



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES

**Análisis dinámico no lineal de configuración de
edificaciones esenciales y su comparación en
comportamiento, vulnerabilidad estructural y propuestas
de mitigación, considerando $Z = 0,25$ g**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

Autora:

DIANA XIMENA MARTÍNEZ ALVARADO

Director

JOSÉ FERNANDO VÁZQUEZ CALERO

CUENCA, ECUADOR

2018



DEDICATORIA

A Dios, por darme fuerza y fortaleza para poder cumplir una de mis metas.

A mis padres Sonia Alvarado y Juan Martínez en especial a mi mamá, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus principios, quien a lo largo de mi vida ha velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento.

A mis hermanos Christian Martínez y Juan Pablo Martinez por apoyarme en todo momento en las buenas y las malas, ser mi compañía durante todo el período de mi carrea.

A mis abuelitos Félix Alvarado y Zoila García, que son lo mejor que tengo en la vida, siempre me apoyan en todo momento. En especial a mi abuelita, aunque no estés conmigo sé que estarías orgullosa de este logro obtenido, gracias por todo tu amor incondicional.

A mi novio, por su amor, apoyo y motivación que me brinda todos los días para lograr mis metas.



AGRADECIMIENTO

A la Universidad del Azuay, por permitirme ser parte de ella y que nos abrió las puertas para poder cumplir uno de nuestros sueños.

Al Ing. José Vázquez C., M.Sc., por brindarnos el apoyo y la motivación para seguir adelante, por impartirnos todos los conocimientos necesarios para cumplir nuestra tesis. Para nosotros ha sido un honor haber realizado este trabajo bajo su dirección y estaremos siempre agradecidos por el valioso tiempo dedicada a ella.

Al Ing. Francisco Flores Solano Ph.D., por su paciencia y tiempo para recibirnos cada día y solventar nuestras dudas e impartir todos los conocimientos necesarios para cumplir los objetivos planteados. Para él, nuestro más sincero agradecimiento.

A mis compañeros de tesis Manuel Valdiviezo y Nicolás Riquetti que sin el apoyo incondicional en todos los momentos de frustración no hubiera sido posible la realización de este proyecto, por la comprensión y el trabajo mutuo para la culminación de esta tesis.

A los miembros del tribunal designado Ing. Roberto Gamón Torres Ph.D., M.Sc., e Ing. Juan Carlos Malo Donoso, por brindarnos parte de su tiempo para la revisión y corrección.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
GENERALIDADES.....	2
ANTECEDENTES.....	2
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivo específicos.....	3
METODOLOGÍA.....	3
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO.....	4
CAPÍTULO I.....	5
1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	5
CAPÍTULO II.....	6
2. MODELACIÓN 2D DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES ESTRUCTURALES.....	6
2.1 INFORMACIÓN GENERAL.....	6
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA.....	7
2.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	8
2.3.1 Concreto.....	8
2.3.2 Concreto confinado.....	9
2.3.3 Acero de refuerzo.....	9
2.4 CARGAS GRAVITACIONALES.....	10
2.4.1 Cargas vivas de uso.....	10
2.4.2 Cargas muertas y permanentes.....	10
2.5 MODELACIÓN USANDO EL SOFTWARE DE CÓDIGO LIBRE <i>OPENSEES</i>	10
2.5.1 Definición de <i>OpenSees</i>	10
2.5.2 Lenguaje de interpretación TCL.....	11



2.5.3 Definición de la geometría en <i>OpenSees</i>	11
2.5.3 Creación del modelo	11
2.6 DISEÑO DEL ESPECTRO DE DISEÑO	11
2.6.1 Bases del diseño	11
2.7 ESPECTRO DE DISEÑO	15
2.7.1 Período de Retorno 475 años	16
2.7.2 Período de Retorno 2500 años.	16
2.8 ANÁLISIS MODAL	17
2.10 Análisis dinámico no lineal (<i>Pushover</i>).....	22
2.11 Efectos P-delta	22
2.12 Cortante basal de diseño.....	24
2.13 Análisis <i>Pushover</i> cíclico.....	27
2.14 Análisis de vibración libre	29
2.15. Análisis Dinámico Lineal.....	31
2.15.1. Script de <i>ModelGeometry</i>	31
2.15.2. Script de <i>SectionAndMaterial</i>	31
2.16 Comparación entre <i>OpenSees</i> vs Otro <i>Software</i>	35
2.17. Desplazamientos y Derivas	35
2.18. Análisis Dinámico No Lineal	37
2.18.1 Script de <i>ModelGeometry</i>	37
2.18.2 Script de <i>SectionAndMaterial</i>	37
2.18.3 Script de <i>GravityLoad</i>	37
CAPÍTULO III.....	45
3. MEDIDAS DE MITIGACIÓN	45
3.1 Fundamento del aislamiento sísmico.....	45
3.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)	46
3.3 Diseño de los aisladores para los diferentes pórticos	46
3.4 Análisis dinámico no lineal con aislación sísmica	50
3.5 Curvas histerética general de los aisladores.....	50
3.6 Cálculo de derivas considerado aislamiento sísmico.....	52
Tabla 3.7: Desplazamientos y Derivas –período de retorno 2500 años en <i>OpenSees</i> ...	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Geometría pórtico 1, vista en planta y elevación	6
Figura 2.2: Geometría pórtico 2, vista en planta y elevación	6
Figura 2.3: Geometría pórtico 3, visto en planta y elevación	7
Figura 2.4: Geometría pórtico cuatro, vista en planta y elevación	7
Figura 2.5: Curvas de peligro sísmico, CUENCA.....	12
Figura 2.6: Curvas de peligro sísmico, determinación valores de aceleración 2500 años. ..	12
Figura 2.7: Espectro de diseño para 475 años	16
Figura 2.8: Espectro de diseño para 475 años	17
Figura 2.9: Sismos seleccionados para el análisis dinámico lineal y no lineal.....	19
Figura 2.10: Escalamiento de sismos seleccionados para el análisis dinámico lineal y no lineal.....	18
Figura 2.11: Sismos escaldos para análisis dinámico lineal y no lineal.....	19
Figura 2.12: análisis Pushover- desplazamiento máximo	22
Figura 2.13: Vibración Libre – pórtico 1	29
Figura 2.14: Vibración Libre – pórtico 2	30
Figura 2.15: Vibración Libre – pórtico 3	30
Figura 2.16: Vibración Libre – pórtico 4	31
Figura 3.1: Comportamiento sísmico de una estructura aislada y convencional	45
Figura 3.2: Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRM)	46
Figura 3.3: Aislamiento sísmico para edificaciones y puentes/ catalogo.....	49



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Modelos de las diferentes configuraciones estructurales	5
Tabla 2.1: Secciones de columnas y vigas	8
Tabla 2.2: Características de los materiales de columnas y vigas.....	9
Tabla 2.3: Masas Aplicadas.....	10
Tabla 2.4: Período de retorno y valore factor Z.....	13
Tabla 2.5: Valor factor Z en función de la zona sísmica adoptada.	11
Tabla 2.6: Clasificación del perfil de suelo	13
Tabla 2.7: Factor de importancia	13
Tabla 2.8: Niveles de amenaza sísmica.....	14
Tabla 2.9: Síntesis de la filosofía de diseño.....	14
Tabla 2.10: Tipo de factores de sitio	15
Tabla 2.11: Factores n, r, R	15
Tabla 2.12: Período de Retorno 475	16
Tabla 2.13: Período de Retorno 2500 años.....	16
Tabla 2.14: Período de vibración de los diferentes pórticos analizados.	17
Tabla 2.15: Factores FCS – Pórtico 1	20
Tabla 2.16: Factores FCS – Pórtico 2	20
Tabla 2.17: Factores FCS – Pórtico 3	21
Tabla 2.18: Factores FCS – Pórtico 4	21
Tabla 2.19: Curva de capacidad considerando efectos P-Delta y lineal –Pórtico 1-2-3-4 ..	23
Tabla 2.20: Parámetro para calcular el cortante basal 475 años	24
Tabla 2.21: parámetro para calcular el cortante basal 2500 años.....	25
Tabla 2.22: Curva de capacidad para un período de retorno de 475 y 2500 años.....	26
Tabla 2.23: porcentajes de sobre resistencia de las diferentes estructuras para soportar el cortante basal V -475 años	27
Tabla 2.24: porcentajes de sobre resistencia de las diferentes estructuras para soportar el cortante basal V -2500 años.....	27
Tabla 2.25: Curvas Histerética de las diferentes configuraciones estructurales.	28
Tabla 2.26: Periodo fundamental.....	31
Tabla 2.27: Derivas Máximas.....	33
Tabla 2.28: Comparación entre OpenSees y Otros software / Periodo fundamental	35
Tabla 2.29: Comparación entre OpenSees y Otros software	36
Tabla 2.30: Comparación entre OpenSees y Otros software	38
Tabla 2.31: Desplazamientos y Derivas –período de retorno 475 años en OpenSees.....	39
Tabla 2.32: Desplazamiento y derivas para un período de retorno de 475 años.....	40
Tabla 2.33: Desplazamiento y derivas para un período de retorno de 2500 años	42
Tabla 2.34: Desplazamiento y derivas para un período de retorno de 2500 años.....	43
Tabla 3.1: Datos para el diseño del aislador	47
Tabla 3.2: Dimensionamiento del sistema de aislación.....	47
Tabla 3.3: Dimensionamiento aislador por unidad	48
Tabla 3.4: Aisladores seleccionas para las diferentes estructuras.....	50
Tabla 3.5: Aisladores seleccionas para las diferentes estructuras.....	50
Tabla 3.6: Curvas Histerética con y sin aisladores	51
Tabla 3.7: Desplazamientos y Derivas –período de retorno 2500 años en OpenSees.....	52
Tabla 3.8: Desplazamientos y Derivas –período de retorno 2500 años con aislador en OpenSees	53



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Definiciones.

Anexo 2: Creación del modelo.

**ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE CONFIGURACIÓN DE EDIFICACIONES
ESENCIALES Y SU COMPARACIÓN EN COMPORTAMIENTO,
VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL Y PROPUESTAS DE MITIGACIÓN,
CONSIDERANDO $Z = 0,25 g$**

RESUMEN

La presente investigación se basa en analizar el comportamiento y la vulnerabilidad estructural, obtenida de la investigación de diferentes modelos estructurales, realizados por los ingenieros Erick Cabrera y Mateo Torres. La evaluación se basó en cuatro análisis: modal, tiempo-historia, vibración libre y análisis estático no lineal. Se procede a realizar el análisis con el software de código abierto *OpenSees*, tanto en el rango lineal como no lineal, permitiendo comparar con los resultados y requerimientos establecidos en la NEC. Finalmente se planteó una medida de mitigación aplicando aisladores elastoméricos que ayudan a disminuir la vulnerabilidad estructural, y controlar daños posibles de la misma.

Palabras clave: modal, tiempo-historia, Pushover, aislamiento basal, *OpenSees*.

Ing. José Fernando Vázquez Calero
Director del trabajo de Titulación

Ing. José Fernando Vázquez Calero
Director de la Escuela

Diana Ximena Martínez Alvarado

Autor

**NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF THE CONFIGURATION OF
ESSENTIAL BUILDINGS AND THEIR COMPARISON IN BEHAVIOR,
STRUCTURAL VULNERABILITY AND MITIGATION PROPOSALS
CONSIDERING $Z = 0,25 g$**

ABSTRACT

The present investigation was based on the analysis of behavior and structural vulnerability obtained from the research of different structural models carried out by engineers Erick Cabrera and Mateo Torres. The evaluation was based on four types of analysis: modal, time-history, free vibration and nonlinear static analysis. The analysis were carried out with OpenSees open source software in both the linear and non-linear range. This allowed to compare the results and requirements established in the NEC. Finally, a mitigation measure was proposed applying elastomeric insulators to reduce structural vulnerability and control possible damages.

Keywords: modal, time-history, Pushover, basal isolation, OpenSees.



Ing. José Fernando Vázquez Calero

Thesis Director



Ing. José Fernando Vázquez Calero

Faculty Director



Diana Ximena Martínez Alvarado

Author



Translated by

Ing. Paul Arpi



Martínez Alvarado Diana Ximena

Trabajo de Titulación

Ing. José Fernando Vázquez M.Sc.

Mayo, 2018

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE CONFIGURACIÓN DE EDIFICACIONES ESENCIALES Y SU COMPARACIÓN EN COMPORTAMIENTO, VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL Y PROPUESTAS DE MITIGACIÓN, CONSIDERANDO $Z = 0,25 g$

INTRODUCCIÓN

Debido a que el Ecuador es un país de alto peligro sísmico, ya que se encuentra en una región sísmicamente activa, en los últimos 470 años, se han registrado varios sismos que han devastado ciudades enteras (Andrade & Robalino, 2017).

La idea es enfocarse en un diseño sismorresistente para que las estructuras esenciales se mantengan en su máxima capacidad de funcionamiento después de un terremoto, buscado controlar daños en elementos estructurales como no estructurales y así evitar el colapso para proteger la vida de las personas en terremotos severos (Zayas, 2017).

El Ing. Víctor Zayas, Ph.D. nos indica que es necesario tener en cuenta ciertos criterios muy importantes para el diseño sismorresistente; las estructuras se deben diseñar especialmente elásticas utilizando un $R=1$ para el sismo base de diseño. Las derivas se limitarán a 0.3% o 0.4% de la altura de los pisos. La aceleración media espectral de piso se limita a 0.4g o 0.6g, siendo así que las estructuras que cumplan con estos criterios mantendrán su capacidad de funcionalidad continua después de un terremoto, limitando los daños causados por los movimientos sísmicos a menos del 2% del costo de reemplazo, con una confiabilidad del 90% durante 50 años para evitar cualquier daño significativo a los componentes estructurales y arquitectónicos.

Por lo anteriormente expuesto se justifica la necesidad de continuar con el análisis de las diferentes configuraciones estructurales y poder ver su comportamiento en el rango no lineal ante los efectos que ponen en riesgo su estabilidad y funcionamiento. Para realizar estas evaluaciones es necesario tomar en cuenta un período de retorno de 50 años y un sismo con un nivel de excedencia de 2500 años.



GENERALIDADES

ANTECEDENTES

El Ecuador es un país que se encuentra en permanente amenaza sísmica, ya que está ubicado en el denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico” donde se libera el 85% de la energía sísmica que libera el planeta en forma de terremotos, principalmente debido a que está directamente asociado al fenómeno de subducción de la placa tectónica de Nazca dentro de la placa tectónica Sudamericana (Moya Yépez, 2001). A este hecho se añade un complejo sistema de fallo local superficial que produce sismos importantes en todo el territorio ecuatoriano.

Uno de los acontecimientos más relevantes fue el sismo de 7.8 grados en la escala de Richter con epicentro entre las parroquias de Pedernales y Cojimés del cantón Pedernales, en la provincia de Manabí, que dejó aproximadamente alrededor de 671 personas fallecidas y un estimado de USD 3.344 millones para reconstruir las zonas afectadas (IG EPN, 2016).

Los edificios llamados esenciales y/o peligrosos (NEC -Peligro sísmico, 2014), según la norma, no pueden dejar de prestar sus servicios ante cualquier circunstancia que se presente, entre ellos tenemos los hospitales y centros de salud. En promedio, un hospital que no funciona en la Región puede dejar hasta 200.000 personas sin atención sanitaria. (OPS; OMS, 2010)

Profundizando con la línea de investigación científica de Hospitales Seguros Frente a Desastres, se analizará diferentes configuraciones estructurales de edificaciones esenciales para así obtener su nivel de vulnerabilidad y susceptibilidad, el comportamiento de la estructura y el nivel de daño posible ante sismos esperados, para diseñar una medida de mitigación en caso de presentar amenazas identificadas.

Las medidas de rehabilitación no tendrán como consecuencia una reducción en el nivel del servicio del edificio; se selecciona a partir de una combinación de niveles de rendimiento de componentes estructurales y no estructurales (FEMA 356, 2000).

Cabe recalcar que la ingeniería sísmica tiene como prioridad fundamental proyectar y diseñar estructuras resilientes ante grandes eventos sísmicos, ya que el análisis elástico lineal no aporta la suficiente información para poder determinar el comportamiento de las estructuras, a este análisis se le complementará con un análisis dinámico no lineal



para poder conocer el desempeño sísmico de las diferentes tipologías constructivas sometidas a grandes fuerzas laterales, basados en eventos sísmicos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar el análisis dinámico no lineal de los modelos de edificaciones esenciales de diferente configuración estructural previamente establecidos, para determinar medidas pertinentes de mitigación, que procuren el trabajo en funcionalidad continua.

Objetivo específicos

- Evaluar el comportamiento estructural disponible dentro del rango lineal de las diferentes configuraciones estructurales para edificaciones esenciales.
- Realizar el análisis dinámico no lineal de las diferentes edificaciones esenciales usando el software OpenSees.
- Analizar y proponer medidas de mitigación para las edificaciones esenciales por configuración (FEMA 356, 2000) (ACI 440.2R-08, 2008) (ACI 318, 2011).

METODOLOGÍA

Para comenzar la investigación se recolectará y clasificará la información de las diferentes configuraciones estructurales analizadas en el rango elástico lineal del trabajo de investigación realizado por los ingenieros Cabrera Erick y Torres Mateo, con la finalidad de contar con los datos necesarios para realizar el análisis dinámico no lineal de las diferentes configuraciones estructurales.

Se realizará el modelo matemático idealizado con la ayuda del software de código abierto *OpenSees*. No obstante, se deberá ingresar las cargas de acuerdo a la normativa vigente (NEC-Peligro Sísmico, 2014); y así poder determinar su comportamiento antes amenazas recurrentes.

Se diseñarán medidas de mitigación para disminuir la vulnerabilidad estructural de las diferentes configuraciones estructurales a analizar, basadas en las normativas; *Federal Emergency Management Agency; Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA 356), *American Concrete Institute- Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening*



Concrete Structures (ACI 440. 2R-08) y American Concrete Institute –Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 18).

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

El territorio ecuatoriano se encuentra dentro de un particular movimiento tectónico, un sector del territorio forma parte de la microplaca denominada “bloque andino”, esta placa sudamericana se encuentra en interacción entre las placas de Nazca, Cocos y Caribe. Por otra parte, la región sur del Ecuador, se encuentra en interacción entre la placa sudamericana y la placa Nazca. Las cuales están regidas por dos tipos de fuentes sísmicas: subducción (interplaca e intraplaca), y de tipo corticales (superficiales) (Martínez & Reinoso , 2016).

En teoría, los países deberían asegurar que cada edificación e institución de relevancia sea resistente a los desastres y que sea posible reorientar todos los recursos necesarios para obtener resultados notorios en diferentes aspectos en la gestión de reducción de riesgos.

Dada la relevancia de los hospitales para la recuperación de una comunidad afectada por un sismo, puede decirse que en su planificación debe considerarse múltiples aspectos que abarcan desde la ubicación, mantenimiento adecuado, hasta la instalación de equipos y elementos no estructurales diversos, pasando por los requisitos de resistencia estructural (Organización Panamericana de la Sallud , 2000).

Por otro lado, el riesgo que se considera como el producto de la amenaza por la vulnerabilidad, da cuenta que para el austro ecuatoriano las amenazas de tipo: sísmicas, hidrometereológicas, geotécnicas y sociales son las principales que se tomaron en cuenta al momento de la calificación de las instituciones de salud investigadas.

Para edificaciones esenciales y/o peligrosas según (NEC, 2014), es necesario realizar un análisis del sistema de miembros estructurales y no estructurales de manera más exigente, a nivel del rango inelástico, y así confirma el (ACI 318, 2011).

DEFINICIONES

Remitirse al anexo 1

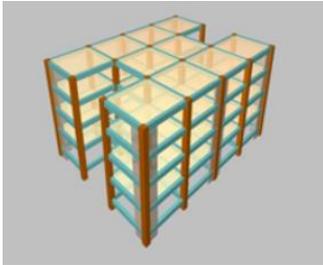
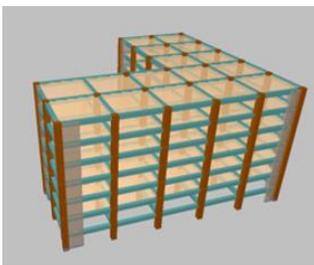
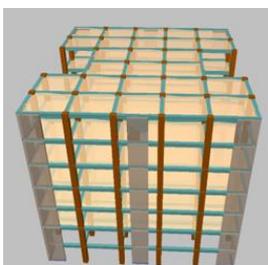
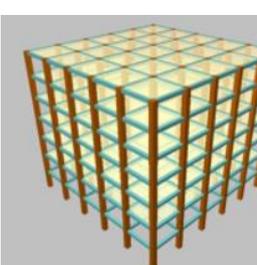
CAPÍTULO I

1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En el siguiente capítulo se procede a recolectar la información de las diferentes estructuras y su comparación en comportamiento y vulnerabilidad estructural, obtenida en la investigación realizada por los ingenieros Cabrera Erick y Torres Mateo; la misma que evidenció que existen estructuras que tienen mejor y peor comportamiento ante las siguientes consideraciones: aceleración de diseño, cortante basal, cuantía de obra, derivas y período de diseño.

Se clasifica la información de las diferentes configuraciones estructurales analizadas dentro del rango elástico lineal, de las cuales se tomarán cuatro modelos que tendrán variación tanto en regularidad en planta y elevación.

Tabla 1.1: Modelos de las diferentes configuraciones estructurales

Portico1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
			

Fuente: (Cabrera & Torres, 2016)

CAPÍTULO II

2. MODELACIÓN 2D DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES ESTRUCTURALES

2.1 INFORMACIÓN GENERAL

Concluida la recopilación de información de la tesis realizada en el software CYPECAD por los ingenieros Cabrera y Torres, se determinó los pórticos que presentaban mayores esfuerzos. Las mismas que presentan variación en altura, planta y número de vanos, con la finalidad de realizar los diferentes análisis dinámicos lineales como no lineales con la ayuda del software libre *OpenSees*. Cabe recalcar que en el análisis se omitió lo que esté por debajo del nivel cero, ya que tiene restricción de movimiento en todas las direcciones.

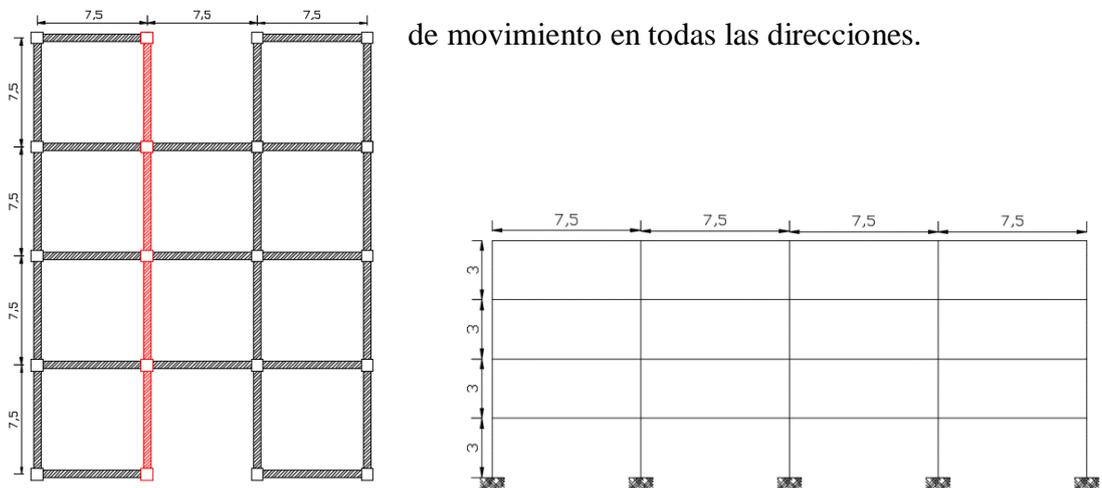


Figura 2.1: Geometría pórtico 1, vista en planta y elevación

Fuente: Autor

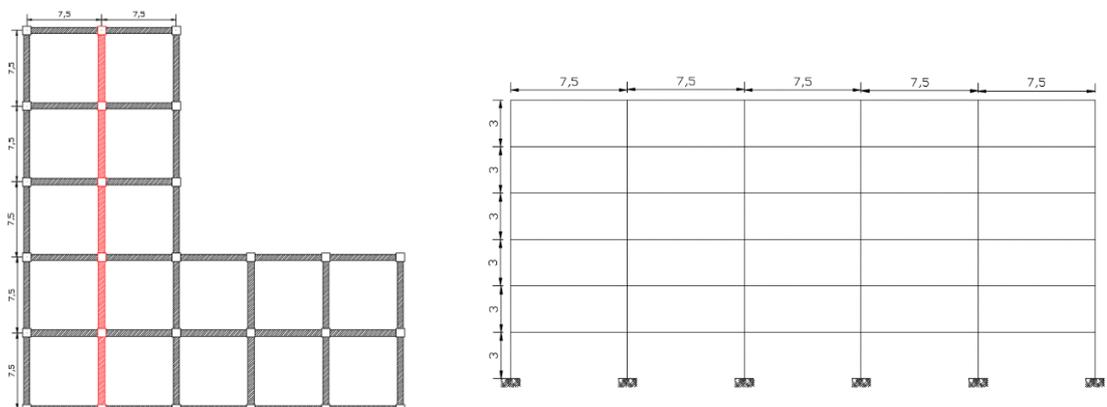




Figura 2.1: Geometría pórtico 2, vista en planta y elevación

Fuente: Autor

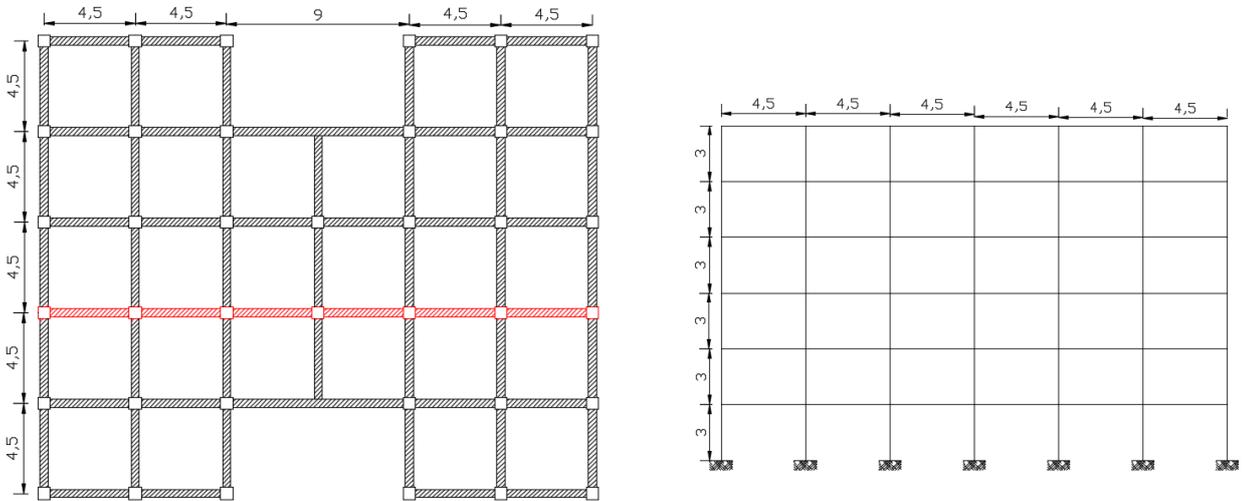


Figura 2.3: Geometría pórtico 3, visto en planta y elevación

Fuente: Autor

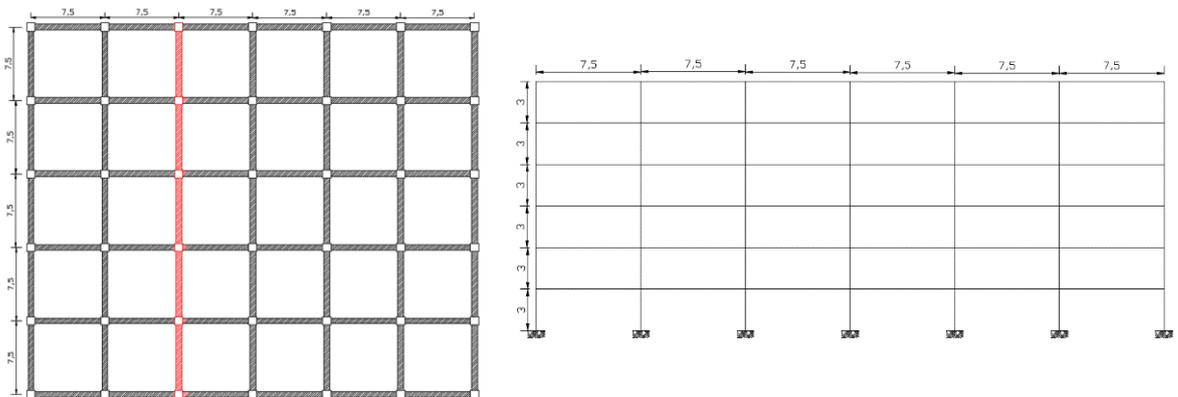


Figura 2.4: Geometría pórtico cuatro, vista en planta y elevación

Fuente: Autor

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

Los pórticos que se analizarán presentan variación en sus secciones tanto en columnas como en viga:



Tabla 2.1: Secciones de columnas y vigas

	Pórtico 1	Pórtico 2
Columna		
Viga		
	Pórtico 3	Pórtico 4
Columna		
Viga		

Fuente: Autor

2.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

2.3.1 Concreto

Concreto simple o no confinado, es un material que se comporta de forma adecuada a la compresión, pero no a la tracción, lo cual lo limita como material estructural, para



mejorar su resistencia a la tracción se emplea acero de refuerzo, el mismo que restringe el desarrollo de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto (McCormac & Brown, 2015).

2.3.2 Concreto confinado

El efecto de confinamiento del concreto lo proporciona el refuerzo transversal que rodea el núcleo de una sección. El confinamiento inicia cuando los niveles de esfuerzo de compresión en el concreto llegan a su resistencia máxima, en este momento las deformaciones transversales de la sección se incrementan debido al agrietamiento interno progresivo, en lo cual el concreto se apoya contra el refuerzo transversal el cual produce una fuerza de confinamiento sobre el concreto (Gonzales & Malca, 2015).

2.3.3 Acero de refuerzo

Es un material que posee una gran resistencia a tracción, por lo cual se usa para resistir principalmente los esfuerzos de tracción que se inducen en los electos estructurales de concreto reforzado por las cargas de diseño (McCormac & Brown, 2015).

Los materiales principales que componen las estructuras de las diferentes configuraciones estructurales que serán objeto de nuestro estudio son:

Tabla 2.2: Características de los materiales de columnas y vigas

CONCRETO		
Definición	Abreviatura	Valor
Resistencia nominal a la compresión	f_c	210 kgf/cm ²
Peso por unidad de volumen		2.4 tonf/ m ³
Módulo de elasticidad	E_c	2x10 ⁶ tonf / m ²
Recubrimiento geométrico en vigas y columnas		4 cm
ACERO DE REFUERZO		
Definición	Abreviatura	Valor
Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo longitudinal	F_y	4200 kg/cm ²
Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo transversal	F_y	2800 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	E_s	2x10 ⁷ tonf/m ²

Fuente: Autor



2.4 CARGAS GRAVITACIONALES

Las cargas gravitacionales consisten en cargas vivas y cargas muertas que se encuentran aplicadas en la estructura en sus diferentes pisos.

2.4.1 Cargas vivas de uso

Para el cálculo de la carga viva “L” han sido consideradas las siguientes cargas:

- Corredores PB: 480 kg/m²
- Terrazas: 480 kg/m²

Establecidas en la (NEC -Peligro sísmico, 2014) para hospitales, son las de mayor magnitud, debido a que cada estructura se someterán a las peores condiciones de diseño posibles.

2.4.2 Cargas muertas y permanentes

Para el cálculo de la carga muerta “D” han sido consideradas las siguientes cargas:

- Losas: 350 kg/m²
- Paredes: 140 kg/m²
- Cerámica: 50 kg/m²

Con las cargas gravitacionales establecidas para la estructura se obtiene la masa de la estructura estableciendo el área de carga tributaria de cada pórtico.

Tabla 2.3: Masas Aplicadas

	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
Masa	102.6 Tn	128.25 Tn	59.94 Tn	153.9 Tn

Fuente: Autor

2.5 MODELACIÓN USANDO EL SOFTWARE DE CÓDIGO LIBRE *OPENSEES*

2.5.1 Definición de *OpenSees*

OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*), es un *software* de código abierto orientado a la simulación de la respuesta sísmica de una estructura y sistemas geotécnicos, sometidos a eventos sísmicos, el método que se usa es basado



en elementos finitos, por lo cual una de las primeras etapas para la modelación es subdividir el sistema en elementos y Nodos, para de esta manera poder definir la acción de cargas y las restricciones nodales (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2014).

2.5.2 Lenguaje de interpretación TCL

El lenguaje de interpretación TCL “*Tool Command Language*” es un lenguaje de programación tipo “*script*” dinámico muy poderoso y fácil de aprender, creado por Jonh Ousterhout en la Universidad de Berkeley, se utiliza para soporte de los comandos de OpenSees, el cual se usa para la definición de la geometría, cargas, materiales, etc (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2014).

2.5.3 Definición de la geometría en *OpenSees*

Para poder definir la geometría de la estructura a analizar siendo esta una de las primeras etapas que se lleva a cabo se usarán diversos comandos.

2.5.3 Creación del modelo

Remitirse al Anexo 2

2.6 DISEÑO DEL ESPECTRO DE DISEÑO

2.6.1 Bases del diseño

Los procedimientos y requisitos descritos en la NEC se determinan considerando:

- La zona sísmica del Ecuador donde se construirá la estructura.
 - Factor de zona Z.
 - Curvas de Peligro Sísmico.

El territorio nacional está dividido en seis zonas sísmicas, y cada una determina un valor de aceleración sísmica propia para cada lugar (NEC -Peligro sísmico, 2014).

En la siguiente tabla, se encuentra sintetizado los valores de Z para cada zona sísmica. estos valores son el resultado del estudio de peligro sísmico para esta localidad, para un 10% de excedencia en 50 años, es decir, para un período de retorno de 475 años (NEC -Peligro sísmico, 2014).

- **Tabla2.5:** Valor factor Z en función de la zona sísmica adoptada.

Zona sísmica	Valor factor Z	Caracterización del peligro sísmico
I	0.15	Intermedia
II	0.25	Alta
III	0.3	Alta
IV	0.35	Alta
V	0.4	Alta
VI	≥ 0.50	Muy alta

- **Fuente:** (NEC -Peligro sísmico, 2014)

La ciudad de Cuenca, fue el escogido como el lugar en donde se emplazará las estructuras.

En la NEC podemos encontrar las curvas de peligro sísmico de todas las capitales de provincia del Ecuador. Por lo tanto, se selecciona la curva de la ciudad de Cuenca que tiene un valor de aceleración sísmica $Z=0.25g$.

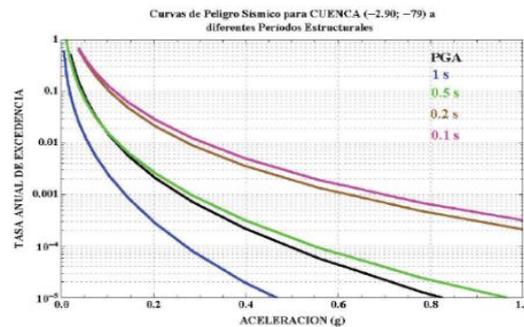


Figura 2.5: Curvas de peligro sísmico, CUENCA

Fuente: (NEC -Peligro sísmico, 2014)

Se puede obtener también a partir de la curva de peligro sísmico trazando una horizontal desde el valor de tasa anual de excedencia, siendo este el inverso del período de retorno, hasta la curva de color negro PGA (Aceleración sísmica del terreno), y de esta manera la abscisa de esta intersección sería nuestro valor de Z.

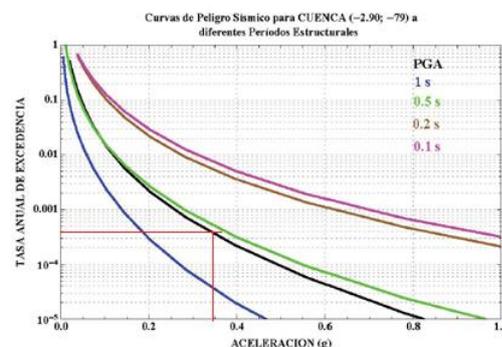


Figura 2.6: Curvas de peligro sísmico, determinación valores de aceleración 2500 años.



Fuente: (NEC -Peligro sísmico, 2014)

De la misma manera, obtenemos el valor de aceleración sísmica para el período de retorno de 2500 años.

Tabla 2.4: Período de retorno y valore factor Z

Período de Retorno	Valor factor Z
475 años	0.25
2500 años	0.34

Fuente: Autor

Al igual que las zonas sísmicas, existen seis tipos de perfiles de suelo, y los parámetros utilizados en la clasificación son los correspondientes a los 30 metros superiores del tipo de perfil (Pelígro Sísmico - Diseño Sismo Resistente, 2014). En el sitio seleccionado el perfil de terreno es del tipo C, que se detalla a continuación.

Tabla 2.6: Clasificación del perfil de suelo

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$

Fuente: (NEC -Peligro sísmico, 2014)

El tipo de uso, destino e importancia de la estructura.

Tabla 2.7: Factor de importancia

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coefficiente I
Edificaciones esenciales	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5

Fuente: (NEC -Peligro sísmico, 2014)

Las estructuras de uso normal deberán diseñarse para una resistencia tal que puedan soportar los desplazamientos laterales inducidos por el sismo de diseño, considerando



la respuesta inelástica, la redundancia, la sobre resistencia estructural inherente y la ductilidad de la estructura (NEC -Peligro sísmico, 2014).

Para las estructuras de ocupación especial y edificaciones esenciales, además de los requisitos aplicables a las estructuras de uso normal, se aplicarán verificaciones de comportamiento inelástico para diferentes niveles de terremotos (NEC -Peligro sísmico, 2014).

Tabla 2.8: Niveles de amenaza sísmica

Nivel de Sismo	Sismo	Probabilidad de excedencia en 50 años	Períodos de Retorno Tr (años)	Tasa anual de excedencia (1/Tr)
1	Frecuente (menor)	50%	72	0.01389
2	Ocasional (moderado)	20%	225	0.00444
3	Raro (severo)	10%	475	0.00211
4	Muy raro	2%	2500	0.00040

Fuente: (NEC -Peligro sísmico, 2014)

Se debe verificar que las estructuras funcionen correctamente en el rango inelástico en los siguientes casos:

Tabla 3.9: Nivel de desempeño para estructuras esenciales.

Nivel de desempeño estructural (prevención)	Estructuras de ocupación especial	Estructuras esenciales	Tasa anual de excedencia
Daño	No	Si	0.00211
Colapso	Si	Si	0.00004

Fuente: (NEC -Peligro sísmico, 2014)

La resistencia mínima de diseño para todas las estructuras deberá basarse en las fuerzas sísmicas de diseño (NEC -Peligro sísmico, 2014).

- El nivel de desempeño sísmico
- El tipo de sistema y configuración estructural a utilizarse

Los métodos de análisis a ser empleados

- Método de diseño basado en fuerzas (DBF)
- Método de diseño basado en desplazamientos (DBD)

2.7 ESPECTRO DE DISEÑO

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC -Peligro sísmico, 2014). “El espectro de diseño puede representarse mediante un espectro de respuesta basado en las condiciones geológicas, tectónicas, sismológicas y del tipo de suelo asociadas con el sitio de emplazamiento de la estructura” (p.9)

Tabla 2.10: Coeficientes de perfil de suelo F_a , F_d y F_s .

Factores	Definición
F_a	Coeficiente de ampliación de suelo en la zona de período corto. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos del sitio.
F_d	Coeficiente de ampliación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos del sitio.
F_s	Coeficiente de ampliación del suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

Fuente: (NEC -Peligro sísmico, 2014)

Tabla 2.11: Factores que intervienen en el espectro de diseño.

Factor	Descripción
η	Razón entre la aceleración espectral S_a ($T=0.1s$) y el PGA para el período de retorno seleccionado
r	Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto $r = 1$ para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E $r = 1.5$ para tipo de suelo E.
R	Factor de reducción de resistencia sísmica. $R=8$ (Pórticos especiales sísmo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas). $R=1$ (Para realizar análisis inelástico, no se reduce la resistencia sísmica)

Fuente: (NEC -Peligro sísmico, 2014)

Se analiza el espectro de respuesta en diferentes períodos de retorno tanto en 475 y 2500 años con las condiciones antes establecidas.

2.7.1 Período de Retorno 475 años

Tabla 2.12: Período de Retorno 475

Factor	Valor	Descripción
η	2.48	Provincia de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos (NEC_SE_14, 3.1.2)
r	1	Todos los suelos, con excepción del suelo tipo E
I	1.5	Factor de importancia (NEC_SE_14, 4.1)
Fa	1.4	Para suelo tipo D con $Z=0.25$ g (NEC_SE_14, 3.2.2 Tabla.3)
Fd	1.45	Para suelos tipo D con $Z=0.25$ g (NEC_SE_1, 3.2.2 Tabla. 5)
Fs	1.06	Para suelos tipo D con $Z=0.25$ g (NEC_SE_1, 3.2.2 Tabla. 4)
R	1-8	Reducción de resistencia sísmica

Fuente: Autor

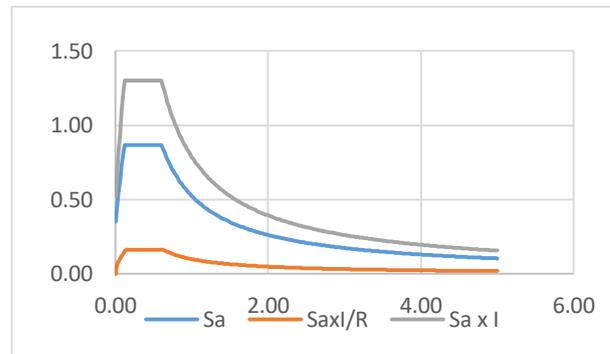


Figura 2.7: Espectro de diseño para 475 años de la ciudad de Cuenca

Fuente: Autor

2.7.2 Período de Retorno 2500 años.

Tabla 2.13: Período de Retorno 2500 años

Factor	Valor	Descripción
η	2.48	Provincia de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos (NEC_SE_14, 3.1.2)
r	1	Todos los suelos, con excepción del suelo tipo E
I	1.5	Factor de importancia (NEC_SE_14, 4.1)
Fa	1.26	Para suelo tipo D con $Z=0.34$ g (NEC_SE_14, 3.2.2 Tabla.3)
Fd	1.296	Para suelos tipo D con $Z=0.34$ g (NEC_SE_1, 3.2.2 Tabla. 5)
Fs	1.174	Para suelos tipo D con $Z=0.34$ g (NEC_SE_1, 3.2.2 Tabla. 4)
R	1	Reducción de resistencia sísmica

Fuente: Autor

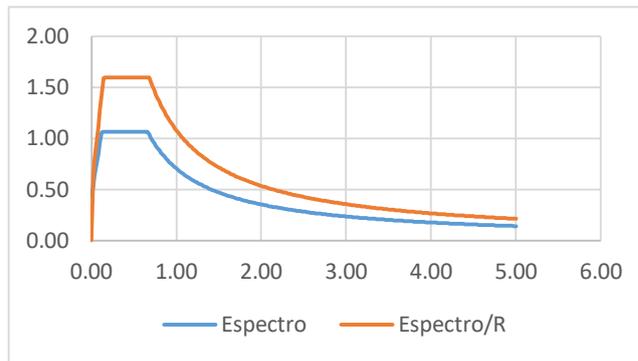


Figura 2.8: Espectro de diseño para 475 años de la ciudad de Cuenca

Fuente: Autor

2.8 ANÁLISIS MODAL

El análisis modal es una técnica de análisis dinámico de estructuras que tiene como objetivo determinar las formas modales y **los períodos de vibración**. También se utiliza como método de monitorización de la vida estructural (SHM), es decir, cuando una estructura sufre daños, su rigidez disminuye y eso afecta a sus frecuencias y por lo tanto afecta a su manera de vibrar. Este cambio es detectable y comparable con un estado de referencia inicial de la estructura libre de daño (Lasagni, 2015).

Para determinar los períodos de vibración de los pórticos seleccionados, se realizó la programación en el software *OpenSees*. Para ello es necesario definir primero la geometría de cada estructura, los elementos que la conforman, así como sus materiales, características y armados de refuerzo.

Es importante recalcar que, para los resultados, las secciones de cada elemento estructural, columnas y vigas, fueron afectadas con factores de agrietamiento de 0,8 y 0,5 respectivamente (NEC -Peligro sísmico, 2014).

Los resultados que se obtuvieron del análisis modal son los siguientes:

Tabla 2.14: Período de vibración de los diferentes pórticos analizados.

Pórticos analizados	Análisis dinámico elástico 475 años- Período de vibración
Pórtico 1	0.7131
Pórtico 2	0.791
Pórtico 3	1.029
Pórtico 4	0.793

Fuente: Autor.



Cada pórtico tiene un período fundamental distinto, por lo que el análisis se hizo de manera similar, únicamente variando los valores en los que influye el período, principalmente el escalamiento de los espectros de los sismos utilizados, esto se realiza posteriormente.

2.9 Escalamiento de sismos

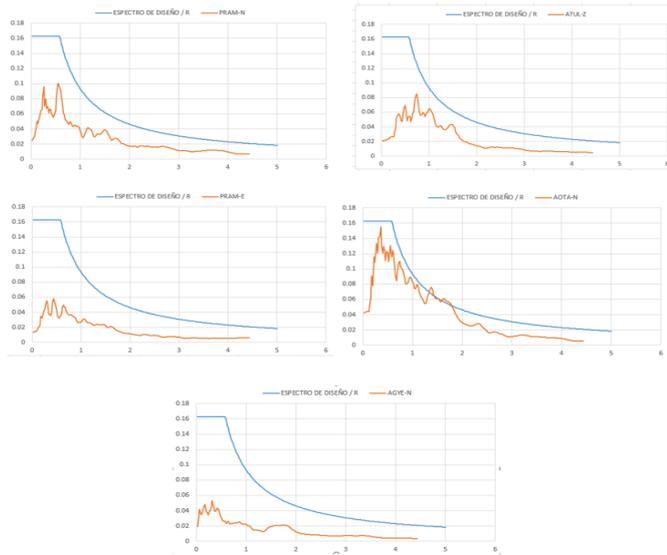
Los movimientos de tierra deben ser seleccionados en base a acontecimientos reales tales que sean representativos de la zona de emplazamiento de las estructuras.

Según la sección 16.1.4 del ASCE menciona que se deben escoger al menos tres registros para realizar un análisis, es así como para el presente estudio se han seleccionado cinco registros representativos del lugar basándonos en la forma espectral de estos en relación con el espectro de diseño de la zona seleccionada.

El objetivo del escalamiento es que el promedio de los espectros de respuesta de pseudo aceleración no sea menor al espectro de diseño en ningún punto a lo largo del rango que va entre $0.2T$ y $1.5T$ (NEC -Peligro sísmico, 2014).

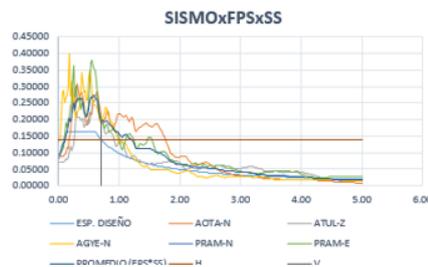
El período fundamental se entiende que viene determinado por parte de cada uno de los modelos estructurales, por lo tanto, debemos escalar los cinco registros para cada tipo de análisis que se realizará posteriormente, tales como: análisis dinámico lineal con secciones agrietadas, análisis dinámico no lineal con períodos de retorno de 475 y 2500 años y los mismos análisis con la incorporación de las correspondientes medidas de mitigación.

Los siguientes sismos seleccionados para el análisis dinámico lineal y no lineal son los siguientes:



- AOTA-N
- ATUL-Z
- AGYE-N
- PRAM-N
- PRAM-E

Figura 2.9: Sismos seleccionados para el análisis dinámico lineal y no lineal



Fuente: Autor

Figura 22.10: Escalamiento de sismos seleccionados para el análisis dinámico lineal y no lineal.

Fuente: Autor



Figura 23.11: Sismos escalados para análisis dinámico lineal y no lineal

Fuente: Autor

Se debe entender además que cada movimiento tiene su propio valor de escala, por lo que se tendrá un infinito número de maneras de escalamiento.

A continuación, se muestran todos los resultados de los valores escalados para cada análisis realizado, de cada uno de los pórticos, con y sin aislador:

2.9.1 Factores de escalamiento para el pórtico 1:

**Tabla 2.15:** Factores FCS – Pórtico 1

Registros	Factores FCS			
	Análisis dinámico elástico 475 años	Análisis dinámico inelástico 475 años	Análisis dinámico inelástico 2500 años	
		Sin aislador	Sin aislador	Con aislador
AOTA-N	2.4621	26.92290	30.36903	15.74368
ATUL-Z	10.3201	103.51570	116.76571	80.18873
AGYE-N	5.6191	52.17417	58.85247	81.05307
PRAM-N	3.2129	35.93717	40.53713	26.54006
PRAM-E	3.7828	25.12545	28.34151	29.87861

Fuente: Autor

2.9.2 Factores de escalamiento para el pórtico 2:**Tabla 24.16:** Factores FCS – Pórtico 2.

Registros	Factores FCS			
	Análisis dinámico elástico 475 años	Análisis dinámico inelástico 475 años	Análisis dinámico inelástico 2500 años	
		Sin aislador	Sin aislador	Con aislador
AOTA-N	2.12789349	18.87364	23.01522	14.81023
ATUL-Z	11.8779113	81.37237	99.22850	85.18228
AGYE-N	4.24582309	51.19875	62.43366	75.39944
PRAM-N	2.95428131	34.52929	42.10631	27.20323
PRAM-E	3.73563523	26.51667	32.33541	31.13661

Fuente: Autor



2.9.3 Factores de escalamiento para el pórtico 3:

Tabla 2.17: Factores FCS – Pórtico 3

Registros	Factores FCS			
	Análisis dinámico elástico 475 años	Análisis dinámico inelástico 475 años	Análisis dinámico inelástico 2500 años	
		Sin aislador	Sin aislador	Con aislador
AOTA-N	1.36073	17.24974	21.11368	11.43407
ATUL-Z	8.86421	94.77520	116.00485	106.37433
AGYE-N	5.13876	34.02487	41.64645	83.68938
PRAM-N	2.64528	23.24838	28.45601	27.41093
PRAM-E	3.65365	30.13976	36.89107	26.10929

Fuente: Autor

2.9.4 Factores de escalamiento para el pórtico 4:

Tabla 2.18: Factores FCS – Pórtico 4

Registros	Factores FCS			
	Análisis dinámico elástico 475 años	Análisis dinámico inelástico 475 años	Análisis dinámico inelástico 2500 años	
		Sin aislador	Sin aislador	Con aislador
AOTA-N	2.09123	18.64660	22.73461	17.69719
ATUL-Z	11.80689	80.92103	98.67003	96.31357
AGYE-N	4.27177	51.31187	62.57268	108.87621
PRAM-N	2.99343	33.09819	40.33935	23.40330
PRAM-E	3.70484	27.78740	33.90540	29.63494

Fuente: Autor

2.10 Análisis dinámico no lineal (*Pushover*)

El análisis *Pushover* de una estructura consiste en aplicar cargas laterales incrementales las cuales representarán fuerzas inducidas por un sismo y bajo cargas gravitacionales constantes, que se aplican en la misma dirección hasta que la estructura colapse o hasta cierto valor de carga (Nikam & Kalurkar, 2016). Normalmente la parte superior de la estructura (techo) se usa como indicador del punto de máximo desplazamiento objetivo y el análisis procede a detenerse (Mohammad & Hesamoldin, 2015).

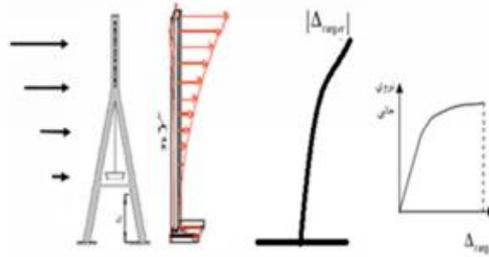


Figura 24.12: análisis *Pushover*- desplazamiento máximo

Fuente: (Mohammad & Hesamoldin, 2015)

2.11 Efectos P-delta

Son los efectos combinados de las cargas de gravedad que actúan en conjunto con derivas laterales debido a las fuerzas sísmicas, estos efectos son causados por las cargas de gravedad que actúan a través de la configuración deformada de un edificio y el resultado en un aumento de los desplazamientos laterales (FEMA, 2000).



Tabla 5.19: Curva de capacidad considerando efectos P-Delta y lineal.

Curvas de Capacidad de las diferentes configuraciones estructurales
<p style="text-align: center;">Pórtico 1</p> <p style="text-align: center;">Pórtico 2</p> <p style="text-align: center;">Pórtico 3</p> <p style="text-align: center;">Pórtico 4</p>

Fuente: Autor



2.12 Cortante basal de diseño

Es la fuerza total de diseño por cargas laterales que se aplican en la base de la estructura, que son resultado de la acción del sismo de diseño con o sin reducción (NEC -Peligro sísmico, 2014).

El cortante basal total de diseño “V” según la NEC 2014 para el análisis de las diferentes configuraciones estructurales considera dos variantes, la primera con un período de retorno de 475 años y la segunda con un período de retorno de 2500 años, el cual se determinará de la siguiente manera:

Dónde:

$$V = \frac{IS_a(T_a)}{R\phi_P\phi_E} W$$

- $S_a(T_a)$: Espectro de diseño en aceleración
- ϕ_P y ϕ_E : Coeficiente de configuración en planta y elevación
- I : Coeficiente de importancia
- R : Factor de reducción de resistencia sísmica
- V : Cortante basal total de diseño
- W : Carga sísmica reactiva
- T_a : Período de vibración

Los parámetros que son necesarios para el cálculo del cortante basal se basaron en el Cap.6.3 de la NEC, a continuación, se presenta unas tablas resumen de los datos usados para determinar el cortante basal tanto con un período de retorno de 475 y 2500 años de las diferentes configuraciones estructurales.

Tabla 6.20: Parámetro para calcular el cortante basal 475 años

Cortante Basal -475 años (NEC 14)				
	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
V (Tnf)	100.63	185.81	79.10	211.98
I	1.00	1.00	1.00	1.00
Op	0.90	0.90	0.90	0.90
Oe	0.90	1.00	1.00	1.00
Cortante Basal -475 años (NEC 14)				
	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4



R	8.00	8.00	8.00	8.00
W (Tnf)	500.83	1027.51	437.40	1172.23
D (Tnf)	500.83	1027.51	437.40	1172.23
Ta	0.51	0.74	0.74	0.74
H (m)	12.00	18.00	18.00	18.00
Ct	0.055	0.055	0.055	0.055
alpha	0.90	0.90	0.90	0.90
Sa	1.3020	1.3020	1.3020	1.3020

Fuente: Autor

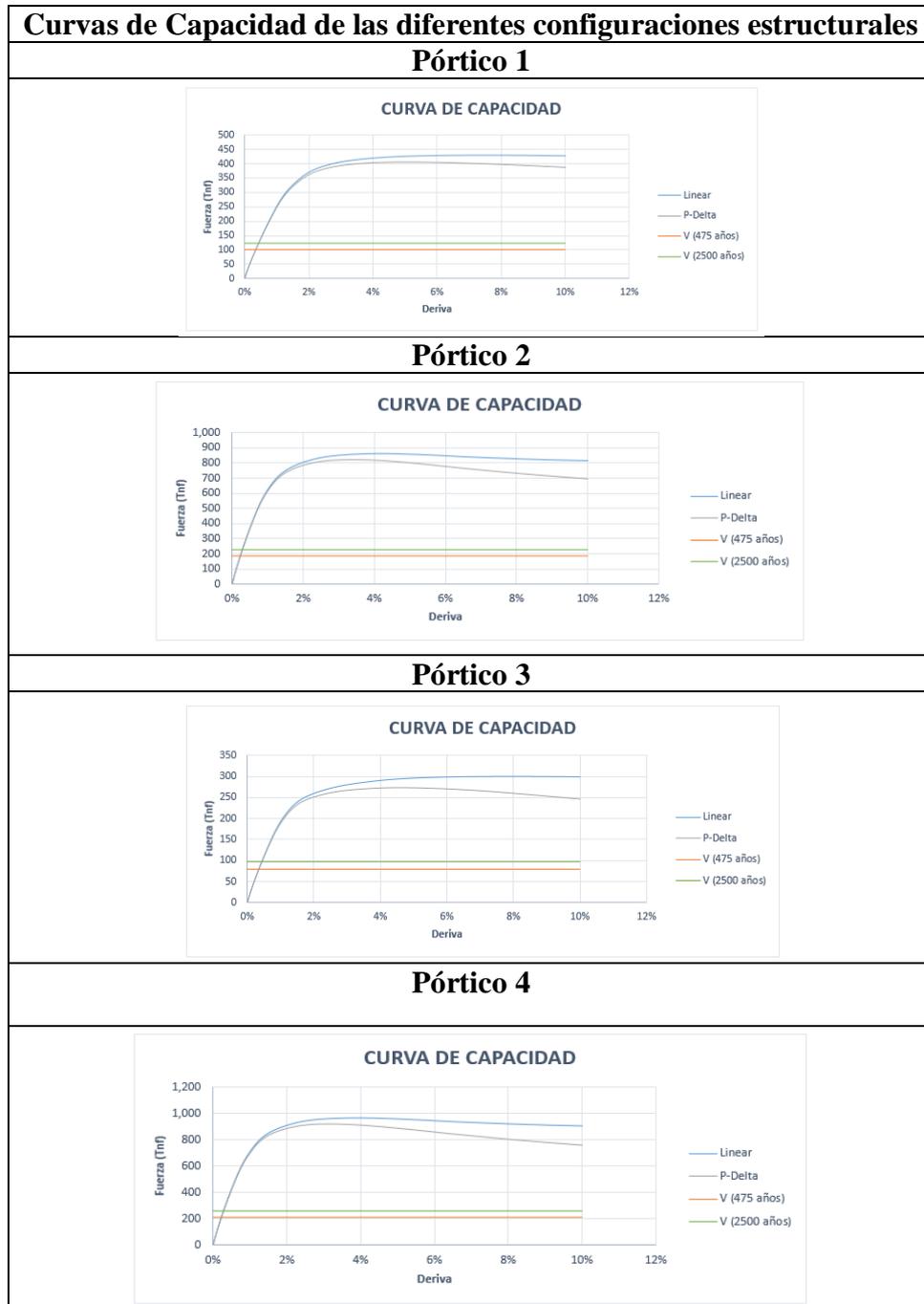
Tabla 27.21: parámetro para calcular el cortante basal 2500 años

Cortante Basal -2500 años (NEC 14)				
	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
V (Tnf)	123.167	227.42	96.81	259.45
I	1	1	1	1
Op	0.9	0.9	0.9	0.9
Oe	0.9	1	1	1
R	8	8	8	8
W (Tnf)	500.832	1027.51	437.40	1172.23
D (Tnf)	500.832	1027.51	437.4	1172.232
Ta	0.51478	0.74	0.74	0.74
H (m)	12	18	18	18
Ct	0.055	0.055	0.055	0.055
alpha	0.9	0.9	0.9	0.9
Sa	1.5936	1.5936	1.5936	1.5936

Fuente: Autor

El valor del coeficiente de importancia “I” se considera uno (1), ya que el espectro de diseño fue afectado por 1.5 al inicio del análisis considerando que Sa (Ta) representa un valor dentro del espectro de diseño y el cual fue afectado anteriormente.

Los resultados obtenidos dentro del análisis dinámico no lineal usando el software de código libre *OpenSees* y el cálculo del cortante basal “V” se puede observar la gráfica de deriva vs fuerza y el cortante basal “V” en un período de retorno de 475 y 2500 años, que es también conocida como curva de capacidad, la cual permite la evaluación del daño en la estructura por deformación máxima.

Tabla 8.22: Curva de capacidad para un período de retorno de 475 y 2500 años.

Fuente: Autor

Con los resultados obtenidos del análisis *Pushover* se pudo obtener los diferentes porcentajes de sobre resistencia que tienen las diferentes estructuras para soportar el cortante basal de diseño V.

Tabla 9.23: Porcentajes de sobre resistencia de las diferentes estructuras para soportar el cortante basal V -475 años

Cortante Basal -475 años (NEC 14)				
	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
V <i>Pushover</i>	405.69	821.68	273.10	920.48
V (475 años)	100.63	185.81	79.10	211.98
excedencia	75%	77%	71%	77%

Fuente: Autor

Tabla 2.24: Porcentajes de sobre resistencia de las diferentes estructuras para soportar el cortante basal V -2500 años

Cortante Basal -2500 años (NEC 14)				
	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
V <i>Pushover</i>	405.70	821.68	273.10	920.48
V (2500 años)	123.17	227.42	96.81	259.45
excedencia	70%	72%	65%	72%

Fuente: Autor

2.13 Análisis *Pushover* cíclico

Durante varias décadas se han realizado diversas pruebas para poder determinar la fuerza- deformación de los componentes de una estructura bajo condiciones sísmicas, ya que durante un sismo las estructuras se someten a movimientos oscilatorios con deformaciones cíclicas. Los resultados experimentales indican que el comportamiento fuerza –deformación cíclica para una estructura depende del material y del sistema estructural (Chopra, 2014).

Las gráficas de fuerza –deformación muestran los ciclos de histéresis bajo deformaciones cíclicas debidas a un comportamiento inelástico en lo que se puede apreciar la energía disipada de las diferentes configuraciones esenciales representado por el área entre curvas.



Tabla 2.25: Curvas Histerética de las diferentes configuraciones estructurales.

Curvas Histerética de las diferentes configuraciones estructurales
<p style="text-align: center;">Pórtico 1</p> <p style="text-align: center;">Pórtico 2</p> <p style="text-align: center;">Pórtico 3</p> <p style="text-align: center;">Pórtico 4</p>

Fuente: Autor

2.14 Análisis de vibración libre

Una estructura experimenta vibración libre cuando es perturbada de su posición de equilibrio estático y después deja vibrar sin ninguna excitación dinámica externa. El proceso mediante el cual la amplitud de la vibración libre disminuye de manera constante se denomina amortiguamiento, el cual la energía del sistema de vibración se disipa por diversos mecanismos y, con frecuencia más de un mecanismo puede estar presente al mismo tiempo (Chopra, 2014).

En el caso de las estructuras esenciales, se analiza la vibración libre amortiguada en la que las edificaciones tienen razón de amortiguamiento menor a uno y el sistema oscila alrededor de su posición de equilibrio con una amplitud que decrece progresivamente en el tiempo. Es decir, la amplitud de la vibración no permanece constante durante el movimiento, sino que decrece por ciclos consecutivos; no obstante, las oscilaciones ocurren a intervalos iguales de tiempo. Ese intervalo de tiempo llamado “período amortiguado” (Chopra, 2014).

En los diferentes pórticos que fueron seleccionados previamente se realizó un análisis de vibración libre con la ayuda del software de código abierto *OpenSees*, se ingresó todos los valores de cargas laterales, materiales, secciones, etc. Proporcionando así un máximo desplazamiento en el último nodo, con un amortiguamiento de Rayleigh de 3% a 5%.

Vibración libre- Amortiguamiento de las diferentes configuraciones estructurales

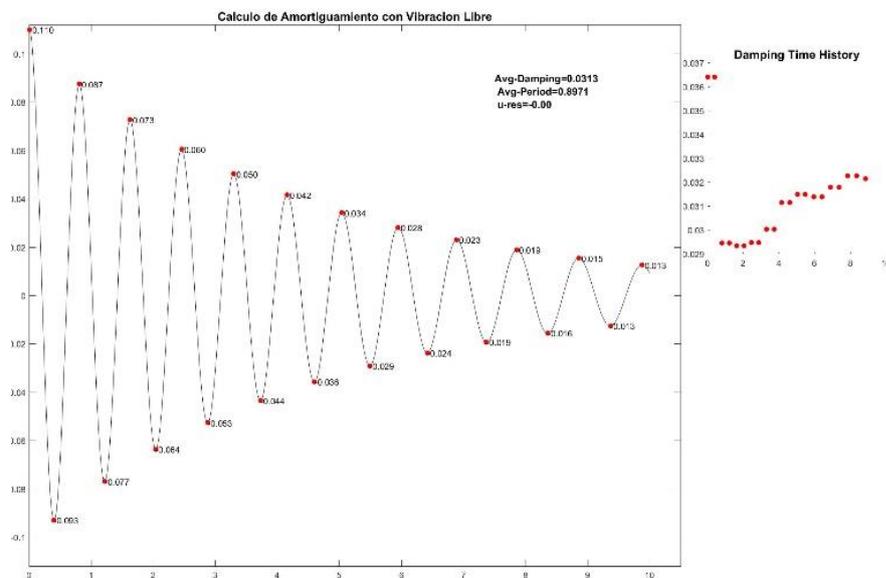




Figura 25.13: Vibración Libre – pórtico 1

Fuente: Autor

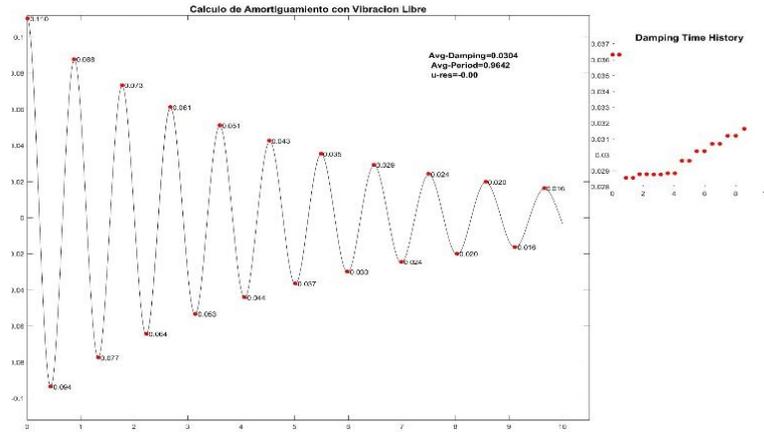


Figura 2.14: Vibración Libre – pórtico 2

Fuente: Autor

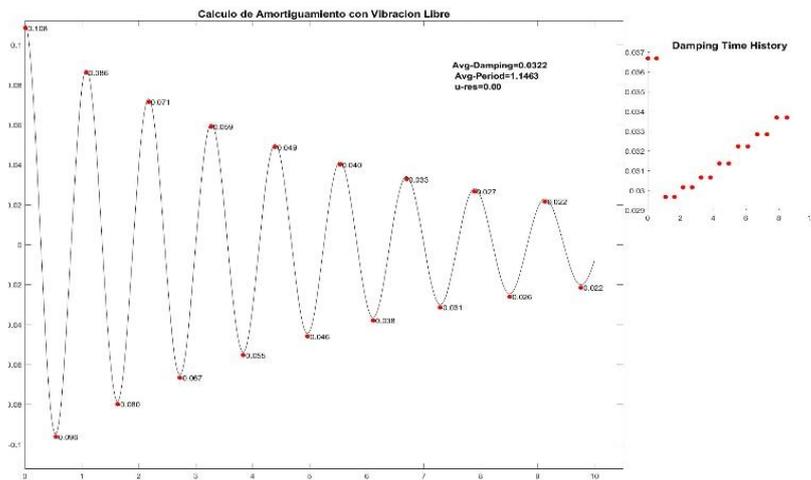
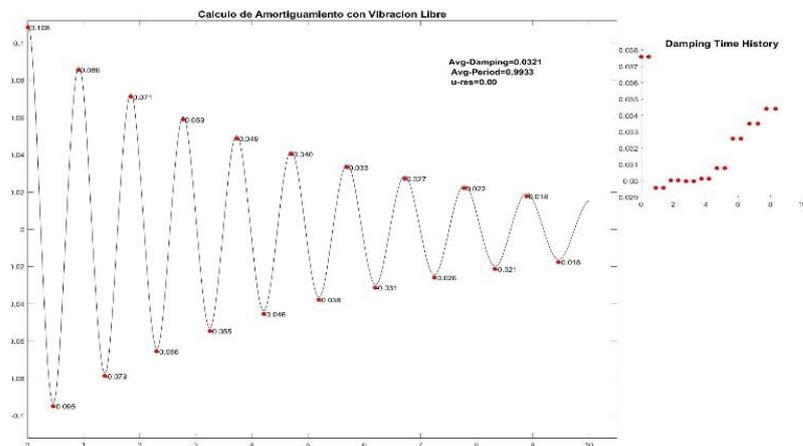


Figura 2.15: Vibración Libre – pórtico 3

Fuente: Autor



**Figura 2.16:** Vibración Libre – pórtico 4

Fuente: Autor

2.15. Análisis Dinámico Lineal

Se basa en el comportamiento elástico – lineal de los materiales que conforman la estructura, considerando el equilibrio sin tomar en cuenta la deformación (Nieto, Rivero, & Lobo, 2009). Se realizará el análisis dinámico para cada uno de los pórticos seleccionados, se definirá la geometría, secciones, materiales y se considerará el escalamiento de los cinco sismos escogidos anteriormente. Además, el amortiguamiento que se utilizó para el análisis es del 3% (NEC -Peligro sísmico, 2014), para estar al lado de la seguridad.

Se realizará el modelamiento en el *software OpenSees* donde se requiere tener previamente los siguientes parámetros de cada uno de los pórticos:

2.15.1. Script de *ModelGeometry*

Ya hemos hablado acerca de lo que debe contener esta rutina de programación en la sección “Definición de Geometría”. Este archivo deberá tener definido todos los nodos que conforman el modelo, las masas de cada piso, restricciones de apoyo y de piso, y elementos estructurales.

Cabe recalcar que para el análisis lineal debemos utilizar el comando “*element elasticBeamColumn*” para definir los elementos estructurales.

2.15.2. Script de *SectionAndMaterial*

De igual manera, la rutina para este archivo la encontramos descrita en la sección “Definición de Materiales”. En este script es importante detallar todas las propiedades de los materiales de los que van a estar compuestas nuestras estructuras, tales como: densidad del hormigón, módulos de elasticidad, fluencia del acero, dimensiones de las secciones, porcentaje de agrietamiento, etc.

NOTA: Los nombres de los *scripts* pueden variar, pero se debe tener en consideración la exactitud de la escritura para llevarlos a la ventana de interpretación.

Luego de ingresar nuestros datos, el programa los interpretará mediante un análisis modal y nos calculará el período fundamental de cada pórtico.

Tabla 2.26: Período fundamental



Análisis dinámico elástico 475 años secciones agrietadas	
Pórtico 1	0.7131
Pórtico 2	0.791
Pórtico 3	1.029
Pórtico 4	0.7856

Fuente: Autor

Se procederá a realizar un análisis Tiempo – Historia para determinar los desplazamientos y derivas de cada pórtico, los cuales son sometidos a cargas de diferentes sismos, sabiendo que la norma ecuatoriana menciona que las mismas no deben ser superiores al 2% (NEC -Peligro sísmico, 2014).

Para esto necesitamos los siguientes requerimientos:

- Factores FCS de cada pórtico calculados anteriormente para “Análisis Dinámico Lineal 475 años”.
- Archivos de texto de los registros de acelerogramas de cada sismo.
- *Script de ModelGeometry.*
- *Script de SectionAndMaterial.*

Se someterá a la estructura a los diferentes sismos y se determinan los desplazamientos y derivas máximas.



Tabla 2.27: Derivas Máximas

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 1										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (seg)	49.43	t (seg)	30.6	t (seg)	45.1	t (seg)	48.24	t (seg)	61.19
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+12.00	0.0359	0.3318%	0.0387836	0.3629%	0.0340044	0.2907%	0.0337628	0.3201%	0.0359015	0.3318%
N+9.00	0.0259	0.3710%	0.0278969	0.4027%	0.0252845	0.3447%	0.0241603	0.3516%	0.0259483	0.3710%
N+6.00	0.0148	0.3362%	0.0158165	0.3604%	0.0149427	0.3342%	0.0136113	0.3109%	0.0148172	0.3362%
N+3.00	0.0047	0.1577%	0.0050047	0.1668%	0.0049173	0.1639%	0.0042836	0.1428%	0.0047304	0.1577%
N+0.00	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 2										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	59.66	t (ser)	72.22	t (ser)	48.39	t (ser)	46.17	t (ser)	46.82
	DESPL	DERIVA								
N+18.00	0.0436212	0.1515%	0.0478001	0.1623%	0.047921	0.1554%	0.0447919	0.1494%	0.0460562	0.1541%
N+15.00	0.0390758	0.2232%	0.0429302	0.2403%	0.0432585	0.2367%	0.0403105	0.2226%	0.0414338	0.2297%
N+12.00	0.0324	0.2913%	0.0357203	0.3163%	0.0361579	0.3188%	0.0336315	0.2957%	0.0345436	0.3046%
N+9.00	0.0236	0.3294%	0.0262318	0.3617%	0.0265929	0.3680%	0.0247603	0.3408%	0.0254066	0.3502%
N+6.00	0.0138	0.3052%	0.0153819	0.3397%	0.0155537	0.3445%	0.0145357	0.3212%	0.0149009	0.3294%
N+3.00	0.0046	0.1534%	0.0051916	0.1731%	0.00522	0.1740%	0.0049001	0.1633%	0.0050191	0.1673%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%



Desplazamientos y derivas										
Pórtico 3										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	72.84	t (ser)	75.67	t (ser)	46.11	t (ser)	35.72	t (ser)	54.25
	DESPL	DERIVA								
N+18.00	0.0480506	0.1783%	0.0488828	0.1804%	0.0444692	0.1301%	0.0433833	0.1309%	0.0481257	0.1878%
N+15.00	0.0427008	0.2548%	0.0434708	0.2578%	0.0405665	0.2040%	0.0394562	0.2012%	0.0424906	0.2614%
N+12.00	0.0351	0.3254%	0.0357361	0.3295%	0.0344471	0.2925%	0.0334212	0.2814%	0.0346491	0.3248%
N+9.00	0.0253	0.3600%	0.0258524	0.3657%	0.0256723	0.3550%	0.0249779	0.3388%	0.0249042	0.3543%
N+6.00	0.0145	0.3249%	0.0148826	0.3324%	0.0150229	0.3359%	0.0148148	0.3270%	0.0142754	0.3195%
N+3.00	0.0047	0.1583%	0.0049092	0.1636%	0.0049471	0.1649%	0.0050059	0.1669%	0.0046918	0.1564%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 4										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	59.66	t (ser)	72.23	t (ser)	48.39	t (ser)	46.17	t (ser)	55.57
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.0425376	0.00882	0.0479392	0.0096952	0.0478746	0.0091212	0.0451712	0.0088444	0.0459498	0.0090392
N+15.00	0.0381276	0.013044	0.0430916	0.0144238	0.043314	0.014025	0.040749	0.0133124	0.0414302	0.0136622
N+12.00	0.0316	1.7036%	0.0358797	1.9016%	0.0363015	1.9026%	0.0340928	1.7827%	0.0345991	1.8297%
N+9.00	0.0231	1.9271%	0.0263718	2.1772%	0.0267887	2.2110%	0.0251794	2.0694%	0.0254505	2.1100%
N+6.00	0.0135	1.7884%	0.0154859	2.0493%	0.0157335	2.0855%	0.0148326	1.9626%	0.0149006	1.9788%
N+3.00	0.0045	0.9019%	0.0052394	1.0479%	0.005306	1.0612%	0.0050196	1.0039%	0.0050067	1.0013%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Fuente: Autor



Se puede determinar que el comportamiento de los diferentes pórticos dentro del rango lineal está sobre el valor que exige la norma, ya que la mayoría es superior al 2%. Sin embargo, un **análisis dinámico no lineal** nos permitirá realizar un estudio más profundo para poder determinar el comportamiento de las diferentes estructuras y así poder comparar los resultados obtenidos en el análisis dinámico lineal.

2.16 Comparación entre *OpenSees* vs Otro Software

Otros softwares especializados para estructuras, la modelación requiere tener previamente algunos parámetros para la realización de los respectivos cálculos para cada uno de los pórticos:

- Dibujar a detalle los modelos estructurales.
- Definir materiales.
- Ingreso los registros de sismos a la interfaz con sus respectivas escalas para cada uno,

Debido a la facilidad y a la comodidad que nos brindan estos programas, el ingreso de datos y asimismo la manera de apreciar los resultados es más rápida, y es una ventaja significativa con respecto a *OpenSees*.

Tabla 2.28: Comparación entre *OpenSees* y Otros softwares / Periodo fundamental

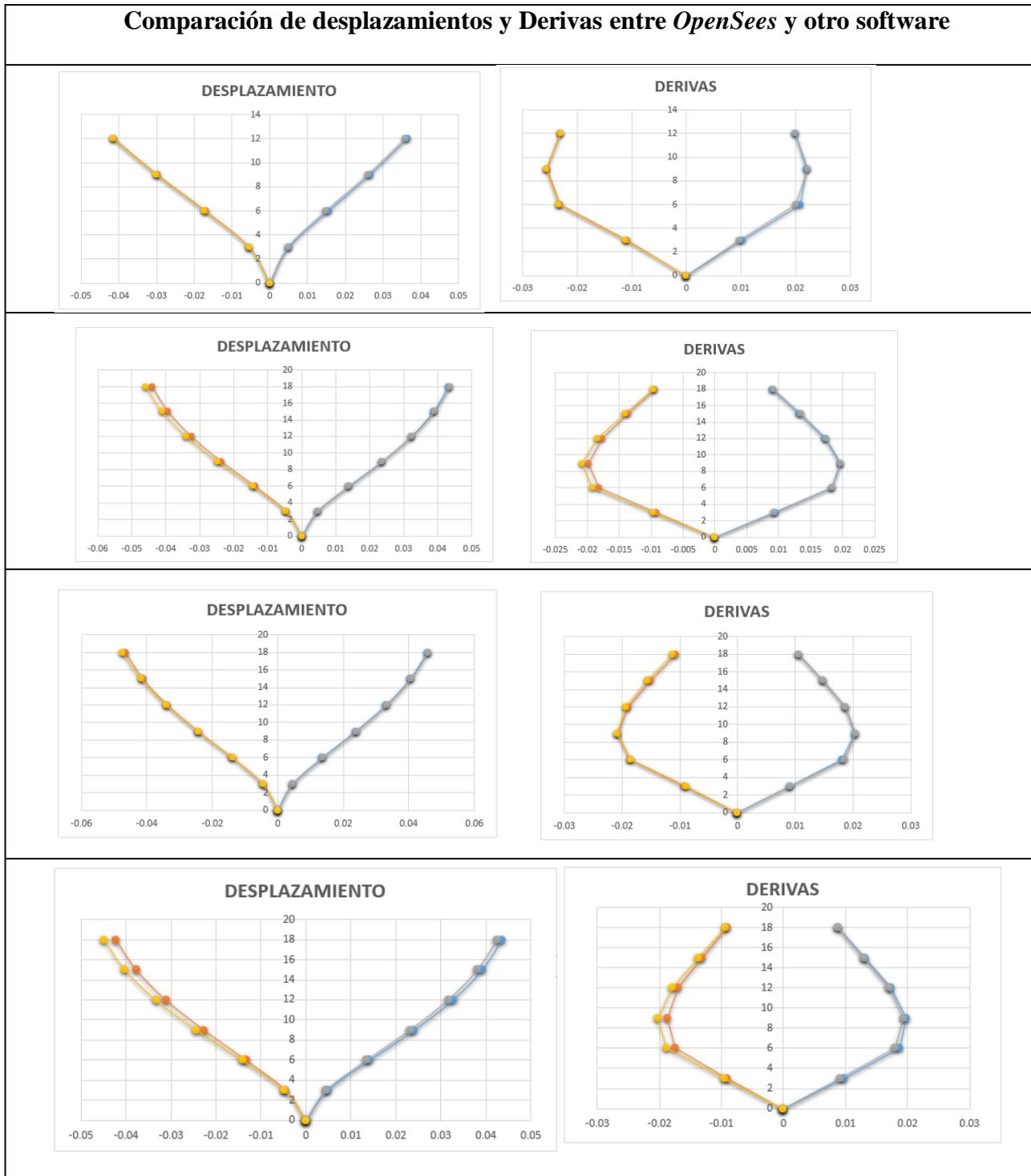
	Análisis dinámico elástico 475 años secciones agrietadas	Análisis dinámico elástico 475 años secciones agrietadas
	<i>OpenSees</i>	otro
Pórtico 1	0.7131	0.71
Pórtico 2	0.7846	0.791
Pórtico 3	1.0266	1.029
Pórtico 4	0.7856	0.793

Fuente: Autor

2.17. Desplazamientos y Derivas

Se muestran los resultados de sismo, obtenidos en ambos análisis y se compara su similitud en las siguientes gráficas a lo largo de la simulación:

Tabla 2.29: Comparación entre *OpenSees* y Otros softwares



Fuente: Autor



2.18. Análisis Dinámico No Lineal

El análisis inelástico permite conocer los valores máximos, tanto de desplazamientos, como de derivas; a los que la estructura puede llegar, es decir, al momento que sobrepasan el límite elástico y entran en plastificación, para finalmente dar paso al colapso de la edificación.

Para realizar el análisis dinámico no lineal se aplicará un amortiguamiento del 3%, un coeficiente de reducción de resistencia $R=1$ para el escalamiento de los sismos, un período de retorno para 475 años y 2500 años. Se realizará este análisis mediante el software de código abierto *OpenSees*, el cual necesita ciertos parámetros que son:

2.18.1 Script de *ModelGeometry*

Se lo elabora de la misma manera que para el análisis dinámico lineal, pero con un cambio a la hora de definir los elementos estructurales.

Para esta ocasión debemos utilizar el comando *element dispBeamColumn* en lugar del que usamos antes, el *element elasticBeamColumn*.

Este cambio se lo realiza debido a que para este análisis se necesita definir las secciones en base a fibras.

2.18.2 Script de *SectionAndMaterial*

Este archivo presenta considerables cambios con respecto al anterior. Principalmente porque ya no es solamente necesario describir las dimensiones de las secciones y algunas propiedades de los materiales, sino que además de aquello se debe proporcionar información más detallada, así como: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia máxima y última del concreto confinado y no confinado, número de varillas de acero con sus respectivos diámetros, definir los parches de fibras para cada sección. Se debe considerar para este análisis la sección completa sin agrietar.

2.18.3 Script de *GravityLoad*

Aquí lo único requerido es definir las cargas distribuidas que se utilizarán y en qué elementos se encontrarán situadas.



Después de realizar el análisis siguiendo el mismo procedimiento antes descrito ahora para un período de retorno de 475 y 2500 años, nos da los siguientes períodos en los diferentes pórticos:

Tabla 2.30: Comparación entre *OpenSees* y Otros *softwares*

	Análisis dinámico inelástico 475 años- Sin aislador	Análisis dinámico inelástico 2500 años- Con aislador
	Período (seg)	Período (seg)
Pórtico 1	0.5666	1.8989
Pórtico 2	0.6229	2.366
Pórtico 3	0.7776	1.8
Pórtico 4	0.6309	2.25

Fuente: Autor

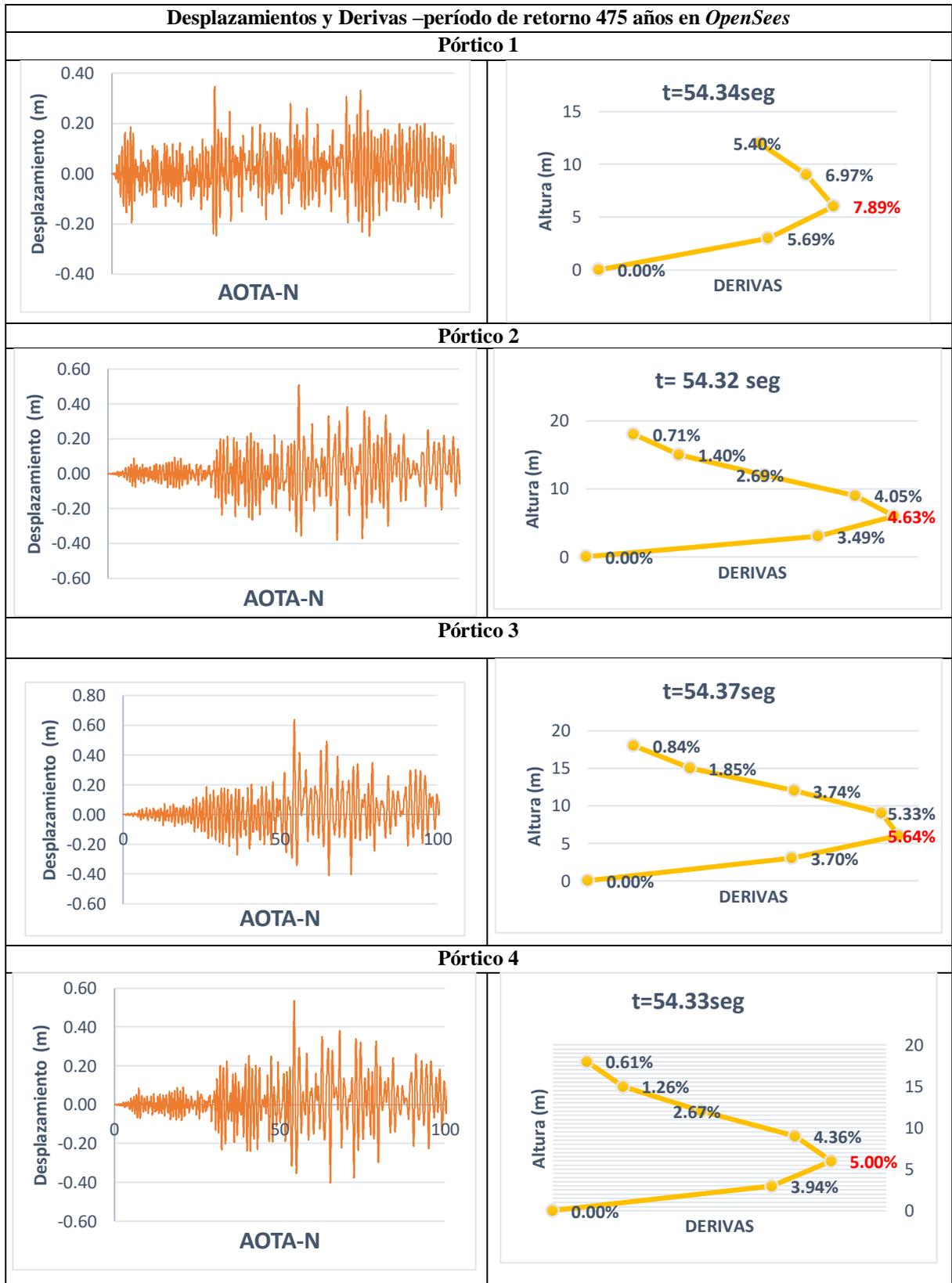
Y de la misma manera como en el análisis **dinámico lineal** se procederá a realizar un análisis Tiempo – Historia para determinar los desplazamientos y derivas de cada pórtico. Para esto necesitamos los siguientes requerimientos:

- Factores FCS de cada pórtico calculados anteriormente para “Análisis Dinámico No Lineal para 475 y 2500 años”.
- Archivos de texto de los registros de acelerogramas de cada sismo.
- *Script de ModelGeometry.*
- *Script de SectionAndMaterial.*
- *Script de GravityLoad.*

Los resultados que se presentan a continuación reflejan un análisis Tiempo –Historia de los desplazamientos y derivas correspondientes a cada piso de los pórticos seleccionados, sometidos a cargas sísmicas, sabiendo que la norma dice que las derivas máximas pueden alcanzar un valor de tan solo 2% (NEC -Peligro sísmico, 2014).



Tabla 2.31: Desplazamientos y Derivas –período de retorno 475 años en *OpenSees*



Fuente: Autor



Tabla 2.32: Desplazamiento y derivas para un período de retorno de 475 años

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 1										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (seg)	54.34	t (seg)	30	t (seg)	43.04	t (seg)	55.32	t (seg)	54.11
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+12.00	0.7782	5.3968%	0.345512	2.5822%	0.256102	1.9440%	0.373637	2.8566%	0.206206	1.4733%
N+9.00	0.6163	6.9671%	0.268045	3.3493%	0.197783	2.5095%	0.28794	3.5567%	0.162007	1.9683%
N+6.00	0.4073	7.8917%	0.167566	3.5070%	0.122499	2.6000%	0.181238	3.7362%	0.102958	2.1315%
N+3.00	0.1706	5.6851%	0.0623558	2.0785%	0.0444983	1.4833%	0.0691514	2.3050%	0.039014	1.3005%
N+0.00	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 2										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	54.32	t (ser)	72.55	t (ser)	43.05	t (ser)	32.8	t (ser)	43.71
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.509266	0.7138%	0.277401	0.6195%	0.276196	0.6187%	0.321809	0.5494%	0.247894	0.5641%
N+15.00	0.487853	1.3986%	0.258817	1.1258%	0.257634	1.1250%	0.305326	1.0182%	0.230972	0.9211%
N+12.00	0.4459	2.6901%	0.225043	1.7361%	0.223883	1.7621%	0.274779	1.7769%	0.203338	1.4073%
N+9.00	0.3652	4.0496%	0.172959	2.1749%	0.171019	2.2086%	0.221472	2.5852%	0.16112	1.9184%
N+6.00	0.2437	4.6342%	0.107713	2.2027%	0.104762	2.1700%	0.143915	2.8449%	0.103569	2.0760%
N+3.00	0.1047	3.4893%	0.0416308	1.3877%	0.0396607	1.3220%	0.0585674	1.9522%	0.0412885	1.3763%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

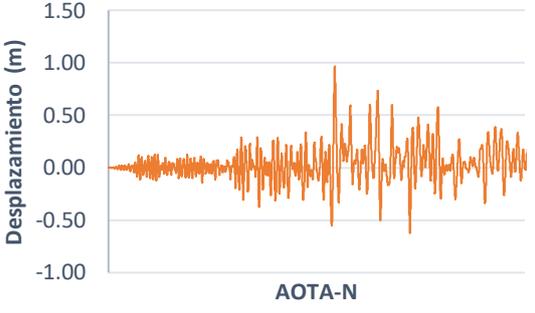
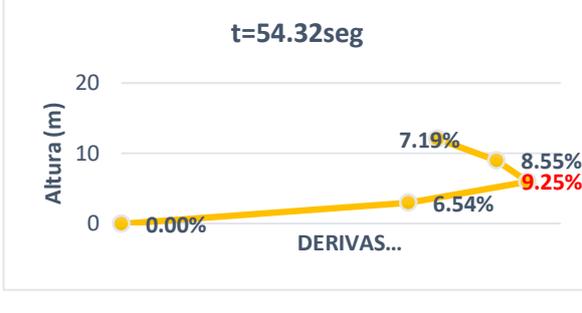
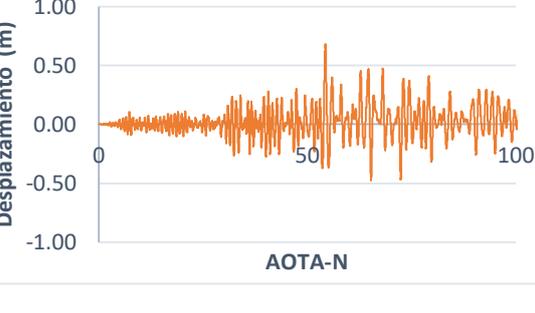
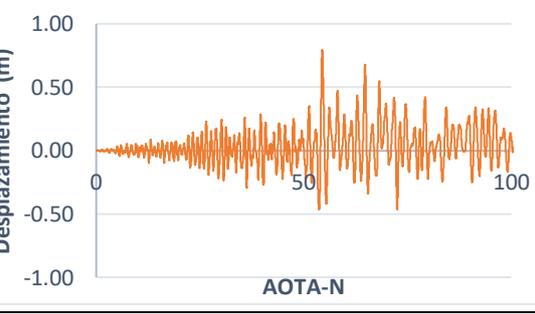
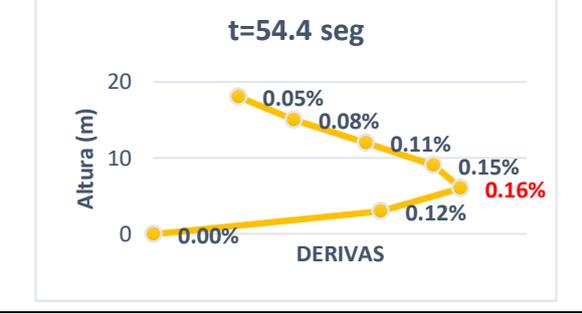
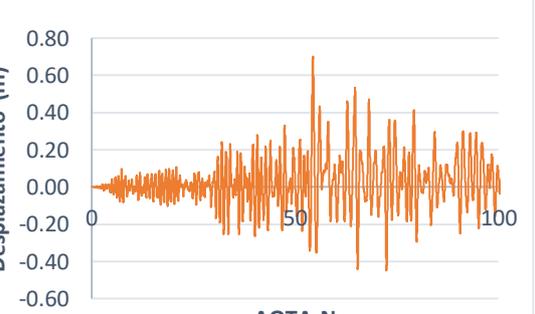


Desplazamientos y derivas										
Pórtico 3										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	54.37	t (ser)	68.53	t (ser)	43.09	t (ser)	68.04	t (ser)	55.9
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.633114	0.8368%	0.326846	0.8169%	0.220435	0.5216%	0.30178	0.5445%	0.350727	0.7187%
N+15.00	0.608011	1.8530%	0.30234	1.4903%	0.204786	1.0154%	0.285444	1.0064%	0.329165	1.2994%
N+12.00	0.5524	3.7420%	0.257631	2.2550%	0.174324	1.5576%	0.255252	1.7203%	0.290183	2.0848%
N+9.00	0.4402	5.3295%	0.18998	2.6686%	0.127595	1.8172%	0.203644	2.4449%	0.227639	2.7867%
N+6.00	0.2803	5.6390%	0.109922	2.4306%	0.073079	1.6230%	0.130298	2.6548%	0.144038	2.9362%
N+3.00	0.1111	3.7035%	0.0370033	1.2334%	0.0243882	0.8129%	0.0506547	1.6885%	0.0559512	1.8650%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 4										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	54.33	t (ser)	72.57	t (ser)	43.06	t (ser)	68	t (ser)	43.74
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.535199	0.0061347	0.276014	0.0055667	0.272158	0.0050737	0.326953	0.006425	0.265592	0.00622
N+15.00	0.516795	0.0126337	0.259314	0.0102077	0.256937	0.0093547	0.307678	0.011477	0.246932	0.0105623
N+12.00	0.4789	2.6655%	0.228691	1.6210%	0.228873	1.5522%	0.273247	1.8490%	0.215245	1.5864%
N+9.00	0.3989	4.3553%	0.180062	2.1518%	0.182306	2.1611%	0.217777	2.5397%	0.167653	2.0401%
N+6.00	0.2683	5.0023%	0.115508	2.2932%	0.117472	2.3126%	0.141587	2.7576%	0.10645	2.1317%
N+3.00	0.1182	3.9400%	0.0467115	1.5571%	0.0480932	1.6031%	0.0588604	1.9620%	0.0424985	1.4166%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%



Tabla 2.33: Desplazamiento y derivas para un período de retorno de 2500 años

Desplazamientos y Derivas –período de retorno 2500 años en <i>OpenSees</i>	
Pórtico 1	
	
Pórtico 2	
	
Pórtico 3	
	
Pórtico 4	
	

Fuente: Autor



Tabla 2.34: Desplazamiento y derivas para un período de retorno de 2500 años

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 1										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (seg)	54.36	t (seg)	30.01	t (seg)	43.04	t (seg)	67.39	t (seg)	54.14
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+12.00	0.9459	7.1925%	0.382342	2.9019%	0.290484	2.3584%	0.329665	2.1195%	0.229926	1.6610%
N+9.00	0.7302	8.5458%	0.295284	3.6990%	0.219732	2.8775%	0.26608	2.9750%	0.180097	2.2002%
N+6.00	0.4738	9.2517%	0.184314	3.8477%	0.133408	2.8401%	0.176831	3.4787%	0.114092	2.3627%
N+3.00	0.1962	6.5412%	0.068882	2.2961%	0.0482058	1.6069%	0.0724697	2.4157%	0.0432106	1.4404%
N+0.00	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 2										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	54.35	t (ser)	72.58	t (ser)	43.04	t (ser)	68.04	t (ser)	43.74
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.67719	0.8196%	0.314197	0.6554%	0.322742	0.6491%	0.370488	0.7630%	0.293936	0.7281%
N+15.00	0.652603	1.6719%	0.294534	1.1913%	0.30327	1.1410%	0.347599	1.4145%	0.272094	1.2073%
N+12.00	0.6024	3.7092%	0.258795	1.8930%	0.269041	1.8391%	0.305165	2.2873%	0.235874	1.7827%
N+9.00	0.4912	5.6140%	0.202005	2.4625%	0.213867	2.5237%	0.236546	2.9112%	0.182392	2.2506%
N+6.00	0.3227	6.1602%	0.12813	2.5734%	0.138156	2.7278%	0.149211	2.9785%	0.114873	2.3204%
N+3.00	0.1379	4.5981%	0.0509291	1.6976%	0.0563231	1.8774%	0.0598563	1.9952%	0.0452618	1.5087%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%



Desplazamientos y derivas										
Pórtico 3										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	54.4	t (ser)	72.67	t (ser)	43.1	t (ser)	68.09	t (ser)	54.44
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.768299	1.0696%	0.299441	0.6314%	0.261068	0.5277%	0.350495	0.6955%	0.373968	0.6073%
N+15.00	0.73621	2.4082%	0.280499	1.1650%	0.245237	1.0565%	0.329631	1.2687%	0.35575	1.1876%
N+12.00	0.6640	4.7150%	0.245548	1.8602%	0.213541	1.7542%	0.291569	2.0859%	0.320121	2.0621%
N+9.00	0.5225	6.4353%	0.189741	2.4199%	0.160914	2.2111%	0.228991	2.8374%	0.258259	2.9720%
N+6.00	0.3295	6.6671%	0.117145	2.4617%	0.0945812	2.0794%	0.143868	2.9661%	0.169098	3.3486%
N+3.00	0.1294	4.3146%	0.043295	1.4432%	0.032199	1.0733%	0.0548849	1.8295%	0.0686408	2.2880%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 4										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	54.36	t (ser)	72.61	t (ser)	43.08	t (ser)	68.05	t (ser)	86.35
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.695302	0.006616	0.29892	0.0058883	0.306248	0.0045493	0.342303	0.0064177	0.328326	0.0060643
N+15.00	0.675454	0.0132383	0.281255	0.0108047	0.2926	0.0092633	0.32305	0.011999	0.310133	0.0114173
N+12.00	0.6357	3.0617%	0.248841	1.7322%	0.26481	1.7240%	0.287053	1.9943%	0.275881	1.8822%
N+9.00	0.5439	5.7290%	0.196876	2.3194%	0.213089	2.5395%	0.227223	2.6417%	0.219414	2.5539%
N+6.00	0.3720	6.7636%	0.127295	2.5017%	0.136903	2.7154%	0.147972	2.8521%	0.142797	2.7786%
N+3.00	0.1691	5.6370%	0.0522455	1.7415%	0.0554416	1.8481%	0.0624089	2.0803%	0.0594378	1.9813%
N+0.00	0.0000	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

CAPÍTULO III

3. MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Con los datos obtenidos en el Capítulo II se observa que los pórticos analizados, una vez aplicadas las solicitaciones sísmicas, presentan valores de derivas superiores al establecido por la norma que es igual al 2% de la altura de piso (Pelígro Sísmico - Diseño Sismo Resistente, 2014), por lo tanto, se implementará medidas de mitigación que permitan a la estructura trabajar de manera ininterrumpida, más aun siendo estructuras esenciales, en caso de presentarse sobrecargas provocadas por eventos naturales.

Es por esto, que en el presente capítulo se conocerá más sobre los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, incluyendo los materiales que lo conforman y la variabilidad que estos pueden ocasionar, los mismos que son instalados en la base de las columnas logrando desacoplar la estructura del suelo que lo sostiene, para que cuando un evento sísmico ocurra, la estructura no sufra daños importantes (Guamán, 2017).

3.1 Fundamento del aislamiento sísmico

Los aisladores sísmicos cumplen la función de desacoplar la estructura del suelo. Esto implica que la estructura encima de los aisladores se comporta de manera muy parecida a un sólido rígido. Lo que se consigue es aumentado el período natural de la estructura a un período más largo. Se obtendrá la disminución de los esfuerzos y desplazamientos en la estructura hasta un 75%, que son las principales causas del daño estructural y no estructural (FEMA 451, 2003).

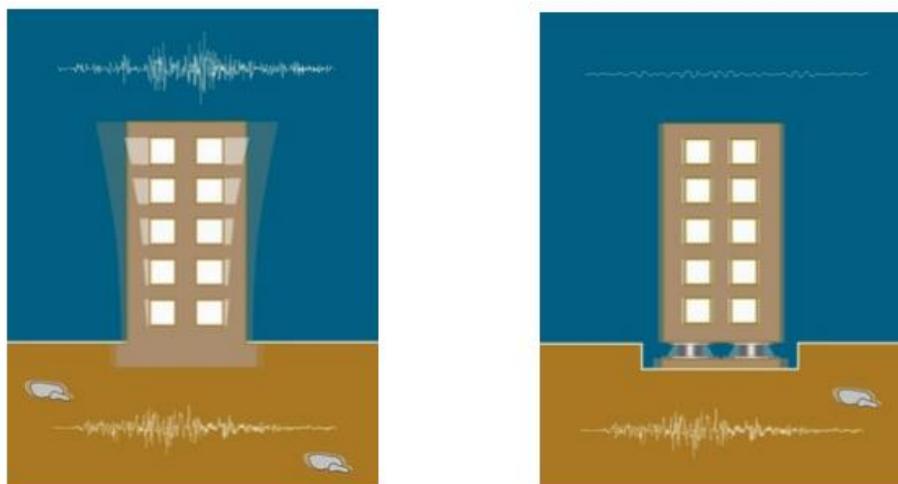


Figura 36.1: Comportamiento sísmico de una estructura aislada y convencional

Fuente: Google imágenes

3.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo están conformados por varias láminas de caucho intercaladas con placas de acero, y poseen un núcleo de plomo que aumenta su capacidad de amortiguamiento. Siendo este amortiguamiento mayor al 20%. Estos dispositivos son fabricados a medida para cada proyecto, de acuerdo a la rigidez horizontal, rigidez vertical, desplazamiento, capacidad de carga y capacidad de amortiguamiento requerida (Aguiar, Vergara, Guaygua, & Monge, 2014).

El elastómero es un vulcanizado, es decir, un polímero elástico o goma, compuesto normalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno o sílice cuya característica principal es su alta elasticidad y flexibilidad frente a cargas antes de fracturarse. Una de las razones por las cuales el plomo se utiliza como núcleo en este tipo de aisladores es la fluencia del mismo bajo esfuerzos de corte con deformación relativamente bajas, comportándose como un sólido elástico-plástico. (Choun, Park, & Choi, 2014).

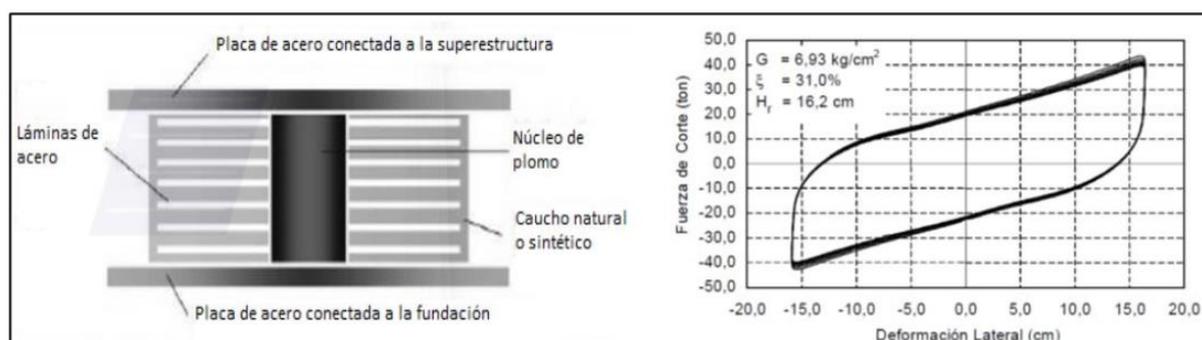


Figura 3.2: Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRM)

Fuente: (FEMA 451, 2003)

3.3 Diseño de los aisladores para los diferentes pórticos

El procedimiento de diseño de un aislador de núcleo de plomo según ASCE 7-05 comprende una serie de etapas encargadas de definir el correcto dimensionamiento y funcionamiento.

La primera etapa se encarga del dimensionamiento del sistema de aislación, partiendo de información característica del sitio, estructura a aislar y de las propiedades



mecánicas de los materiales que componen el sistema de aislación escogido. El dimensionamiento de los aisladores se realiza con el desplazamiento de diseño.

La segunda etapa evalúa el comportamiento de la estructura bajo condiciones sísmicas, comprobando que el desplazamiento de este caso sea menor que la capacidad del sistema de aislación.

La tercera etapa consiste en realizar todas las verificaciones pertinentes para el correcto funcionamiento y seguridad del aislador.

Tabla 3.1: Datos para el diseño del aislador

DATOS			
Periodo Objetivo	T	2	seg
Amortiguamiento Objetivo	β	20	%
Coefficiente de Amortiguamiento	Bd	1.5	
Parámetro de espectro de aceleración	SD1	0.79	seg
Peso pórtico	W	500832	Kg

Fuente: Autor

Tabla 3.2: Dimensionamiento del sistema de aislación

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AISLACIÓN					
Desplazamiento mínimo de diseño	Dd	0.261743014	m	$D_d = \frac{g * S_{D1} * T_o}{4 * \pi^2 B_D}$	
		261.7430137	m.m		
Rigidez efectiva	Keff	4943013.711	N/m	$K_{eff} = W * \left(\frac{2\pi}{T_o}\right)^2$	
Energía disipación de	WD	425551.2556	J	$W_D = 2 * \pi * K_{eff} * \beta_o * D_d^2$	
Fuerza Característica	Qo	406459.0394	N	$Q_o = \frac{W_D}{4D_d}$	
Rigidez Post-Fluencia	K2	3390120.155	N/m	$k_2 = k_{eff} - \frac{Q}{D_d}$	



Rigidez Inicial	K1	33901201.55	N/m	$k_1 = 10 * k_2$
-----------------	-----------	-------------	-----	------------------

Desplazamiento de fluencia	Dy	0.013321686	m	$D_y = \frac{Q}{k_1 - k_2}$
----------------------------	-----------	-------------	---	-----------------------------

Fuerza característica	Q	428255.556	N	$Q_o = \frac{W_D}{4 * (D_d - D_y)}$
-----------------------	----------	------------	---	-------------------------------------

ITERACION

Inter.	0.00	K2	3299104.276
Q	430281.81	K1	32991042.76
		Dy	0.014491536

Fuente: Autor

Tabla 3.3: Dimensionamiento aislador por unidad

DIMENSIONAMIENTO AISLADOR x UNIDAD				
DATOS				
Esf. Fluencia (plomo)	fy	10.52	Mpa	
Num. de aisladores	n_{lrb}	5		
Altura caucho	tr	0.3	m	
Mod. Corte (caucho)	Ge	0.4	Mpa	
Área de plomo	Ap	0.040901313	m2	$A_p = \frac{Q}{F_y}$
		409.0131274	cm2	
Diámetro de plomo	Dp	0.102056032	m	$D_p = \sqrt{\frac{4 * A_p}{n_{LRB} * \pi}}$
		102.0560325	mm	
Área de caucho	Ae	2.542590116	m2	$A_e = \frac{t_r}{G_e} K_2$
		25425.90116	cm2	
Diámetro caucho	De	0.806107145	m	$D_e = \sqrt{\frac{4(A_e + 0.99 * A_p)}{n_{LRB} * \pi}}$
		806.1071449	mm	

Fuente: Autor



El proceso va a variar según las características de las estructuras, obtenido así el aislador elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) que cumpla todas las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento.

Después de realizar todos los cálculos respectivos se elige un aislador del catálogo que cumpla todas las condiciones necesarias.

TAMAÑO DEL DISPOSITIVO				DIMENSIONES DE LA PLACA DE SOPORTE					
Díametro Aislador, D, (mm)	Altura Aislador, H (mm)	Número de capas de caucho, N	Díametro del plomo, D _p (mm)	L (mm)	t (mm)	Cantidad Orificios	Orificio Ø (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

Díametro Aislador, D, (mm)	PROPIEDADES DE DISEÑO			Desplazamiento Máximo, D _{max} (mm)	Capacidad Carga Axial P _{max} (kN)
	Rigidez Producida, K _d (kN/mm)	Resistencia Características Q _d (kN)	Rigidez a la compresión, K _v (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000

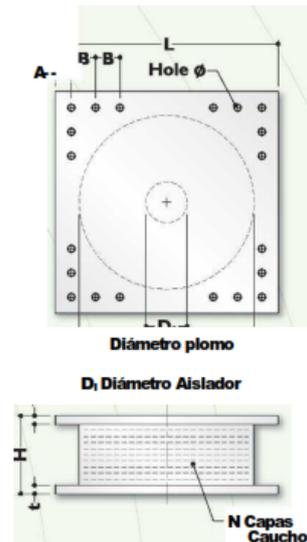


Figura 3.3: Aislamiento sísmico para edificaciones y puentes/ catálogo

Fuente (Dynamic Isolation Systems)

**Tabla 3.4:** Aisladores seleccionados para las diferentes estructuras

	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
Desp min(cm)	26.17	19.65	26.17	26.17
h (cm)	38	20	38	35
Dp (cm)	6	5.5	5.5	6
De (cm)	52	45.5	52	52

Fuente: Autor

Se realiza la modelación en el software de código libre *OpenSees*, utilizando la modelación dinámica no lineal descrita en secciones anteriores, incluyendo el efecto del aislador.

3.4 Análisis dinámico no lineal con aislación sísmica

Se calcularon nuevamente los valores de vibración natural de cada estructura, para un periodo de retorno de 2500 años y los sismos seleccionados fueran escalados con este nuevo valor.

Tabla 3.5: Períodos de cada pórtico con y sin aislación sísmica

	Análisis modal sin aislador	Análisis modal con aislador
Pórtico 1	0.5666	1.8989
Pórtico 2	0.6229	2.366
Pórtico 3	0.7776	1.8
Pórtico 4	0.6309	2.51

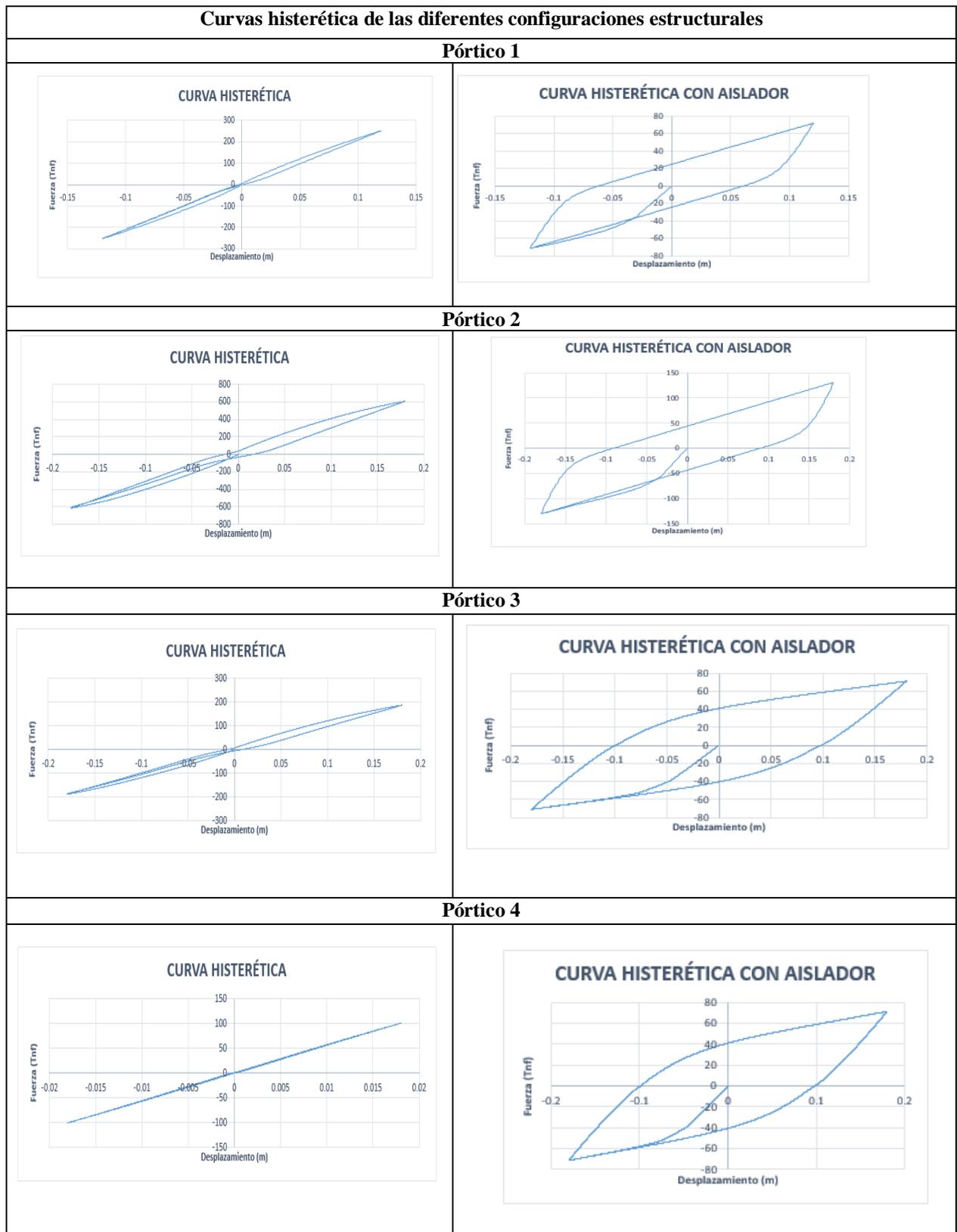
Fuente: Autor

3.5 Curvas histerética general de los aisladores

Una vez dimensionado los aisladores para cada pórtico, con la ayuda del material *unialMaterial KikichiAikenLRB*, analizado en el Capítulo II, para obtener finalmente el área de disipación de cada estructura.



Tabla 10.6: Curvas histerética con y sin aisladores

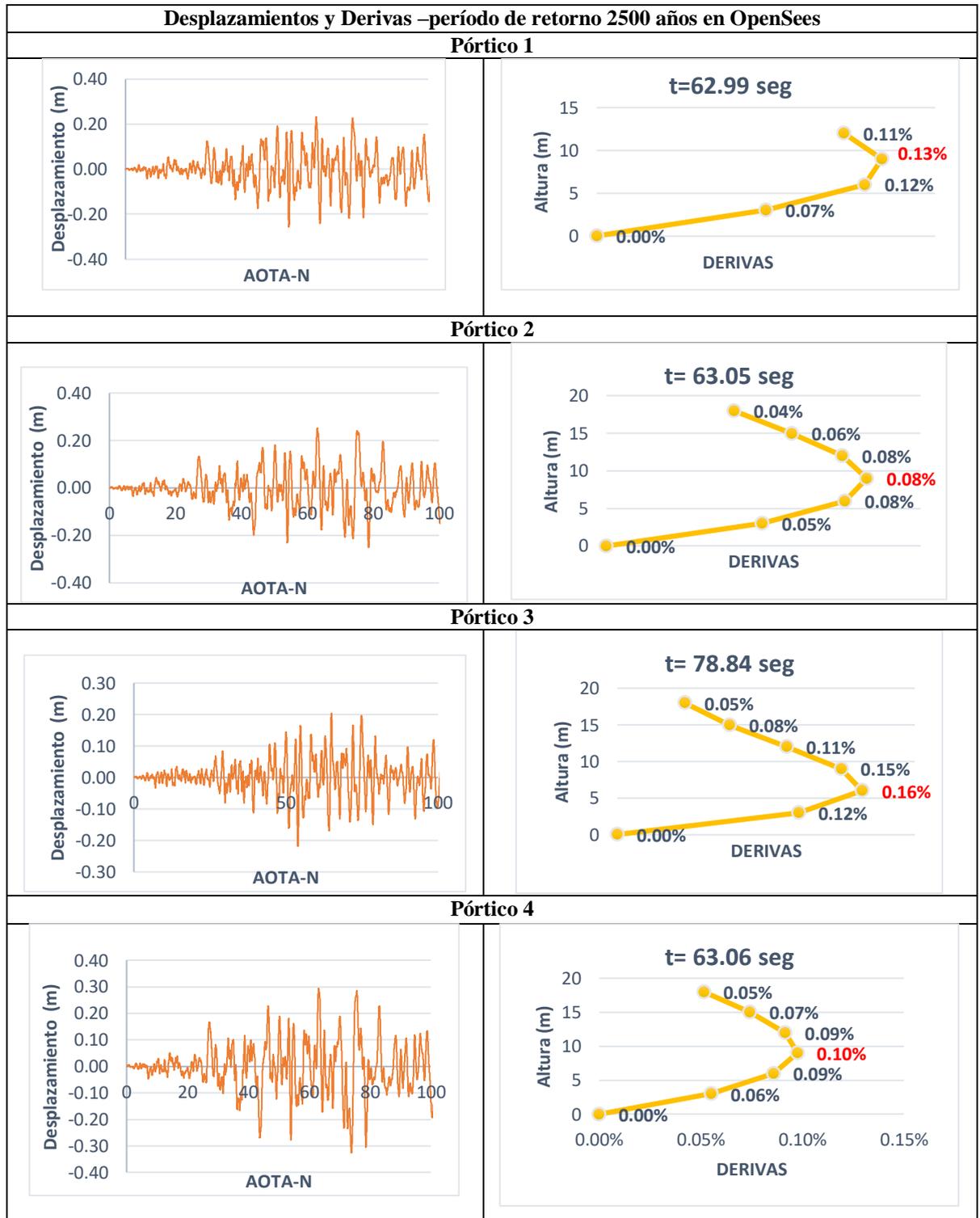


Fuente: Autor



3.6 Cálculo de derivas considerado aislamiento sísmico

Tabla 3.7: Desplazamientos y Derivas –período de retorno 2500 años en *OpenSees*



Fuente: Autor



Tabla 3.8: Desplazamientos y Derivas –período de retorno 2500 años con aislador en *OpenSees*

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 1										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (seg)	63	t (seg)	52.76	t (seg)	49.87	t (seg)	46.89	t (seg)	86.92
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+12.00	0.2313	0.1049%	0.71267	0.1663%	0.751346	0.1720%	0.391026	0.1111%	0.579292	0.1597%
N+9.00	0.2282	0.1216%	0.707682	0.2051%	0.746187	0.2121%	0.387693	0.1335%	0.5745	0.1926%
N+6.00	0.2246	0.1153%	0.701529	0.2120%	0.739824	0.2186%	0.383689	0.1340%	0.568721	0.1933%
N+3.00	0.2211	0.0735%	0.695169	0.1379%	0.733266	0.1414%	0.379668	0.0892%	0.562921	0.1234%
N+0.00	0.21889	0%	0.691032	0%	0.729024	0%	0.376991	0%	0.55922	0%

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 2										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	63.05	t (ser)	52.85	t (ser)	50.94	t (ser)	46.93	t (ser)	87.57
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.250684	0.0406%	0.0394338	0.0223%	-0.108617	0.0029%	0.125172	0.0161%	0.142103	0.0322%
N+15.00	0.249467	0.0590%	0.0387642	0.0309%	-0.108704	0.0014%	0.124688	0.0246%	0.141137	0.0447%
N+12.00	0.2477	0.0750%	0.0378366	0.0367%	-0.108745	-0.0026%	0.12395	0.0334%	0.139795	0.0537%
N+9.00	0.2454	0.0829%	0.0367346	0.0374%	-0.108666	-0.0064%	0.122949	0.0388%	0.138184	0.0561%
N+6.00	0.2430	0.0759%	0.0356121	0.0311%	-0.108473	-0.0071%	0.121784	0.0364%	0.136501	0.0485%
N+3.00	0.2407	0.0496%	0.0346778	0.0214%	-0.108259	0.0029%	0.120692	0.0263%	0.135046	0.0312%
N+0.00	0.2392	0%	0.0340354	0%	-0.108345	0%	0.119903	0%	0.134111	0%



Desplazamientos y derivas										
Pórtico 3										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	78.84	t (ser)	73	t (ser)	88.01	t (ser)	73.05	t (ser)	79.1
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.196405	0.0454%	-0.238742	-0.0471%	0.636611	0.1940%	0.540239	0.1244%	0.388693	0.0952%
N+15.00	0.195042	0.0753%	-0.237328	-0.0721%	0.630792	0.3065%	0.536508	0.2023%	0.385838	0.1537%
N+12.00	0.1928	0.1138%	-0.235164	-0.0953%	0.621598	0.4092%	0.53044	0.2884%	0.381228	0.2179%
N+9.00	0.1894	0.1503%	-0.232305	-0.1067%	0.609323	0.4744%	0.521787	0.3590%	0.37469	0.2704%
N+6.00	0.1849	0.1646%	-0.229105	-0.0973%	0.595092	0.4663%	0.511016	0.3741%	0.366579	0.2821%
N+3.00	0.1799	0.1219%	-0.226185	-0.0728%	0.581103	0.3186%	0.499792	0.2657%	0.358115	0.2016%
N+0.00	0.1763	0%	-0.224	0%	0.571544	0%	0.491822	0%	0.352066	0%

Desplazamientos y derivas										
Pórtico 4										
NIVEL	AOTA-N		ATUL-Z		AGYE-N		PRAM-N		PRAM-E	
	t (ser)	63.06	t (ser)	52.23	t (ser)	60.99	t (ser)	47.69	t (ser)	87.65
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	0.293198	0.000515	0.748225	0.000476	-0.709608	-0.000122	-0.312031	-0.00022	0.764264	0.0006063
N+15.00	0.291653	0.000742	0.746797	0.000746	-0.709242	-0.000217	-0.311371	-0.000344	0.762445	0.0009267
N+12.00	0.2894	0.0916%	0.744559	0.1034%	-0.708591	-0.0356%	-0.31034	-0.0481%	0.759665	0.1235%
N+9.00	0.2867	0.0975%	0.741457	0.1252%	-0.707523	-0.0495%	-0.308897	-0.0589%	0.755961	0.1435%
N+6.00	0.2838	0.0858%	0.737702	0.1267%	-0.706039	-0.0545%	-0.307129	-0.0599%	0.751656	0.1399%
N+3.00	0.2812	0.0551%	0.7339	0.0908%	-0.704405	-0.0293%	-0.305333	-0.0278%	0.747459	0.0973%
N+0.00	0.2795	0%	0.731176	0%	-0.703527	0%	-0.304499	0%	0.744541	0%



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En la base de la investigación realizada por los Ingenieros Erick Cabrera y Mateo Torres, que consistía en modelar 120 estructuras porticadas variando su regularidad e irregularidad, tanto en planta como en altura con reducción de área por planta, la luz de las vigas y la altura de la estructura. Los modelos planteados y analizados en el rango lineal por los ingenieros anteriormente mencionados no es un análisis completo, ya que no refleja la realidad del comportamiento de las edificaciones ante un evento sísmico ocurrente, por la importancia que tienen estas edificaciones es recomendable realizar un análisis en el rango no lineal.

Se modelaron cuatro estructuras porticadas representativas de edificaciones esenciales que tienen variación tanto en su geometría estructural como en sus secciones, con el fin de verificar cuál es su comportamiento y vulnerabilidad estructural ante un evento sísmico.

Al comparar los resultados obtenidos en los diferentes análisis: modal, análisis tiempo – historia, *Pushover*, cortante basal se obtuvieron los siguientes resultados:

- En el análisis lineal 475 años con $R=8$, se obtuvieron derivas que apenas superan el límite del 2%, cumpliendo de buena manera con lo establecido en la NEC; la mayor deriva de piso en el sentido “X” en el piso cuarto, con un valor de 2.11% como constan en la tabla 2.36. Estos resultados nos permiten conocer que las diferentes configuraciones de las estructuras propuestas tienen la capacidad de soportar un evento sísmico extremos, reflejando vulnerabilidad, pero no colapso de la estructura y que luego del desastre, los usuarios tienen tiempo para evacuar.
- Al obtener las curvas de capacidad (*Pushover*), se puede determinar que la estructura brinda un margen de seguridad con respecto al cortante basal.
- Las derivas máximas obtenidas de cada edificación demuestran, que las diferentes configuraciones propuestas ante la presencia de un sismo similar o superior a los descritos en el análisis, las edificaciones se encontrarían con alta

posibilidad de colapso, ya que las derivas máximas están fuera del rango estipulado por la NEC.

- En base al análisis *pushover*, se puede determinar que las estructuras tienen una resistencia sobre el 70% del cortante basal (V), esto quiere decir que no cumplen con lo estipulado en la norma, el valor del cortante dinámico total en la base, obtenido por cualquier método de análisis dinámico, no debe ser $<$ al 80% del cortante basal.
- En el análisis *Pushover* cíclico, se puede determinar que las curvas histéreticas de las diferentes estructuras que dependen del material y del sistema estructural, no tienen la capacidad de disipar la suficiente energía sin dispositivos de aislamiento.
- El análisis no lineal en un período de retorno de 475 y 2500 años con $R=1$ como estipula la norma, las derivas máximas en cada piso obtenidas superan el 2% como está establecido en la NEC; presentado la mayor deriva en niveles de sentido “X” en los pisos cuatro y cinco, con valores entre 2.5% y 10% como consta en las tablas 2.40 – 2.43, reflejando que las estructuras son altamente vulnerables ante un evento sísmico de magnitudes considerables, sin embargo, en algunos casos las derivas están por debajo del valor 6%, indicando que los usuarios tendría tiempo para poder evacuar.
- Los resultados obtenidos después de haber implementado los aisladores elastoméricos LRB, demuestra que se logró incrementar significativamente el período fundamental de la estructura y de esta manera reducir las derivas máximas siendo estas menores al 2% que recomienda la NEC, estos dispositivos logran que la estructura se comporte como un solo elemento.
- El sistema LRB presenta mejores resultados en el comportamiento estructural, muy superior respecto a la versión convencional del edificio, exhibiendo altos niveles de seguridad y protección sísmica, tanto de la estructura como de los contenidos; además económicamente podría llegar a representar una opción competitiva.



RECOMENDACIONES

- Siendo una de las mayores exigencias de la NEC las solicitaciones sísmicas, es recomendable establecer un pre-dimensionamiento más exigente para que las secciones resultantes no sean deficientes, y la configuración estructural no presente variaciones tanto en planta como en altura.
- Uno de los factores más importantes en las estructuras es la seguridad, es recomendable que todos los parámetros y factores de seguridad se cumplan completamente, para luego evaluar la respuesta sísmica y la economía del proyecto.
- Para todas las estructuras esenciales, las mismas que deben permanecer operativas luego de un evento sísmico para atender emergencias, es necesario realizar un análisis no lineal en 3D por lo que se presenta una mayor realidad del comportamiento de estructura ante eventos sísmicos, ya que los movimientos están caracterizados por largos períodos y amplitudes.
- Se recomienda que para cualquier estructura que se aisle sísmicamente, debido a su importancia, se genere un espectro de respuesta de sitio y estudios de suelo para así garantizar la eficiencia del sistema de aislación y/o aplicación de la misma.
- Se debe implementar un sistema de protección sísmica en el diseño de las estructuras a futuro, ya que nuestro país se encuentra en una zona altamente sísmica.
- Se debería investigar e implementar diversas medidas de mitigación, no solo los aisladores elastoméricos y la rigidización de diferentes pórticos más desfavorables, sino otros dispositivos que ayuden a que la estructura se comporte como un todo presentado un correcto desempeño.

BIBLIOGRAFÍA

- IG EPN. (2016). *Sismo Mw=7.8 ; 16 de abril de 2016 QUITO : Instituto Geofísico- Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/portal/ultimo-sismo/informe-ultimo-sismo.html>
- ACI 318. (2011). *American Concrete Institute - Building Code Requirements for Structural Concrete ACI 318-11*. United States of America.
- ACI 440.2R-08. (2008). *American Concrete Institute - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. United States of America.
- Aguiar, R., Vergara, F., Guaygua, B., & Monge, J. (2014). Análisis sísmico de una estructura con aisladores FPS de primera y segunda generación y elastoméricos con núcleo de plomo. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 35-89.
- Andrade, P., & Robalino, M. (2017). Reducción de la Vulnerabilidad en Estructuras esenciales de Hormigón Armado: Hospitales, Situados en Zonas de Alto Peligro Sísmico en el Ecuador. *Revista Politécnica*.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*. Mexico: Pearson.
- Choun, Y. S., Park, J., & Choi, I.-k. (2014). EFFECTS OF MECHANICAL PROPERTY VARIABILITY IN. *Nuclear Engineering and Technology*, 605-618.
- Dynamic Isolation Systems . (s.f.). Aislamiento Sísmico para edificaciones y Puentes. *Dynamic Isolation Systems*.
- F. 3. (2000). *Federal Emergency Management Agency Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. United States of America.
- FEMA 356. (2000). *Federal Emergency Management Agency Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. United States of America.
- FEMA 451. (2003). *FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, Recommend Provisions: Design Examples*. United States of America.
- Goel, R., & Chopra, A. (1998). Period formulas for concrete. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 426-433.
- Gonzales, C., & Malca, C. (2015). *Análisis de la Resouesta sísmica de edificaciones aorticadas de concreto armado con irregularidad geometría vertical* . Lima-Peru.
- Guamán, A. (2017). *Análisis Dinámico no lineal del "Hospital Aida León de Rodríguez Lara" (Girón), medidas de mitigación y refuerzo para disminuir su vulnerabilidad estructural*. Cuenca.
- Kikuchi, M., Aiken, I., & Kasalanati, A. (2012). *Simulation analysis for the ultimate behavior of full-scale lead-rubber seismic isolation bearings*. Lisboa.



- Lasagni, F. (2015). *Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales*. Obtenido de <http://www.catec.aero/materiales-y-procesos/lisis-modal.htm>
- Martínez, P., & Reinoso, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Scielo*, 1-26.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). *OpenSees Command Language Manual*.
- McCormac, J., & Brown, R. (2015). *Design of Reinforced Concrete*. John Wiley & Sons.
- Mohammad, T., & Hesamoldin, Y. (2015). Seismic Analysis (Non-linear Static Analysis (Pushover)). *American Journal of Civil Engineering*, 129-139.
- Moya Yépez, F. (2001). Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito y futuros proyectos de mitigación. *Centro regional de información sobre desastres para América Latina y el Caribe*, 16-24.
- NEC. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Ecuador.
- NEC -Peligro sísmico. (2014). *Normativa Ecuatoriana de la Construcción- Peligro Sísmico*. Ecuador.
- Nieto, M., Rivero, P., & Lobo, W. (2009). Análisis dinámico lineal de una edificación histórica en San Cristobal, estado Tachira. *Ciencia e Ingeniería*, 237-246.
- Nikam, N. M., & Kalurkar, L. G. (2016). Pushover Analysis of Building with Shear Wall. *International Journal of Engineering Science and Computing*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2000). *Fundamentos de la Mitigación de Desastres en Establecimientos de la Salud*.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. (17 de Febrero de 2014). *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. Obtenido de <http://peer.berkeley.edu/>
- Zayas, V. (2017). Estandar de Aislamiento Sísmico para Funcionalidad Continua. *COINSESD*, 1-35.