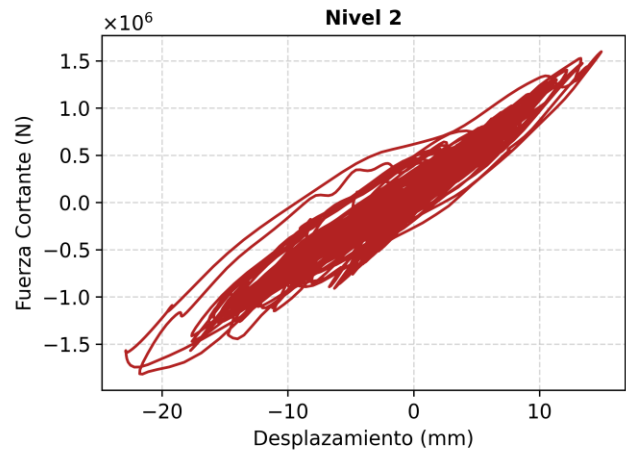
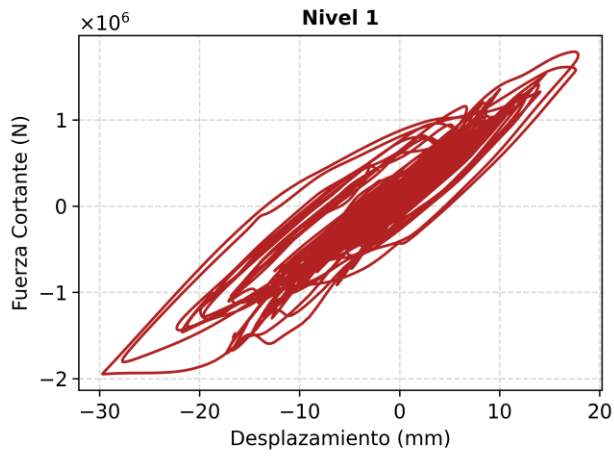
### Curvas Histeréticas - Niigata



### Curvas Histeréticas - Northridge



### Curvas Histeréticas - San Simeon



### Curvas Histeréticas - Tacna 2001

