



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 $Z= 0,40g$**

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

Autor:
MANUEL ENRIQUE VALDIVIEZO LAMBERT

Director:
JOSÉ FERNANDO VÁZQUEZ CALERO

CUENCA - ECUADOR
2018



DEDICATORIA

A:

Dios, por haberme regalado la vida y brindado la sabiduría necesaria para poder llegar hasta aquí y cumplir con mis objetivos, estar conmigo en cada paso que doy, guiándome y fortaleciendo mi corazón.

Mis padres Armando y Bella y mis hermanos Carlos y Javier, por haber creído en mí, quererme mucho, siempre buscar la manera de salir adelante a pesar de todo, pues para mí, ellos son los verdaderos ingenieros de la familia, son mi inspiración y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, gracias por darme una carrera para mi futuro.

Todos aquellos familiares y amigos que no mencioné al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.



AGRADECIMIENTO

Agradecimiento especial a la Universidad del Azuay, que nos abre las puertas a un mundo infinito de conocimientos y ahora nos envía al mundo exterior con las herramientas suficientes para demostrar la calidad de educación y formación humana que imparte nuestra querida institución.

A mi director de tesis Ing. José Vázquez Calero, M.Sc., por su dedicación e interés para sacar adelante el presente proyecto, brindándonos su tiempo y experiencia. Para nosotros ha sido un placer y una suerte el haber conocido a una gran persona dentro y fuera de las aulas de clase.

Al Ing. Francisco Flores Solano, Ph.D., un gran profesional que estuvo siempre dispuesto a ayudar, quien compartió con nosotros sus conocimientos y su tiempo generosamente, influyó enormemente en este proyecto.

Karla A., quien siempre con sus palabras de aliento me impulsó a seguir luchando, aún cuando las cosas se tornaron difíciles en muchos momentos.

A mis compañeros de tesis Ximena Martínez y Nicolás Riquetti, con quienes hubo muchos días y noches interminables de ardua investigación, pero siempre se supo salir airoso de cada dificultad.

Y a cada una de las personas que pasaron por mi camino universitario, pues cada una de ellas siempre dejó una importante enseñanza de vida y así permitirme ser la persona que soy en la actualidad.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

<i>DEDICATORIA</i>	<i>ii</i>
<i>AGRADECIMIENTO</i>	<i>iii</i>
<i>ÍNDICE DE CONTENIDOS</i>	<i>iv</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	<i>vii</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	<i>ix</i>
<i>ÍNDICE DE ANEXOS</i>	<i>xi</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>xii</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xiii</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
<i>GENERALIDADES</i>	<i>2</i>
ANTECEDENTES.....	<i>2</i>
OBJETIVOS.....	<i>4</i>
OBJETIVO GENERAL	<i>4</i>
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	<i>4</i>
METODOLOGÍA	<i>4</i>
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO	<i>5</i>
DEFINICIONES	<i>6</i>
<i>CAPÍTULO 1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN</i>	<i>10</i>
1.1. MODELOS CON MEJOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO... 11	
1.2. MODELOS CON PEOR COMPORTAMIENTO -DERIVAS DE PISO	<i>13</i>
<i>CAPÍTULO 2. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA</i>	<i>15</i>
2.1. CARGAS GRAVITACIONALES	<i>16</i>
2.1.1. CARGAS VIVAS DE USO	<i>16</i>
2.1.2. CARGAS MUERTAS Y PERMANENTES.....	<i>16</i>
2.2. MODELACIÓN EN OPENSEES	<i>16</i>
2.3. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	<i>17</i>
2.3.1. CREACIÓN DEL MODELO.....	<i>17</i>



2.4. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	17
2.4.1. CONCRETO	17
2.4.2. CONCRETO CONFINADO	17
2.4.3. ACERO DE REFUERZO	18
2.6. SECCIÓN EN FIBRAS	18
2.7. BASES DEL DISEÑO	18
2.8. ESPECTRO DE DISEÑO	23
2.8.1. PERÍODO DE RETORNO 475 AÑOS	25
2.8.2. PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS	25
2.9. ESCALAMIENTO DE SISMOS	26
2.10. ANÁLISIS MODAL	29
2.11. ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL	29
2.11.1. OPENSEES	29
2.11.2. OTRO SOFTWARE	31
2.12. COMPARACIÓN ENTRE OPENSEES Y OTROS SOFTWARES	31
2.12.1. PERÍODO FUNDAMENTAL	31
2.12.2. DESPLAZAMIENTOS Y DERIVAS	32
2.13. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL	34
2.14. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)	40
2.14.1. EFECTOS P-DELTA	40
2.14.2. CORTANTE BASAL DE DISEÑO	41
2.15. ANÁLISIS PUSHOVER CÍCLICO	45
2.16. VIBRACIÓN LIBRE	47
CAPÍTULO 3. MEDIDAS DE MITIGACIÓN	50
3.1. AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO (LRB) ..	50
3.1.1. DIMENSIONAMIENTO DE AISLADORES	50
3.2. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL CON AISLACIÓN DE BASE	55



3.3. ANÁLISIS PUSHOVER CÍCLICO CON AISLACIÓN DE BASE	60
<i>CONCLUSIONES</i>	62
<i>RECOMENDACIONES</i>	64
<i>REFERENCIAS</i>	65



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipo de uso, destino e importancia.....	7
Figura 1-1 Geometría Pórtico 1.	11
Figura 1-2 Dimensiones Viga Pórtico 1.....	11
Figura 1-3 Dimensiones Columna Pórtico 1.....	11
Figura 1-4 Geometría Pórtico 2	12
Figura 1-5 Dimensiones Viga Pórtico 2.....	12
Figura 1-6 Dimensiones Columna Pórtico 2.....	12
Figura 1-7 Geometría Pórtico 3	13
Figura 1-8 Dimensiones Viga Pórtico 3.....	13
Figura 1-9 Dimensiones Columna Pórtico 3.....	13
Figura 1-10 Geometría Pórtico 4.	14
Figura 1-11 Dimensiones Viga Pórtico 4.....	14
Figura 1-12 Dimensiones Columna Pórtico 4.....	14
Figura 2-1 Curvas de peligro sísmico, Guayaquil.....	19
Figura 2-2 Determinación de los factores Z.....	20
Figura 2-3 Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.	20
Figura 2-4 Nivel de desempeño estructural para estructuras esenciales y de uso especial....	22
Figura 2-5 Tipos de suelo y factores de sitio Fa.	23
Figura 2-6 Tipos de suelo y factores de sitio Fd.....	24
Figura 2-7 Tipos de suelo y factores de sitio Fs.	24
Figura 2-8 Espectro de diseño período de retorno 475 años - elástico e inelástico.	25
Figura 2-9 Espectro de diseño - período de retorno 2500 años - inelástico.....	25
Figura 2-10 Escalamiento de sismos para Pórtico 1 - Análisis Dinámico Lineal.....	26
Figura 2-11 Tiempo-historia y comparación de desplazamientos y derivas entre OpenSees y Otro Software en t=8.80seg - pórtico 1 - sismo APED-E. Análisis Dinámico Lineal (475 años)	33
Figura 2-12 Análisis Pushover- desplazamiento máximo.....	40
Figura 2-13 Curva de capacidad considerando efectos P-Delta y lineal.....	41
Figura 2-14 Curva histerética Pórtico 1.....	46
Figura 2-15 Curva histerética Pórtico 2.....	46
Figura 2-16 Curva histerética Pórtico 3.....	46
Figura 2-17 Curva histerética Pórtico 4.....	47
Figura 2-18 Cálculo de amortiguamiento con vibración libre Pórtico 1.....	48
Figura 2-19 Cálculo de amortiguamiento con vibración libre Pórtico 2.....	48



Figura 2-20 Cálculo de amortiguamiento con vibración libre Pórtico 3.....	49
Figura 2-21 Cálculo de amortiguamiento con vibración libre Pórtico 4.....	49
Figura 3-1 Catálogo de aisladores - empresa Dynamic Isolation Systems (DIS).....	53
Figura 3-2 Propiedades de diseño de los aisladores DIS	54
Figura 3-3 Curva histerética con aislador Pórtico 1.....	60
Figura 3-4 Curva histerética con aislador Pórtico 2.....	60
Figura 3-5 Curva histerética con aislador Pórtico 3.....	60
Figura 3-6 Curva histerética con aislador Pórtico 4.....	61



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Propiedades del Concreto.....	18
Tabla 2-2 Propiedades del Acero de refuerzo.....	18
Tabla 2-3 Valores factor Z.....	20
Tabla 2-4 Características del suelo del sitio de emplazamiento.....	21
Tabla 2-5 Tipo de uso, destino e importancia de la estructura.....	21
Tabla 2-6 Niveles de sismos.	22
Tabla 2-7 Coeficientes del espectro de diseño.....	23
Tabla 2-8 Parámetros de cálculo para espectro de diseño.....	24
Tabla 2-9 Parámetros espectro - 475 años - elástico e inelástico.....	25
Tabla 2-10 Parámetros espectro - 2500 años - inelástico.....	25
Tabla 2-11 Resultados de factores FCS para escalar sismos para Pórtico 1.....	27
Tabla 2-12 Resultados de factores FCS para escalar sismos para Pórtico 2.....	27
Tabla 2-13 Resultados de factores FCS para escalar sismos para Pórtico 3.....	28
Tabla 2-14 Resultados de factores FCS para escalar sismos para Pórtico 4.....	28
Tabla 2-15 Períodos Fundamentales - Análisis Modal en OpenSees - Sección agrietada.....	30
Tabla 2-16 Períodos Fundamentales - Análisis Modal en Otro Software – Sección agrietada.....	31
Tabla 2-17 Comparación de resultados de períodos entre programas.	32
Tabla 2-18 Comparación entre OpenSees y Otro Software basados en el tiempo con mayores derivas – sismo APED-E. Análisis Dinámico Lineal (475 años)	33
Tabla 2-19 Períodos Fundamentales - Análisis modal en OpenSees- Sección sin agrietar...	34
Tabla 2-20 Resultados del análisis no lineal - pórtico 1 estructura empotrada.....	36
Tabla 2-21 Resultados del análisis no lineal - pórtico 2 estructura empotrada.....	37
Tabla 2-22 Resultados del análisis no lineal - pórtico 3 estructura empotrada.....	38
Tabla 2-23 Resultados del análisis no lineal - pórtico 4 estructura empotrada.....	39
Tabla 2-24 Fórmula del Cortante Basal.....	41
Tabla 2-25 Parámetros para calcular el cortante basal 475 años	42
Tabla 2-26 Parámetros para calcular el cortante basal 2500 años.....	43
Tabla 2-27 Excedencia de las curvas de capacidad respecto al cortante basal para períodos de retorno de 475 y 2500 años.....	44
Tabla 3-1 Coeficiente de amortiguamiento.....	51
Tabla 3-2 Datos para pre dimensionar un aislador LRB.....	51
Tabla 3-3 Cálculo de las características del modelo bilineal.....	51
Tabla 3-4 Cálculo del área de plomo requerida.....	52
Tabla 3-5 Dimensionamiento del aislador (iteración).....	52

**ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE CONFIGURACIÓN DE
EDIFICACIONES ESENCIALES Y SU COMPARACIÓN EN
COMPORTAMIENTO, VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL Y
PROPUESTAS DE MITIGACIÓN, CONSIDERANDO $Z = 0,40g$**

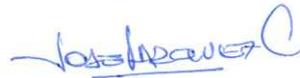
RESUMEN

La presente investigación pretende analizar la vulnerabilidad estructural de cuatro modelos, obtenidos de una tesis previa, la cual forma parte del proyecto de la Universidad del Azuay sobre hospitales seguros. Los análisis efectuados con el software OpenSees tienen lugar tanto en el rango lineal como el no lineal. Conociendo así el comportamiento de los modelos en presencia de cinco registros sísmicos y prestándole mayor importancia al aspecto de las derivas. Finalmente se optó por implementar aisladores elastoméricos LRB como medida de mitigación para el control de daños y posibles colapsos, es decir, conseguir la disminución de la vulnerabilidad de las edificaciones.

Palabras clave: OpenSees, estructura esencial, inelástico, aislador sísmico, derivas.



Ing. José Fernando Vázquez Calero
Director del Trabajo de Titulación



Ing. José Fernando Vázquez Calero
Director de la Escuela



Manuel Enrique Valdiviezo Lambert
Autor

**NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF THE CONFIGURATION OF
ESSENTIAL BUILDINGS AND THEIR COMPARISON IN BEHAVIOR,
STRUCTURAL VULNERABILITY AND MITIGATION PROPOSALS
CONSIDERING $Z = 0,40g$**

ABSTRACT

This research aimed to analyze the structural vulnerability of four models obtained from a previous thesis, which was part of the project on safe hospitals of the University of Azuay. The analysis was performed with OpenSees software and it took place in both the linear and the non-linear range. It was possible to determine the behavior of the models in the presence of five seismic records, giving greater importance to the appearance of the drifts. Finally, it was decided to implement LRB elastomeric insulators as a mitigation measure for damage control and possible collapses. The aim was to reduce the vulnerability of buildings.

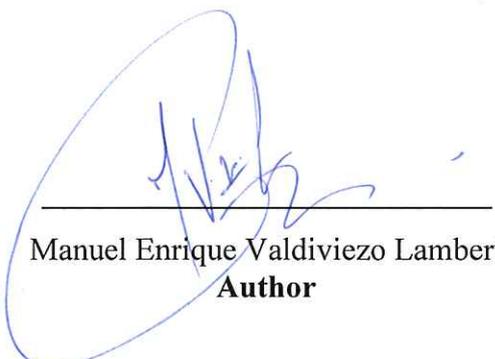
Keywords: OpenSees, essential structure, inelastic, seismic isolator, drifts.



Ing. José Fernando Vázquez Calero
Thesis Director



Ing. José Fernando Vázquez Calero
Faculty Director



Manuel Enrique Valdiviezo Lambert
Author



Translated by

Ing. Paul Arpi



Tabla 3-6 Resultados de pre-dimensionamiento para Pórtico 1.....	53
Tabla 3-7 Selección de aisladores en base de pre-dimensionamiento.....	54
Tabla 3-8 Verificación de desplazamientos máximos- sismo APED-E – período de retorno de 2500 años.	55
Tabla 3-9 Períodos fundamentales de las estructuras con aislamiento de base.	55
Tabla 3-10 Resultados del análisis no lineal - pórtico 1 estructura aislada.....	56
Tabla 3-11 Resultados del análisis no lineal - pórtico 2 estructura aislada.....	57
Tabla 3-12 Resultados del análisis no lineal - pórtico 3 estructura aislada.....	58
Tabla 3-13 Resultados del análisis no lineal - pórtico 4 estructura aislada.....	59



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: CREACIÓN DEL MODELO.

COMANDO [node]
COMANDO [fix]
COMANDO [mass]
COMANDO [equalDOF]
COMANDO [element elasticBeamColumn]
EJEMPLO DE APLICACIÓN

ANEXO 2: DIFINICIÓN DE MATERIALES.

Concrete01
Steel02
KikuchiAikenLRB

ANEXO 3: CREACIÓN DE SECCIONES POR MEDIO DE FIBRAS.

COMANDO [section Fiber]
COMANDO [patch quad]
COMANDO [layer straight]
EJEMPLO DE APLICACIÓN



Valdiviezo Lambert Manuel Enrique

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 $Z = 0,40g$

INTRODUCCIÓN

En esta tesis se pretende establecer y determinar propuestas de mitigación, luego de realizar un análisis no-lineal, a ciertas tipologías estructurales, establecidas en estudios previos, en diferentes variaciones como: elevación, planta y secciones. Y comparar su comportamiento, así como su vulnerabilidad estructural. Y de manera que se pueda comprender la importancia de estas nuevas metodologías constructivas, que surgen a medida que avanza la tecnología, e incentivar su uso dentro del país.

Debido a que nos encontramos en una zona en la se presenta la mayor cantidad de movimientos telúricos en el planeta, hablamos del “cinturón de fuego del pacífico”, es necesario adoptar medidas adecuadas, enfocadas hacia el correcto diseño y ejecución de las obras civiles, considerando todas las medidas de seguridad y normativas vigentes correspondientes al diseño sismorresistente, además de todas las otras normativas que se deben cumplir. El Ing. Víctor Zayas, hace referencia a que se le debe dar mucha importancia al análisis dinámico de las edificaciones esenciales, para que mantengan su capacidad de funcionamiento luego de un movimiento telúrico de consideración, controlando los daños producidos en elementos tanto estructurales como no estructurales, evitando el colapso y así proteger la vida de las personas.

Por todas estas razones, es importante e indispensable la realización de un análisis inelástico, sin embargo, en la mayoría de los casos no se lo practica. Basados en los resultados, podemos adoptar medidas correctivas para evitar que las estructuras entren en este estado, manteniéndose siempre en el rango lineal, y puedan continuar con su



capacidad de volver a su posición inicial o en el caso de haberse presentado daños estos no generen un problema a gran escala en las estructuras esenciales y/o peligrosas, que son el objeto de análisis de la presente investigación.

El análisis de costo-beneficio de las medidas de mitigación es una tarea que se la debe considerar en este tipo de estudio, el impacto económico es también una razón que influirá de gran manera, además de los resultados obtenidos del análisis inelástico que nos permitirá apreciar y distinguir qué método correctivo se comportará mejor aplicándolo a nuestra estructura, que nos hará decidimos entre una opción y otra.

GENERALIDADES

ANTECEDENTES

Recalcando lo anteriormente dicho, el Ecuador se encuentra ubicado en una zona altamente propensa a estar en presencia de movimientos sísmicos, los cuales han ocasionado graves desastres, perjudicando económica y psicológicamente a una gran cantidad de familias de diferentes clases sociales, las desgracias “no avisan ni escogen” a quienes van a perjudicar.

Estos movimientos telúricos son producidos por un fenómeno denominado de subducción, el cual se refiere a un choque entre dos placas; una llamada placa tectónica de Nazca, la cual se introduce por debajo de la placa tectónica Sudamericana, sobre la que nos encontramos ubicados, este movimiento genera el “reventar” de energía que se mantiene acumulada en el interior de la corteza terrestre, este punto o foco se lo conoce con el nombre de hipocentro, y el punto en la superficie, proyectado verticalmente en el mismo lugar se lo denomina como epicentro. (Charpentier, 2015)

Hace no mucho tiempo, en el mes de abril de 2016, dentro del territorio ecuatoriano, un terremoto con epicentro en el cantón Pedernales, provincia de Manabí de 7,8 grados en la escala de Richter fueron los que suscitaron el desconcierto y alboroto de las personas cercanas al lugar y de aquellos que se encontraban en ciudades de la sierra y oriente ecuatoriano, pues fue un evento de gran magnitud; dejó a muchas familias sin morada, y en muchos casos sin la alegría de poder ver a seres queridos una vez más. Los sobrevivientes se mantuvieron en la zozobra durante algún tiempo, hasta poderse



levantar nuevamente desde la nada, se demostró la gran resiliencia de los damnificados.

En otros países podemos encontrarnos también con situaciones similares o inclusive peores a la nuestra, como lo ocurrido hace poco tiempo en tierras mexicanas, dos sismos con poca diferencia en tiempo entre ellos, eventos que no se habían presentado sino hace treinta años atrás. Los mexicanos en esta ocasión se encontraron “mejor preparados” con respecto a décadas anteriores. Sin embargo, se contabilizaron un sinnúmero de pérdidas materiales y humanas. (NOTIMEX, 2018)

También conocemos la situación de países que viven en un continuo mar de movimientos de tierras, tales como: Chile y Japón. Pasar por experiencias así, dentro de alguno de estos países sin haber vivido un acontecimiento parecido, puede resultar algo traumático y confuso a la vez. Pues como se ha mencionado, estos lugares mantienen una continua lucha con este problema y de alguna manera se han acostumbrado a las sensaciones que produce el terror del momento y han sabido evolucionar para controlar esas emociones. Pero aún así no se puede dejar de lado la seguridad, y “a la fuerza”, estos países en donde los sismos son cosa de todos los días han debido adoptar medidas que les permitan vivir en paz y en armonía. Es así como las principales empresas fabricantes de dispositivos como: aisladores sísmicos, disipadores de energía, etc., se encuentran en estos lugares; ellos conocen del tema, así como los médicos del ser humano.

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), las estructuras esenciales consideradas con un alto factor de importancia no pueden dejar de servir a la comunidad.

Poniendo todas estas razones sobre la mesa, es que se plantea la importancia e insistencia en la incorporación del uso de medidas que ayuden a las estructuras a soportar los desmanes que ocurren debido a la acción de los procesos naturales de la tierra.



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 antes suscitados cuyos espectros sean compatibles con el espectro de respuesta.

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.

OBJETIVOS 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 el trabajo de Tesis se recolectará y clasificará la información de las diferentes tipologías estructurales esenciales 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 poder realizar el análisis dinámico no lineal de las diferentes tipologías estructurales esenciales.



Se realizará el modelo matemático idealizado de las diferentes tipologías estructurales con la ayuda del software libre OpenSees, se analizará el desempeño dentro del rango inelástico. No obstante, se deberá ingresar las cargas de acuerdo con la normativa vigente (NEC-Peligro Sísmico,2014).

Se diseñarán medidas de mitigación para disminuir la vulnerabilidad estructural de las diferentes tipologías estructurales a analizar, basadas en las normativas; Feral 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 Bonder 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 micro placa 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) (Quinde Martínez, Pablo, & Reinoso Angulo, Eduardo,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 golpeada 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 Salud, 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, hidrometeorológicas, 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 la (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 lo confirma el (ACI 318, 2011).

El método por emplear (pushover) es uno de los métodos, que permite adelantar análisis no lineales incremental simplificados con el fin de estimar el tipo de respuesta de una estructura ante la ocurrencia de un evento sísmico. Consisten en aplicar cargas horizontales y controlando el proceso mediante las cargas aplicadas o mediante las deformaciones del edificio E.E, M, 2006.

DEFINICIONES

Estructuras esenciales. - Son las estructuras que deben permanecer operativas luego de un terremoto para atender emergencias (NEC, 2014).

Para las estructuras esenciales y de ocupación especial, se requieren la verificación de desempeño de dichas estructuras. Se deberá limitar los daños estructurales, buscando elevar el nivel de protección y propendiendo a que las estructuras puedan mantenerse operacionales aun después de la ocurrencia del sismo de diseño.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-14, en lo que refiere a peligro sísmico, establece que, para las estructuras esenciales, se deberá verificar un correcto desempeño sísmico en el rango inelástico para:

Limitaciones de daño (nivel de seguridad de vida) ante un terremoto de 475 años de período de retorno, probabilidad anual de excedencia 0.00211.

No-colapso (nivel de prevención de colapso) ante un terremoto de 2500 años de período de retorno, probabilidad anual de excedencia 0.0004.

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
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

Figura 1 Tipo de uso, destino e importancia

Fuente: NEC 14.

Análisis estático no lineal (Pushover). - El análisis estático no lineal representa un modelo matemático que incorpora directamente las características no lineales de deformación de carga de componentes y elementos individuales del edificio a las cargas laterales que aumentan monótonamente, y que representan fuerzas de inercia en un terremoto hasta que se exceda el desplazamiento objetivo o se alcance el colapso de la estructura bajo la combinación de las cargas laterales y los efectos P-delta (FEMA 356, 2000).

Redundancia estructural. - La redundancia se refiere a la existencia de una gran cantidad de líneas de defensa continuas y resistentes a la carga, que causa un alto grado de hiperestaticidad. Una de las características más importantes que se debería buscar en una estructura desde el punto de vista de diseño sísmico es la redundancia, ya que cuando se cuenta con un número reducido de elementos, como es el caso de estructuras poco redundantes, la falla de alguno de éstos puede causar el colapso de la estructura (Colunga & Benítez, 2014).

Resiliencia estructural. - Capacidad de un sistema, comunidad, sociedad o persona en condición de riesgo, a adaptarse a una situación adversa, resistiendo o cambiando su forma de vida, con el fin de alcanzar y mantener su nivel aceptable en su funcionamiento o estructura. Se determina por el grado en el cual el sistema social es capaz de soportar el cambio, de auto-organizarse para incrementar su capacidad de aprendizaje sobre desastres pasados y de adaptarse a una nueva situación, con el fin de



lograr una mayor protección futura y mejorar las medidas de reducción de riesgo de desastres.

Funcionalidad continua. - La estructura debe mantenerse en funcionamiento durante su vida útil para las cargas de sollicitación en todos sus elementos, garantizando la seguridad de sus ocupantes.

Amenaza. - La probabilidad de ocurrencia, que se puede establecer de manera determinística para una fuente sísmica particular, que el valor de la amenaza será función principalmente del ambiente sísmico tectónico de la zona y las condiciones locales de los suelos. Además de los efectos directos sobre una ciudad por la propagación de las ondas de un sismo, éste puede desencadenar otros efectos como deslizamientos, licuación de terrenos, inundaciones, etc., o como consecuencia de los daños de las estructuras pueden ocurrir incendios, de tal manera que la amenaza debería involucrar tanto efectos directos como indirectos.

Riesgo. - Es la destrucción esperada de probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y la vulnerabilidad de los elementos expuestos a amenazas. El riesgo es matemáticamente expresado como una probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas y sociales en un determinado lugar y tiempo. También se expresa en las consecuencias negativas (daños y pérdidas) que puede presentarse en caso de ocurrencia de desastres, frente a la capacidad de resistir y recuperarse de estas.

Vulnerabilidad. - Representa la capacidad de los elementos estructurales (edificaciones, líneas vitales, población) para resistir daños o afectación frente a la amenaza, es decir que un elemento con baja vulnerabilidad es capaz de resistir altos niveles de amenaza, en cambio un elemento con alta vulnerabilidad tiene poca resistencia para absorber la fuerza de la amenaza, por lo que puede sufrir daños fácilmente; por tanto, el riesgo sísmico se reduce cuando la vulnerabilidad sísmica es baja.

Factor de importancia “I”. - El propósito del factor I es incrementar la demanda sísmica de diseño para estructuras que por sus características de utilización o de



importancia deben permanecer operativas o sufrir menores daños durante y después de la ocurrencia del sismo de diseño (NEC, 2014).

Análisis dinámico no lineal. - El análisis dinámico no lineal reconoce el comportamiento no lineal en el diseño de edificaciones conocidas como esenciales; en las reducciones por diseño ductilidad de los espectros de diseño y en la exigencia de refuerzo que permitan a la estructura alcanzar grandes deformaciones tanto en elementos estructurales y no estructurales, disponer mucha energía, pero sin llegar a colapsar.



CAPÍTULO 1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Basado en el estudio realizado por los Ingenieros Erick Cabrera y Mateo Torres, denominado **“Estructuración de edificaciones esenciales y su comparación en comportamiento y vulnerabilidad estructural, mediante modelación dinámica de diferentes tipologías constructivas.”**, en el cual se modelaron ciento veinte 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; se evaluaron aspectos tales como: deriva de piso, cortante basal, período y aceleración de diseño. Con estos resultados se procederá con la investigación **“Análisis dinámico no lineal de configuración de edificaciones esenciales y su comparación en comportamiento, vulnerabilidad estructural y propuestas de mitigación, considerando $z= 0,40g$ ”** en la que se escogen cuatro modelos de la investigación previa para realizar el respectivo análisis.

Cabe recalcar, que las estructuras seleccionadas están relacionadas con el aspecto de derivas de piso, de las cuales se concluyó que dos tienen un comportamiento positivo y las otras dos, uno negativo; sobre las cuales se analizará y determinará qué tan vulnerables son, y cómo reaccionan ante las situaciones a las que posteriormente serán sometidas. Luego de determinar las condiciones actuales de comportamiento y vulnerabilidad, se las comparará frente a sí mismas, pero con la adición de métodos de mitigación y así poder determinar conclusiones al respecto.

A continuación, se presentan los modelos estructurales obtenidos del anterior estudio que serán objeto de estudio en la presente investigación:

Mejor comportamiento ante derivas de piso.

- Pórtico1: Irregular en Altura; Columnas: 80x80cm; Vigas: 60x70cm.
- Pórtico2: Irregular en Planta; Columnas: 85x85cm; Vigas: 60x70cm.

Peor comportamiento ante derivas de piso.

- Pórtico3: Irregular en altura; columnas: 60x60cm; vigas: 30x40cm.
- Pórtico4: Regular en planta y altura; columnas: 60x60cm; vigas: 40x40cm.

NOTA: Todos los modelos a continuación están fundados a 3 metros de profundidad.

1.1. MODELOS CON MEJOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO

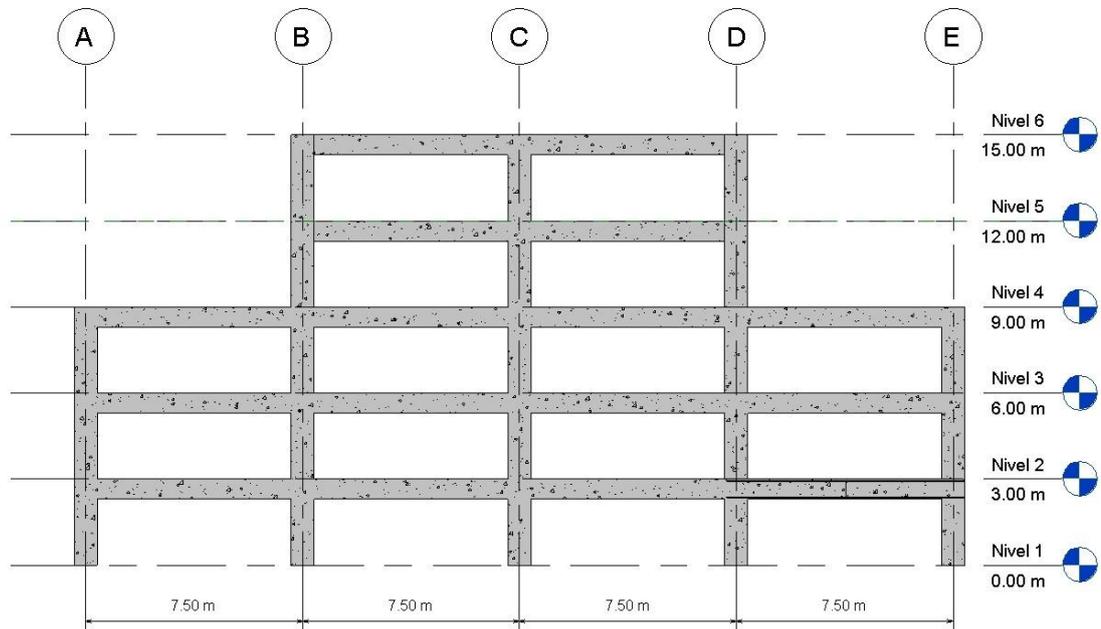


Figura 1-1 Geometría Pórtico 1.

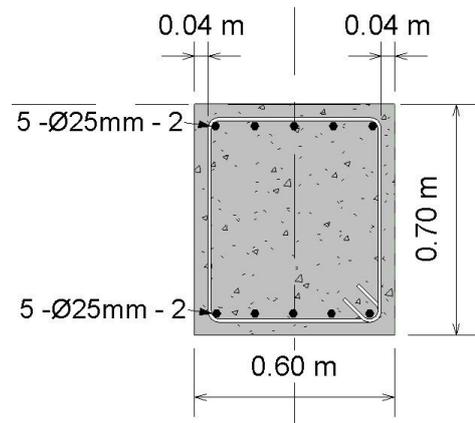


Figura 1-2 Dimensiones Viga Pórtico 1.

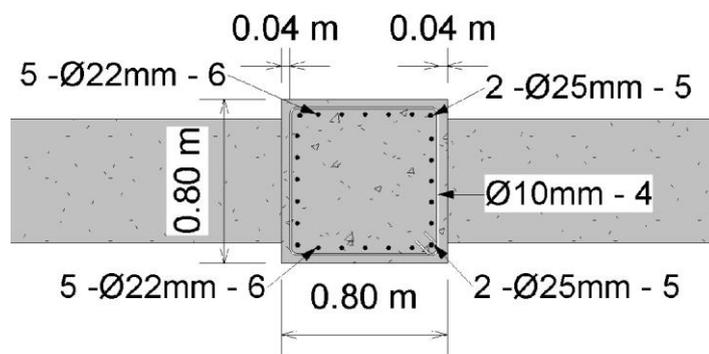


Figura 1-3 Dimensiones Columna Pórtico 1.
Fuente: Revit 2016.

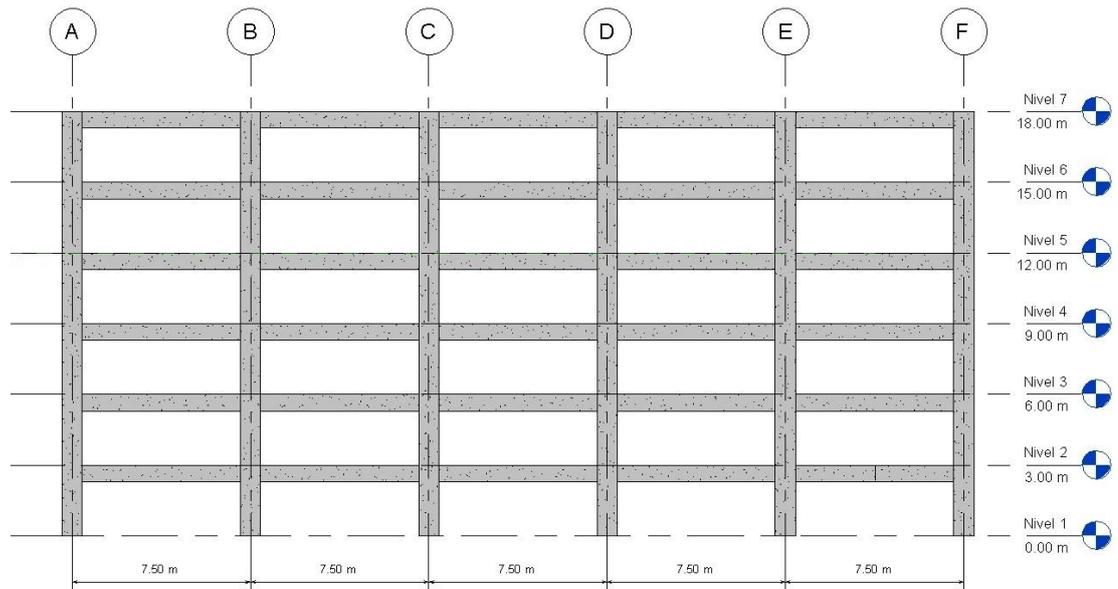


Figura 1-4 Geometría Pórtico 2

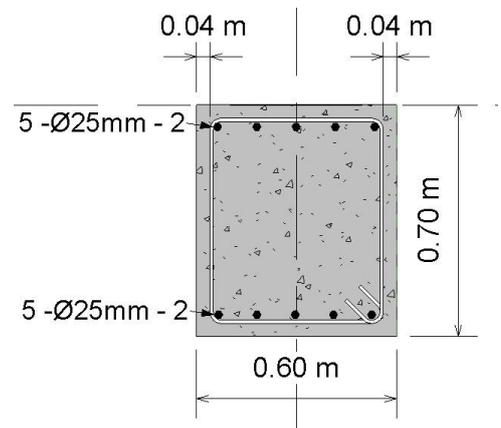


Figura 1-5 Dimensiones Viga Pórtico 2.

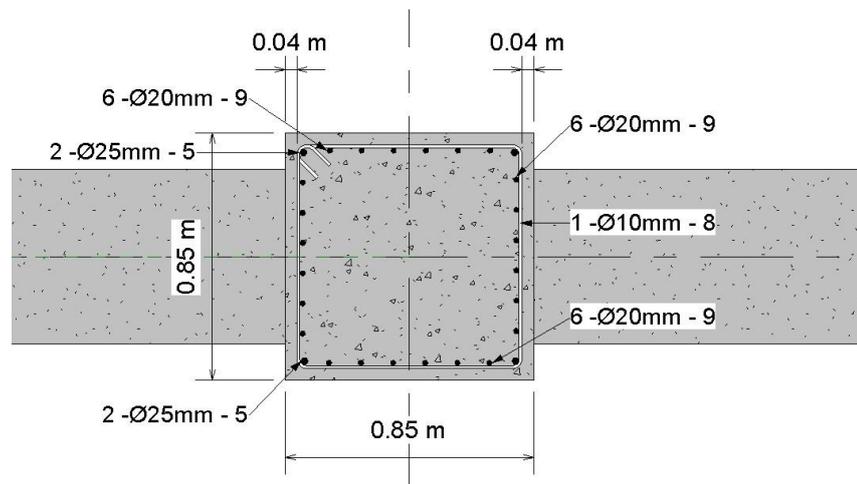


Figura 1-6 Dimensiones Columna Pórtico 2.
Fuente: Revit 2016.

1.2. MODELOS CON PEOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO

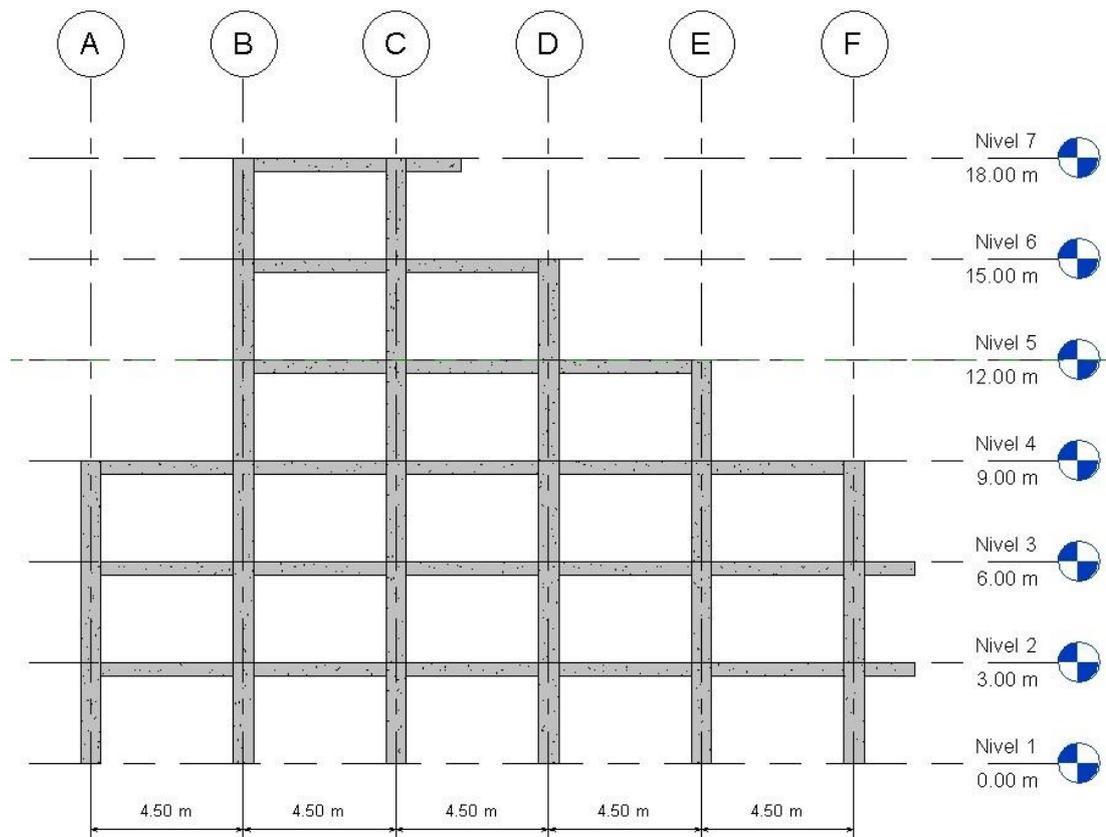


Figura 1-7 Geometría Pórtico 3

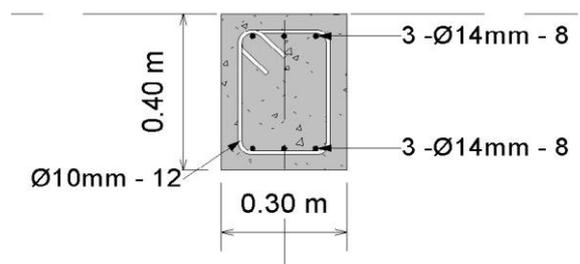


Figura 1-8 Dimensiones Viga Pórtico 3.

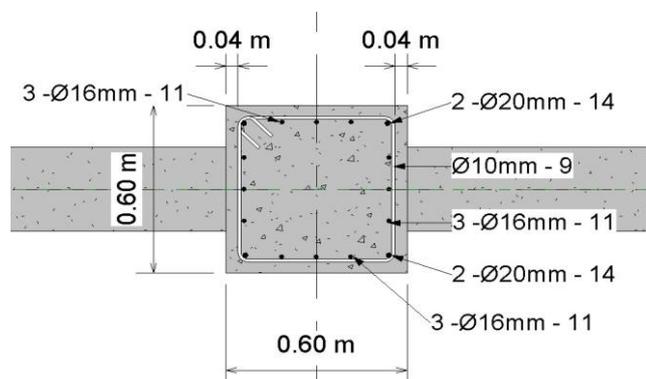


Figura 1-9 Dimensiones Columna Pórtico 3
Fuente: Revit 2016.

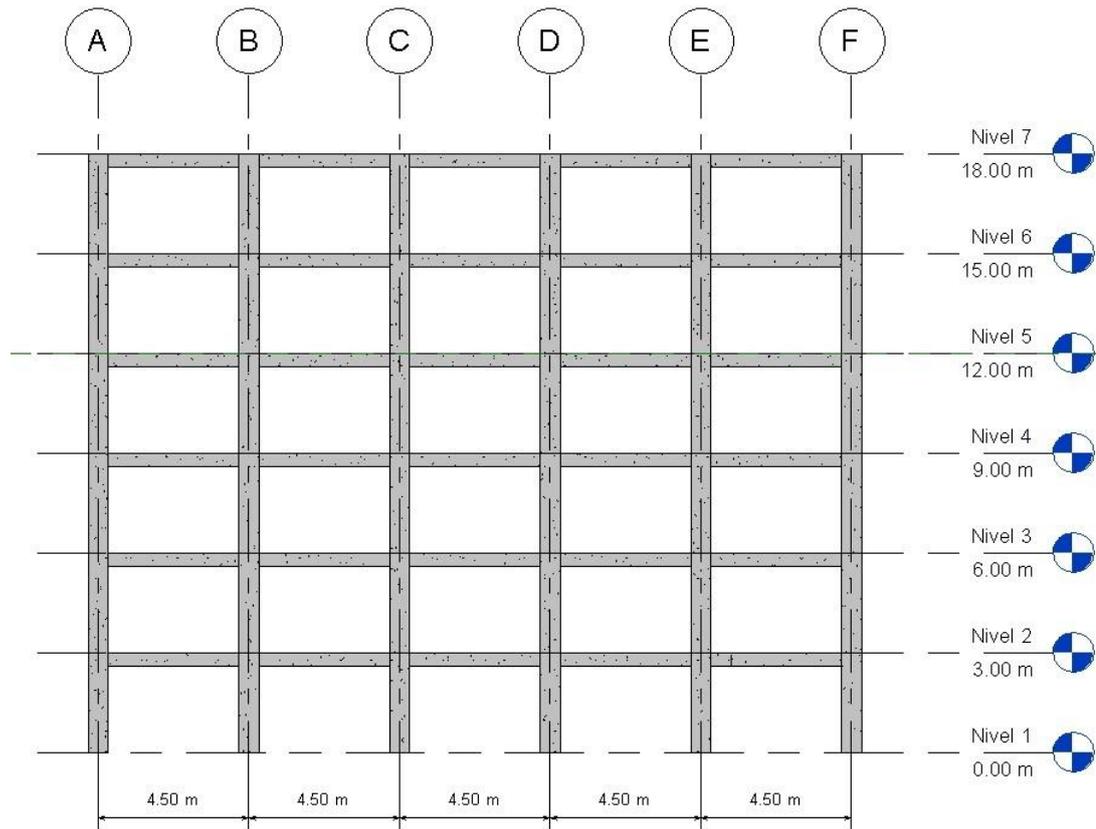


Figura 1-10 Geometría Pórtico 4.

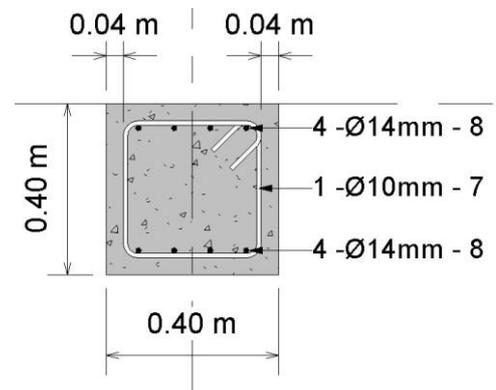


Figura 1-11 Dimensiones Viga Pórtico 4.

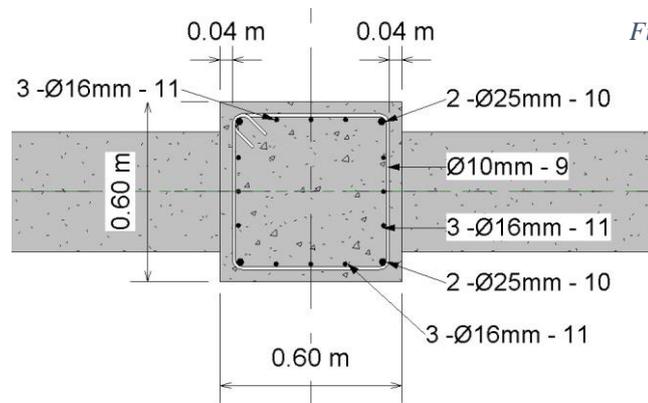


Figura 1-12 Dimensiones Columna Pórtico 4.
Fuente: Revit 2016.



CAPÍTULO 2. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA

A continuación, el procedimiento de modelación de las estructuras más representativas, las que han sido mostradas en el capítulo anterior, será realizado a través del software de código abierto OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), el cual es uno de los mejores programas de análisis estructural y geotécnico, aunque más que un programa es un interpretador de comandos (una serie de rutinas previamente elaboradas que se interpretan y se usan con los datos introducidos por el usuario). El que sea un interpretador trae como ventaja que es potente y rápido, pero su desventaja es que no incorpora una interfaz gráfica. Es un programa en el que hay que generar un script con los datos de entrada y demás parámetros para el análisis (“a la antigua”).

Si lo comparamos con el resto de los programas dedicados al análisis estructural, sin considerar la interfaz gráfica, no les tiene nada que envidiar, es más, los supera con categoría. Es de código libre (gratuito) pero la curva de aprendizaje es mayor, el propio usuario podría configurar sus rutinas e incluirlas a Opensees, por ejemplo: comportamientos no lineales de ciertos materiales, análisis elásticos, modelación de aisladores, etc.

Actualmente, el diseño a nivel profesional solo usa análisis elásticos, es decir, solo con adquirir un paquete básico de SAP2000 o ETABS se tiene lo suficiente a un precio bastante accesible, pero si se requiere de un paquete más avanzado que incluya análisis no lineal y demás características, el precio puede subir sustancialmente.

Los análisis tiempo – historia dinámicos no lineales solo se usan en el análisis definitivo de sistemas con aisladores en la base o dispositivos de amortiguamiento añadidos, según norma. Por lo tanto, otros usos se dan solamente en el campo de la investigación. Un análisis de un edificio de pocos niveles con aisladores en la base, por el método de integración directa puede tomar varias horas, entonces ni pensar en realizar un análisis dinámico incremental que consiste en realizar varios de estos análisis tiempo – historia con integración directa (ya que se quiere evaluar la inestabilidad global). Y usar programas comerciales para fines como este, es casi perder el tiempo, ya que no están lo suficientemente preparados. En cambio, OpenSees tiene la ventaja de que ha sido



probado con estos análisis de manera rigurosa, muchos reportes del FEMA se han realizado con el estudio de modelos y/u osciladores probados en OpenSees (es mantenido por la Universidad de Berkeley, el Centro de Investigación en Ingeniería Terrestre del Pacífico “PEER”, entre otros). Hay algunos planteamientos de interfaces para Opensees, pero aún son limitados. Lo más importante de este software es que su uso nos obliga a conocer necesariamente como realizar un análisis estructural y a elegir los debidos parámetros para su uso, no como el resto de los programas, cuyos únicos requerimientos son: tener conocimientos básicos sobre el tema y saber dibujar, ya que el resto de los detalles vienen parametrizados.

2.1. CARGAS GRAVITACIONALES

2.1.1. 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, 2014) para hospitales, son las de mayor magnitud en la lista, debido a que se someterán a las estructuras a las peores condiciones de diseño para el análisis.

2.1.2. 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

2.2. MODELACIÓN EN OPENSEES

OpenSees, 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 nudos, para de esta manera



poder definir la acción de cargas y las restricciones nodales (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2014).

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).

2.3. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

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.

2.3.1. CREACIÓN DEL MODELO

Comandos para programar la geometría y ejemplo de aplicación en Anexo 1.

2.4. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

2.4.1. 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).

2.4.2. 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).



Tabla 2-1 Propiedades del Concreto.

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
Relación de poisson	U	0.2

Fuente: Autor.

2.4.3. 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 Propiedades del Acero de refuerzo.

Acero de refuerzo		
Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo longitudinal	F_y	4200 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	E_s	2x10 ⁷ tonf/m ²

Fuente: Autor.

2.5. DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES

Comandos para definir materiales en Anexo 2.

2.6. SECCIÓN EN FIBRAS

Comandos para programar secciones en base a fibras y ejemplo de aplicación en Anexo 3.

2.7. 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.

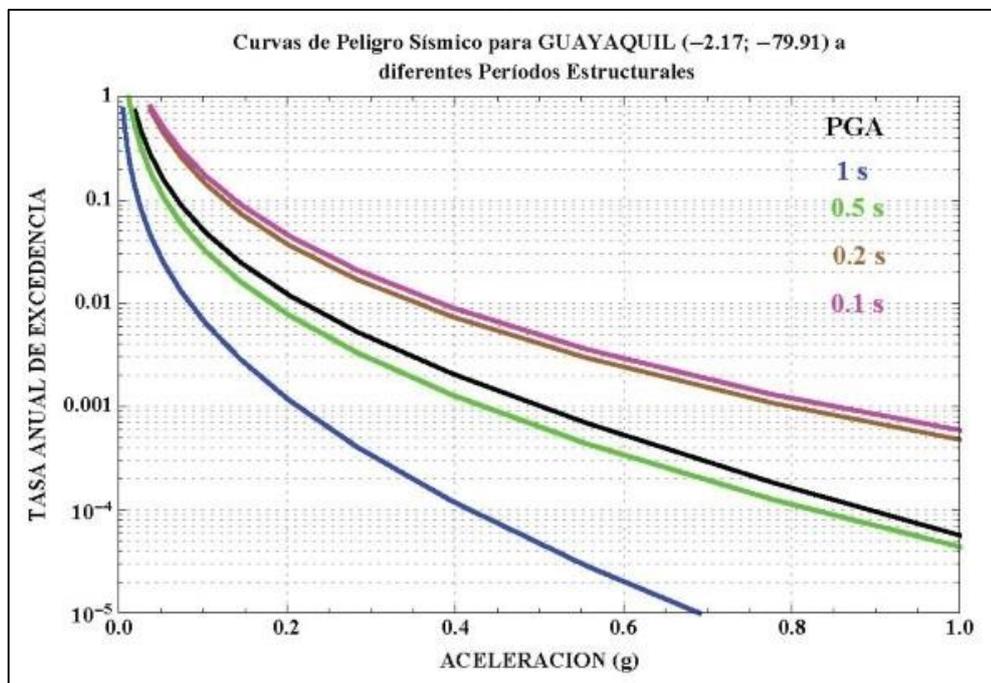


Figura 2-1 Curvas de peligro sísmico, Guayaquil.
Fuente: NEC 14.

El cantón La Troncal, es el lugar escogido para realizar el emplazamiento de las estructuras que se analizarán posteriormente.

En la NEC podemos encontrar las curvas de peligro sísmico de todas las capitales de provincia del Ecuador. Por lo tanto, La Troncal, al no ser una capital se ha optado por seleccionar la curva de la ciudad de Guayaquil, capital de la provincia del Guayas, la cual conserva características similares principalmente al tener el mismo valor de aceleración sísmica $Z=0.4g$. Este valor representa el resultado del estudio de peligro sísmico para este sitio para un 10% de excedencia en 50 años, es decir, para un período de retorno de 475 años.

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.

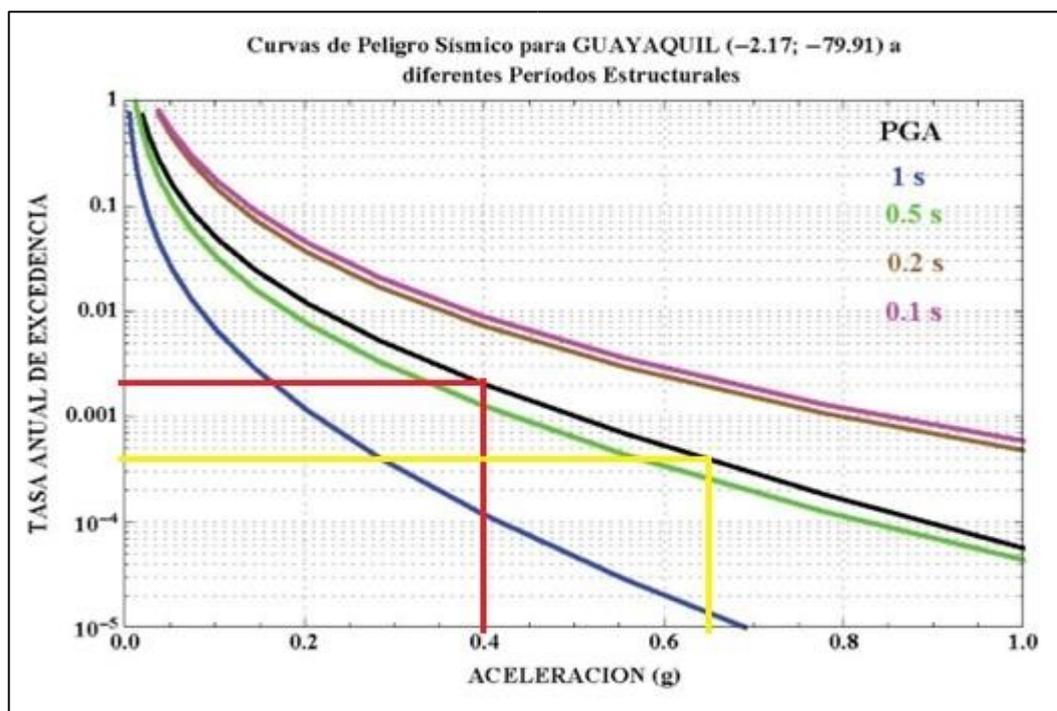


Figura 2-2 Determinación de los factores Z.

Fuente: NEC 14.

Así podemos obtener los valores de aceleración sísmica para los períodos de retorno de 475 y 2500 años.

Tabla 2-3 Valores factor Z.

Período de Retorno	Valor factor Z
475 años	0.40
2500 años	0.65

Fuente: Autor.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Figura 2-3 Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.

Fuente: NEC 14.

- Las características del suelo del sitio de emplazamiento.

Tabla 2-4 Características del suelo del sitio de emplazamiento.

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 14.

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

Tabla 2-5 Tipo de uso, destino e importancia de la estructura.

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 14.

- 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.



- 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.

Tabla 2-6 Niveles de sismos.

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 14.

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

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

Figura 2-4 Nivel de desempeño estructural para estructuras esenciales y de uso especial.

Fuente: NEC 14.

- La resistencia mínima de diseño para todas las estructuras deberá basarse en las fuerzas sísmicas de diseño:
 - 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).

2.8. ESPECTRO DE DISEÑO

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 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 2-7 Coeficientes del espectro de diseño.

Factores	Definición
Fa	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.
Fd	Coeficiente de ampliación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos del sitio.
Fs	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 14.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4					

Figura 2-5 Tipos de suelo y factores de sitio Fa.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Figura 2-6 Tipos de suelo y factores de sitio F_d .

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Figura 2-7 Tipos de suelo y factores de sitio F_s .

Fuente: NEC 14.

Tabla 2-8 Parámetros de cálculo para 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 14.



2.8.1. PERÍODO DE RETORNO 475 AÑOS

Tabla 2-9 Parámetros espectro - 475 años - elástico e inelástico

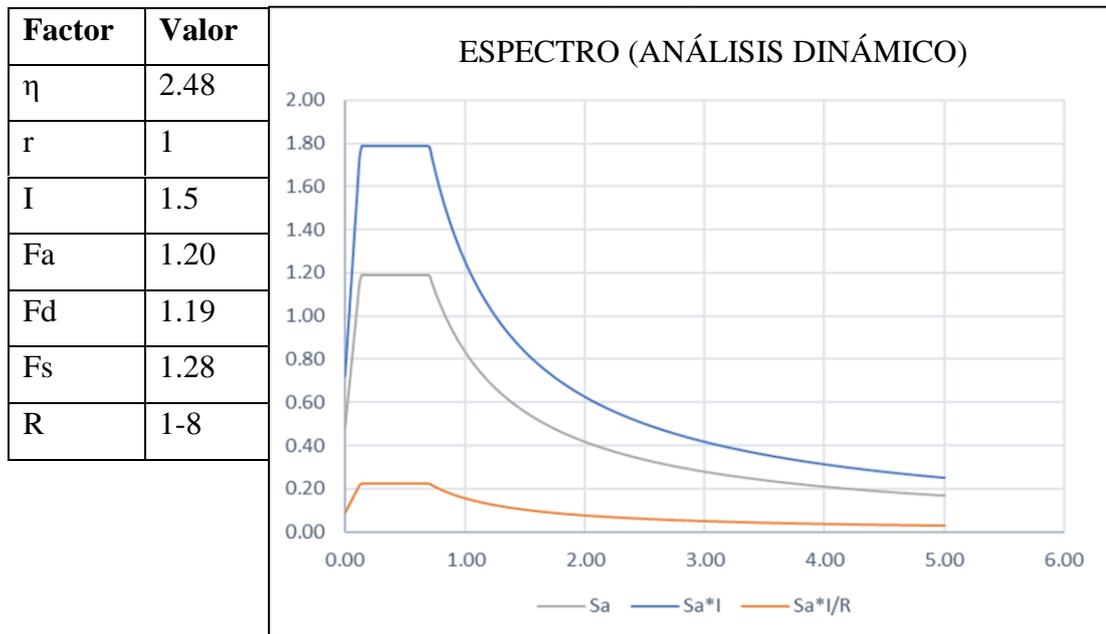


Figura 2-8 Espectro de diseño período de retorno 475 años - elástico e inelástico.

2.8.2. PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS

Tabla 2-10 Parámetros espectro - 2500 años - inelástico.

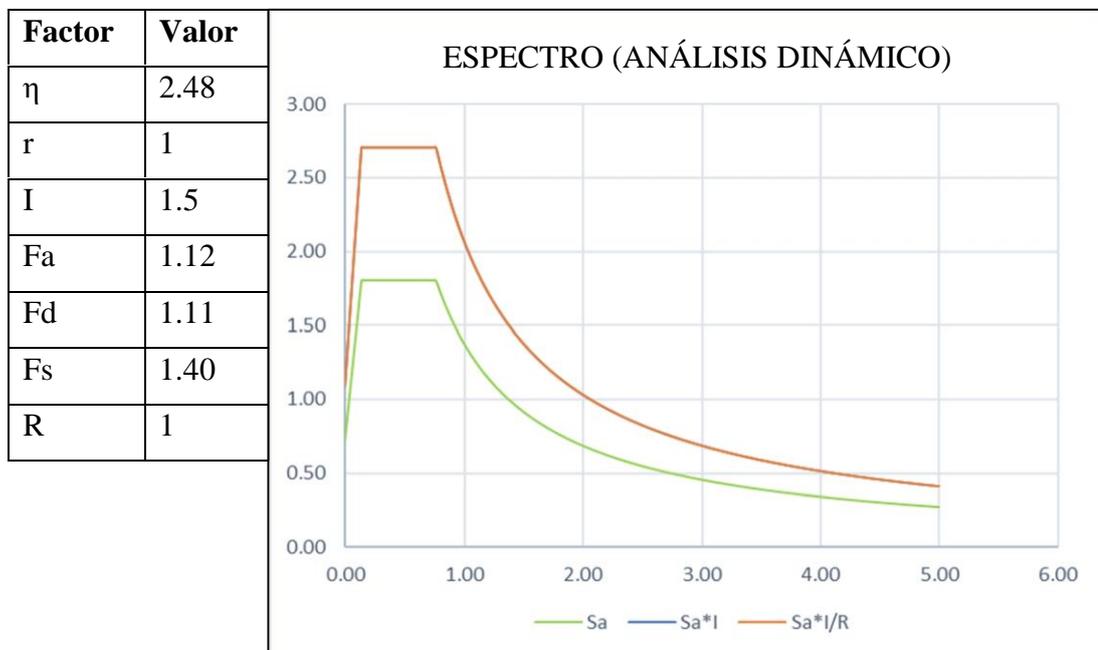


Figura 2-9 Espectro de diseño - período de retorno 2500 años - inelástico.

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 la forma de nuestro espectro de diseño.

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 $1.5T$.

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.

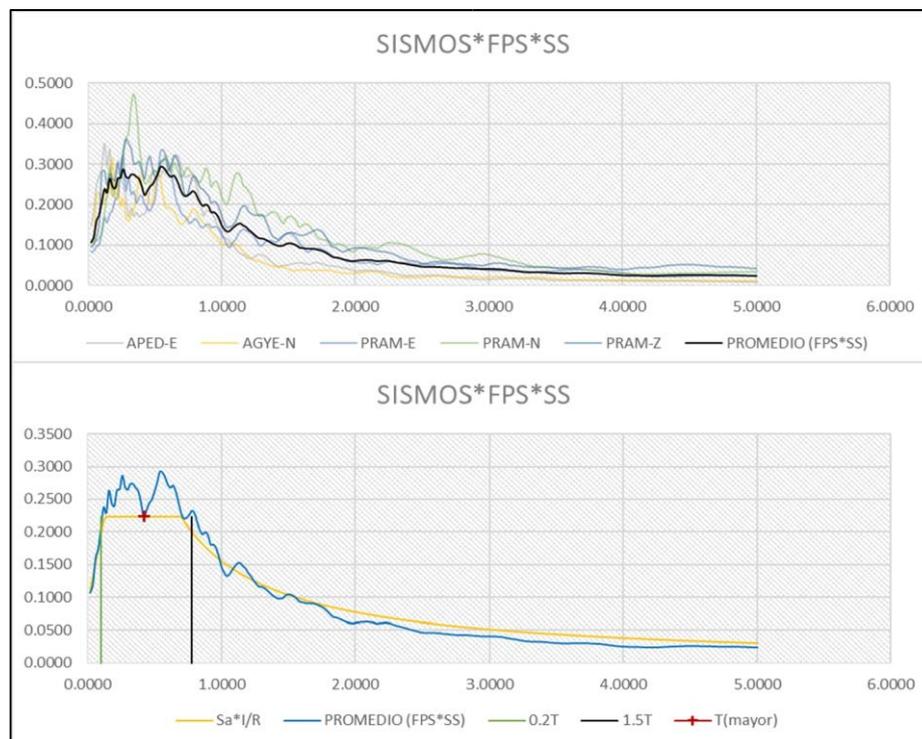


Figura 2-10 Escalamiento de sismos para Pórtico 1 - Análisis Dinámico Lineal.

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:

MEJOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO:

PÓRTICO 1:

Tabla 2-11 Resultados de factores FCS para escalar sismos para Pórtico 1.

REGISTROS	FACTORES FCS		
	ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO 475 AÑOS	ANÁLISIS DINÁMICO INELÁSTICO 2500 AÑOS	
		SIN AISLADOR	CON AISLADOR
APED-E	0.10369	1.66607	1.27869
AGYE-N	4.4461	53.54212	87.64821
PRAM-E	3.33347	44.64951	69.00942
PRAM-N	4.51167	46.42461	51.66099
PRAM-Z	7.12585	73.94947	104.01774

Fuente: Autor.

PÓRTICO 2:

Tabla 2-12 Resultados de factores FCS para escalar sismos para Pórtico 2.

REGISTROS	FACTORES FCS		
	ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO 475 AÑOS	ANÁLISIS DINÁMICO INELÁSTICO 2500 AÑOS	
		SIN AISLADOR	CON AISLADOR
APED-E	0.08399	1.27834	2.71404
AGYE-N	5.72957	79.25365	147.87215
PRAM-E	4.58606	36.30146	65.87482
PRAM-N	3.41912	48.57527	51.69161
PRAM-Z	6.72265	79.75992	80.31549

Fuente: Autor.

**PEOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO:****PÓRTICO 3:**

Tabla 2-13 Resultados de factores FCS para escalar sismos para Pórtico 3.

REGISTROS	FACTORES FCS		
	ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO 475 AÑOS	ANÁLISIS DINÁMICO INELÁSTICO 2500 AÑOS	
		SIN AISLADOR	CON AISLADOR
APED-E	0.08399	1.16323	1.49828
AGYE-N	5.72957	77.27402	82.67108
PRAM-E	4.58606	38.45013	69.36587
PRAM-N	3.41912	52.32294	54.77005
PRAM-Z	6.72265	80.68261	90.36434

Fuente: Autor.

PÓRTICO 4:

Tabla 2-14 Resultados de factores FCS para escalar sismos para Pórtico 4.

REGISTROS	FACTORES FCS		
	ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO 475 AÑOS	ANÁLISIS DINÁMICO INELÁSTICO 2500 AÑOS	
		SIN AISLADOR	CON AISLADOR
APED-E	0.11435	1.27739	1.95114
AGYE-N	6.22700	88.30616	97.92101
PRAM-E	3.81201	67.77477	60.57771
PRAM-N	2.94030	51.16490	47.34094
PRAM-Z	5.84826	106.2381	97.19915

Fuente: Autor.

2.10. ANÁLISIS MODAL

El análisis modal es una técnica de análisis dinámico de estructuras que tiene como objetivo la estimación de propiedades dinámicas como las frecuencias 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, todo esto utilizando los comandos anteriormente analizados.

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

2.11. ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL

2.11.1. OPENSEES

En Opensees para la realización del modelamiento se requiere haber obtenido previamente los siguientes parámetros de cada uno de los pórticos:

- **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 contener definidos 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.

- **Script de SectionAndMaterial:** de igual manera, la rutina para 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 2-15 Períodos Fundamentales - Análisis Modal en OpenSees - Sección agrietada.

Pórtico	Período (seg)
1	0.5193
2	0.7480
3	0.7981
4	0.9665

Fuente: Autor.

A continuación, 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 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. En las siguientes tablas se describen los resultados de un solo registro sísmico:



2.11.2. OTRO SOFTWARE

En 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 de los registros de sismos a la interfaz con sus respectivas escalas.

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 2-16 Períodos Fundamentales - Análisis Modal en Otro Software- Sección agrietada.

Pórtico	Período (seg)
1	0.5226
2	0.7526
3	0.7997
4	0.9673

Fuente: Autor.

Ahora se procederá a realizar un análisis Tiempo – Historia para determinar los desplazamientos y derivas de cada pórtico. Se someterá a la estructura a los diferentes sismos y se determinan los desplazamientos y derivas.

2.12. COMPARACIÓN ENTRE OPENSEES Y OTROS SOFTWARES

2.12.1. PERÍODO FUNDAMENTAL

Al realizar los respectivos análisis en los distintos softwares podemos darnos cuenta de que, a pesar de las pocas diferencias en los valores, estos son bastante similares.

Los programas nos brindan resultados confiables, lo que nos permitirá continuar con la investigación solamente en Opensees, como hablamos inicialmente este programa es mucho mejor para cumplir los objetivos que nos planteamos al principio.



Tabla 2-17 Comparación de resultados de períodos entre programas.

Pórtico	Período (seg)	
	Opensees	Otro
1	0.5193	0.5226
2	0.7480	0.7526
3	0.7981	0.7997
4	0.9665	0.9673

Fuente: Autor.

2.12.2. DESPLAZAMIENTOS Y DERIVAS

Para poder afirmar lo anteriormente dicho se procederá a comparar los resultados obtenidos en ambos análisis y asimismo su similitud en las siguientes gráficas, además se realizó una comparativa en el tiempo en el que se obtuvo la deriva máxima a lo largo de la simulación. En las siguientes tablas se describen los resultados de un solo registro sísmico:

Tabla 2-18 Comparación entre OpenSees y Otro Software basados en el tiempo con mayores derivas – sismo APED-E. Análisis Dinámico Lineal (475 años).

DESPLAZAMIENTOS [m] Y DERIVAS [%] MÁXIMAS																
NIVEL	PÓRTICO 1				PÓRTICO 2				PÓRTICO 3				PÓRTICO 4			
	OPENSEES		OTRO		OPENSEES		OTRO		OPENSEES		OTRO		OPENSEES		OTRO	
	t= 8.80 seg				t= 10.00 seg				t= 10.08 seg				t= 14.84 seg			
	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA	DESPL	DERIVA
N+18.00	-	-	-	-	0.047	1.02	0.048	1.03	0.087	3.20	0.091	3.40	0.055	1.09	0.057	1.19
N+15.00	0.028	0.93	0.029	0.93	0.042	1.49	0.043	1.48	0.071	3.49	0.074	3.65	0.050	1.64	0.051	1.75
N+12.00	0.024	1.20	0.024	1.19	0.034	1.92	0.036	1.92	0.053	3.47	0.056	3.60	0.041	2.22	0.043	2.31
N+9.00	0.018	1.35	0.018	1.37	0.025	2.12	0.026	2.18	0.036	3.21	0.038	3.32	0.030	2.56	0.031	2.63
N+6.00	0.011	1.39	0.011	1.45	0.014	1.91	0.015	2.04	0.020	2.73	0.021	2.91	0.017	2.35	0.018	2.40
N+3.00	0.004	0.77	0.004	0.83	0.005	0.94	0.005	1.04	0.006	1.27	0.007	1.37	0.006	1.14	0.006	1.18
N+0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

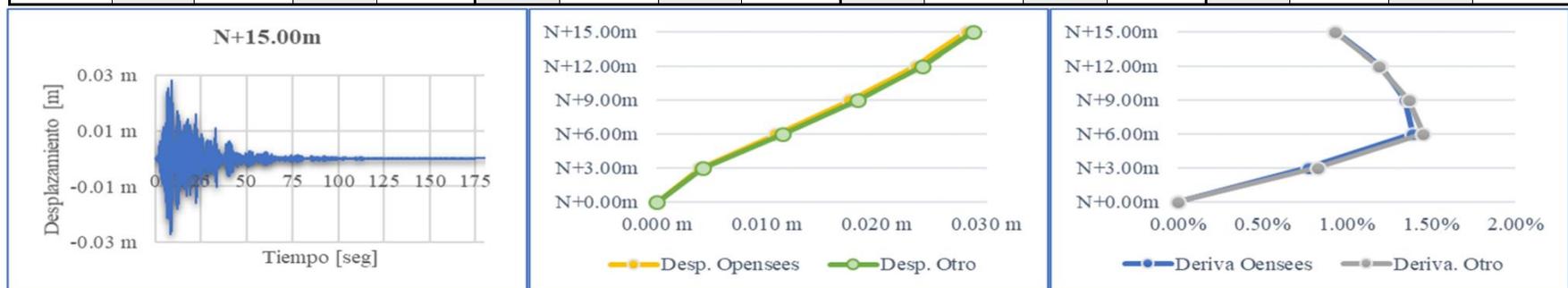


Figura 2-11 Tiempo-historia y comparación de desplazamientos y derivas entre OpenSees y Otro Software en t=8.80seg - pórtico 1 - sismo APED-E. Análisis Dinámico Lineal (475 años).

Fuente: Autor.

2.13. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Como se había mencionado, para los posteriores análisis la modelación será realizada a partir de ahora en Opensees.

De igual manera la ventana de interpretación necesita ciertos parámetros, los cuales son:

- **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.

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.

- **Script de GravityLoad:** aquí lo único requerido es definir las cargas distribuidas que se utilizarán y en qué elementos se encontrarán situadas.

Posterior a esto se realiza el mismo procedimiento y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 2-19 Períodos Fundamentales Análisis modal en OpenSees- Sección sin agrietar.

Pórtico	Período (seg)
1	0.4105
2	0.5825
3	0.6128
4	0.7394

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 2500 años”.
- Archivos de texto de los registros de acelerogramas de cada sismo.
- Script de ModelGeometry.
- Script de SectionAndMaterial.
- Script de GravityLoad.

A continuación, a partir del análisis no lineal realizado a todos los pórticos que fueron sometidos a cinco registros sísmicos representativos del lugar se muestran los resultados basados en el tiempo en que se presentaron los mayores desplazamientos para cada estructura, obteniendo así sus respectivas derivas para cada situación.



Tabla 2-20 Resultados del análisis no lineal p $\acute{o$ rtico 1 estructura empotrada.

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS) PÓRTICO 1 - ESTRUCTURA EMPOTRADA		
SISMO	TIEMPO – HISTORIA N+15.00m	DERIVAS DE PISO
APED-E		<p>t= 8.98 seg</p>
AGYE-N		<p>t= 43.32 seg</p>
PRAM-E		<p>t= 40.25 seg</p>
PRAM-N		<p>t= 61.89 seg</p>
PRAM-Z		<p>t= 40.56 seg</p>

Fuente: Autor.



Tabla 2-21 Resultados del análisis no lineal pórtico 2 estructura empotrada.

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS) PÓRTICO 2 - ESTRUCTURA EMPOTRADA																		
SISMO	TIEMPO – HISTORIA N+18.00m	DERIVAS DE PISO																
APED-E		<p>t= 9.08 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>0.80%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>1.44%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>2.08%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>2.35%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>2.07%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>1.03%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	0.80%	N+15.00m	1.44%	N+12.00m	2.08%	N+9.00m	2.35%	N+6.00m	2.07%	N+3.00m	1.03%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	0.80%																	
N+15.00m	1.44%																	
N+12.00m	2.08%																	
N+9.00m	2.35%																	
N+6.00m	2.07%																	
N+3.00m	1.03%																	
N+0.00m	0.00%																	
AGYE-N		<p>t= 43.07 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>0.53%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>1.14%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>2.19%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>3.06%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>3.16%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>2.00%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	0.53%	N+15.00m	1.14%	N+12.00m	2.19%	N+9.00m	3.06%	N+6.00m	3.16%	N+3.00m	2.00%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	0.53%																	
N+15.00m	1.14%																	
N+12.00m	2.19%																	
N+9.00m	3.06%																	
N+6.00m	3.16%																	
N+3.00m	2.00%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-E		<p>t= 43.22 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>-0.42%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>-0.80%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-1.40%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>-2.09%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>-2.44%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>-1.69%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	-0.42%	N+15.00m	-0.80%	N+12.00m	-1.40%	N+9.00m	-2.09%	N+6.00m	-2.44%	N+3.00m	-1.69%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	-0.42%																	
N+15.00m	-0.80%																	
N+12.00m	-1.40%																	
N+9.00m	-2.09%																	
N+6.00m	-2.44%																	
N+3.00m	-1.69%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-N		<p>t= 88.18 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>-0.63%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>-1.18%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-2.06%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>-2.92%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>-3.16%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>-2.13%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	-0.63%	N+15.00m	-1.18%	N+12.00m	-2.06%	N+9.00m	-2.92%	N+6.00m	-3.16%	N+3.00m	-2.13%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	-0.63%																	
N+15.00m	-1.18%																	
N+12.00m	-2.06%																	
N+9.00m	-2.92%																	
N+6.00m	-3.16%																	
N+3.00m	-2.13%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-Z		<p>t= 48.12 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>0.59%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>1.26%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>2.34%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>3.34%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>3.64%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>2.40%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	0.59%	N+15.00m	1.26%	N+12.00m	2.34%	N+9.00m	3.34%	N+6.00m	3.64%	N+3.00m	2.40%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	0.59%																	
N+15.00m	1.26%																	
N+12.00m	2.34%																	
N+9.00m	3.34%																	
N+6.00m	3.64%																	
N+3.00m	2.40%																	
N+0.00m	0.00%																	

Fuente: Autor.



Tabla 2-22 Resultados del análisis no lineal pórtico 3 estructura empotrada.

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS) PÓRTICO 3 - ESTRUCTURA EMPOTRADA																		
SISMO	TIEMPO – HISTORIA N+18.00m	DERIVAS DE PISO																
APED-E		<p>t= 28.66 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Alto</th><th>Deriva (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>-4.01%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>-3.86%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-3.18%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>-2.39%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>-1.88%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>-0.89%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Alto	Deriva (%)	N+18.00m	-4.01%	N+15.00m	-3.86%	N+12.00m	-3.18%	N+9.00m	-2.39%	N+6.00m	-1.88%	N+3.00m	-0.89%	N+0.00m	0.00%
Alto	Deriva (%)																	
N+18.00m	-4.01%																	
N+15.00m	-3.86%																	
N+12.00m	-3.18%																	
N+9.00m	-2.39%																	
N+6.00m	-1.88%																	
N+3.00m	-0.89%																	
N+0.00m	0.00%																	
AGYE-N		<p>t= 43.18 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Alto</th><th>Deriva (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>5.41%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>5.32%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>4.43%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>3.09%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>2.03%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>0.78%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Alto	Deriva (%)	N+18.00m	5.41%	N+15.00m	5.32%	N+12.00m	4.43%	N+9.00m	3.09%	N+6.00m	2.03%	N+3.00m	0.78%	N+0.00m	0.00%
Alto	Deriva (%)																	
N+18.00m	5.41%																	
N+15.00m	5.32%																	
N+12.00m	4.43%																	
N+9.00m	3.09%																	
N+6.00m	2.03%																	
N+3.00m	0.78%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-E		<p>t= 55.28 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Alto</th><th>Deriva (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>-3.54%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>-3.83%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-3.80%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>-3.62%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>-3.30%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>-1.74%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Alto	Deriva (%)	N+18.00m	-3.54%	N+15.00m	-3.83%	N+12.00m	-3.80%	N+9.00m	-3.62%	N+6.00m	-3.30%	N+3.00m	-1.74%	N+0.00m	0.00%
Alto	Deriva (%)																	
N+18.00m	-3.54%																	
N+15.00m	-3.83%																	
N+12.00m	-3.80%																	
N+9.00m	-3.62%																	
N+6.00m	-3.30%																	
N+3.00m	-1.74%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-N		<p>t= 50.35 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Alto</th><th>Deriva (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>11.27%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>11.42%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-9.63%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>-6.73%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>-5.11%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>-2.56%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Alto	Deriva (%)	N+18.00m	11.27%	N+15.00m	11.42%	N+12.00m	-9.63%	N+9.00m	-6.73%	N+6.00m	-5.11%	N+3.00m	-2.56%	N+0.00m	0.00%
Alto	Deriva (%)																	
N+18.00m	11.27%																	
N+15.00m	11.42%																	
N+12.00m	-9.63%																	
N+9.00m	-6.73%																	
N+6.00m	-5.11%																	
N+3.00m	-2.56%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-Z		<p>t= 68.79 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Alto</th><th>Deriva (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>9.25%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>8.50%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>6.15%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>3.99%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>2.87%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>1.26%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Alto	Deriva (%)	N+18.00m	9.25%	N+15.00m	8.50%	N+12.00m	6.15%	N+9.00m	3.99%	N+6.00m	2.87%	N+3.00m	1.26%	N+0.00m	0.00%
Alto	Deriva (%)																	
N+18.00m	9.25%																	
N+15.00m	8.50%																	
N+12.00m	6.15%																	
N+9.00m	3.99%																	
N+6.00m	2.87%																	
N+3.00m	1.26%																	
N+0.00m	0.00%																	

Fuente: Autor.



Tabla 2-23 Resultados del análisis no lineal pórtico 4 estructura empotrada.

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS) PÓRTICO 4 - ESTRUCTURA EMPOTRADA		
SISMO	TIEMPO – HISTORIA N+18.00m	DERIVAS DE PISO
APED-E		<p>t= 28.24 seg</p>
AGYE-N		<p>t= 42.2 seg</p>
PRAM-E		<p>t= 55.48 seg</p>
PRAM-N		<p>t= 80.31 seg</p>
PRAM-Z		<p>t= 38.06 seg</p>

Fuente: Autor.

2.14. ANÁLISIS ESTÁTICO 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).

Desplazamiento total de la estructura = análisis Pushover y diagrama de fuerza desplazamiento (Goel & Chopra, 1998).

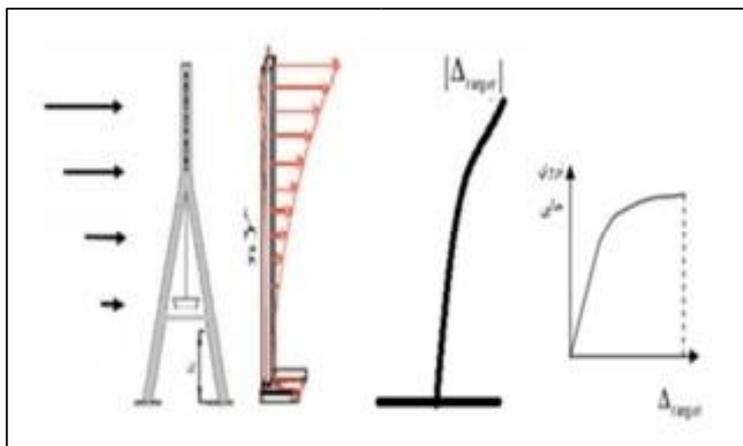


Figura 2-12 Análisis Pushover- desplazamiento máximo.
Fuente: (Mohammad & Hesamoldin, 2015).

2.14.1. 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 verticales que actúan a través de la configuración deformada de un edificio y el resultado en un aumento de los desplazamientos laterales (FEMA 356, 2000).

Con los pórticos previamente analizados, la información que se usó en el análisis modal, las acciones gravitacionales permanentes y las acciones laterales que se obtuvieron mediante la iteración de varias cargas que se aplicaron sobre la estructura hasta encontrar un valor de desplazamiento máximo, impuesto para el análisis. Se procederá a la modelación usando el software de código abierto OpenSees.

Los resultados obtenidos dentro del análisis estático no lineal usando el software de código libre OpenSees se puede observar la gráfica de desplazamiento vs fuerza que

es también conocida como curva de capacidad la cual permite la evaluación del daño en la estructura por deformación máxima.



Figura 2-13 Curva de capacidad considerando efectos P-Delta y lineal.

2.14.2. 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, 2014).

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

Tabla 2-24 Fórmula del Cortante Basal.

$V = \frac{I S_a(T_a)}{R \phi_P \phi_E} W$	
S_a(T_a)	Espectro de diseño en aceleración
ϕ_P y ϕ_E	Coefficiente de configuración en planta y elevación
I	Coefficiente de importancia
R	Factor de reducción de resistencia sísmica
V	Cortante basal total de diseño
W	Carga sísmica reactiva
T_a	Período de vibración

Fuente: Autor.



El cálculo del cortante basal de diseño, el cual sirve para comparar con el análisis Pushover con y sin efectos P-Delta, de donde se obtiene la máxima capacidad de soporte el cortante basal al que se afectará la estructura, para diseños con períodos de retorno de 475 y 2500 años.

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 2-25 Parámetros para calcular el cortante basal 475 años

Cortante Basal 475 años (NEC 14)				
	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
V (Tnf)	129.59	245.28	61.58	103.53
I	1.00			
ϕ_P	1.00	0.90	1.00	1.00
ϕ_E	0.90	1.00	0.90	1.00
R	8.00			
W (Tnf)	553.74	1048.08	263.13	491.52
Ta	0.63	0.74	0.74	0.74
H ()	15.00	18.00	18.00	18.00
Ct	0.06			
alpha	0.90			
Sa	1.6850			

Tabla 2-26 Parámetros para calcular el cortante basal 2500 años

Cortante Basal 2500 años (NEC 14)				
	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3	Pórtico 4
V (Tnf)	208.28	394.22	98.97	166.39
I	1.00			
Ø_P	1.00	0.90	1.00	1.00
Ø_E	0.90	1.00	0.90	1.00
R	8.00			
W (Tnf)	553.74	1048.08	263.13	491.52
Ta	0.63	0.74	0.74	0.74
H ()	15.00	18.00	18.00	18.00
Ct	0.06			
alpha	0.90			
Sa	2.7082			

Fuente: Autor.

El valor del coeficiente de importancia “I” se considera **UNO** 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.

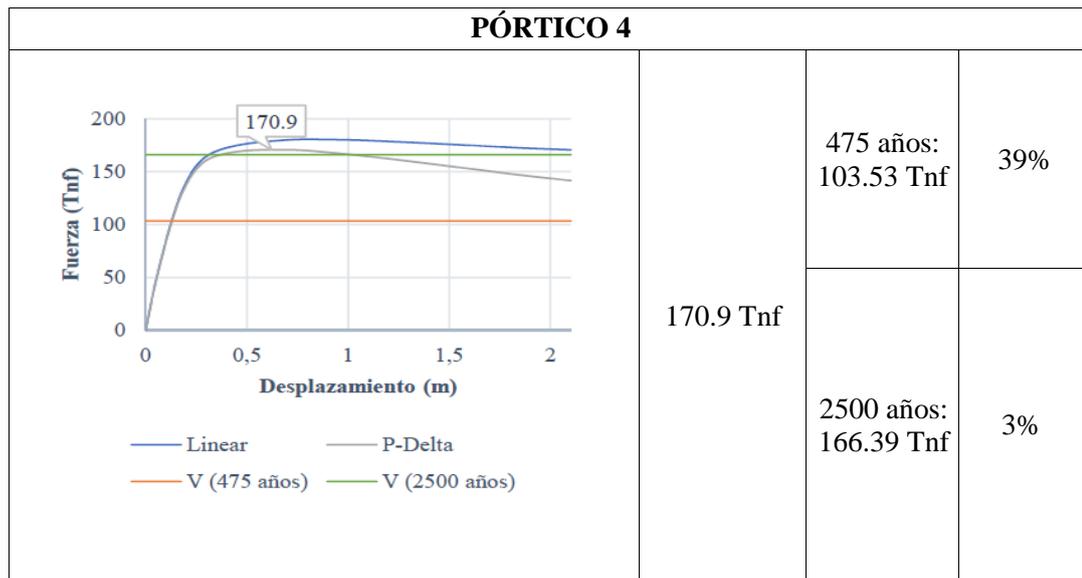
Los resultados obtenidos dentro del análisis dinámico no lineal usando el software de código libre OpenSees y el cálculo del cortante basal “V” se puede observar la gráfica de deriva vs fuerza y el cortante basal “V” en un período de retorno de 475 y 2500 años que es también conocida como curva de capacidad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

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 2-27 Excedencia de las curvas de capacidad respecto al cortante basal para períodos de retorno de 475 y 2500 años.

ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL			
CURVA DE CAPACIDAD	Vpushover	Vbasal	EXCEDENCIA
PÓRTICO 1			
	552.3 Tnf	475 años: 129.59 Tnf	77%
		2500 años: 208.28 Tnf	48%
PÓRTICO 2			
	763 Tnf	475 años: 245.28 Tnf	68%
		2500 años: 394.22 Tnf	48%
PÓRTICO 3			
	109.47 Tnf	475 años: 61.58 Tnf	44%
		475 años: 98.97 Tnf	10%



Fuente: Autor.

2.15. 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 un movimiento oscilatorio 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 que se realizó utilizando el software de código abierto OpenSees, en lo cual se puede apreciar la energía disipada de las diferentes configuraciones esenciales representado por sus curvas histeréticas.



MEJOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO:

PÓRTICO 1:



Figura 2-14 Curva histerética Pórtico 1.

PÓRTICO 2:



Figura 2-15 Curva histerética Pórtico 2.

PEOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO:

PÓRTICO 3:

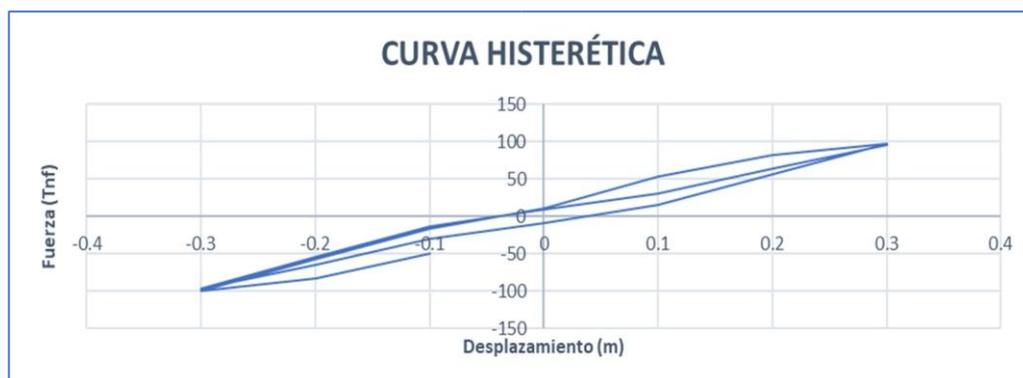


Figura 2-16 Curva histerética Pórtico 3.

PÓRTICO 4:



Figura 2-17 Curva histerética Pórtico 4.

2.16. 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, en 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%.



MEJOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO:

PÓRTICO 1:

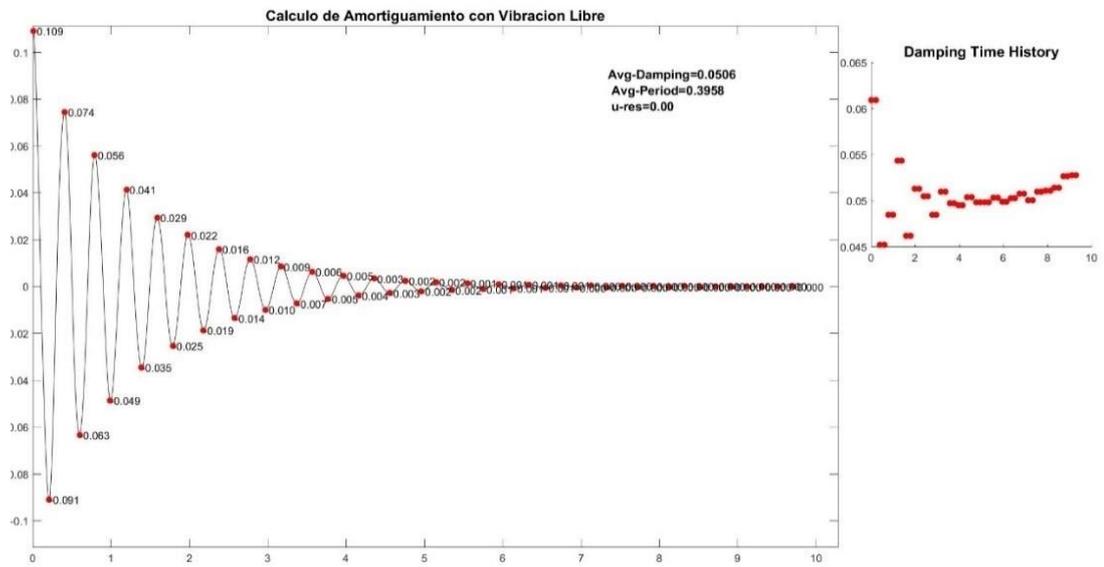


Figura 2-18 Cálculo de amortiguamiento con vibración libre Pórtico 1.

PÓRTICO 2:

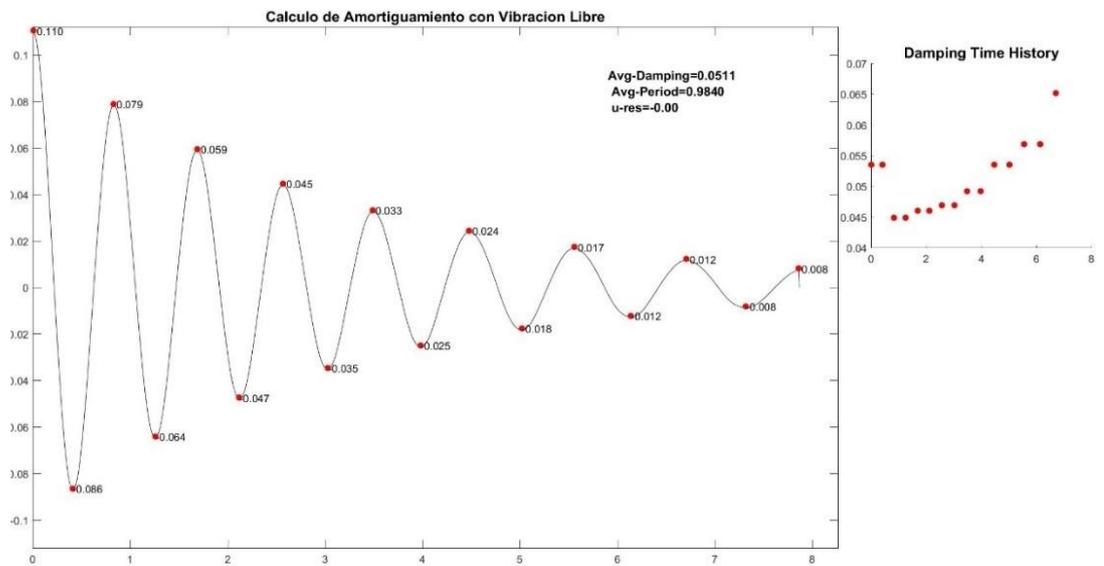


Figura 2-19 Cálculo de amortiguamiento con vibración libre Pórtico 2.



PEOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO: PÓRTICO 3:

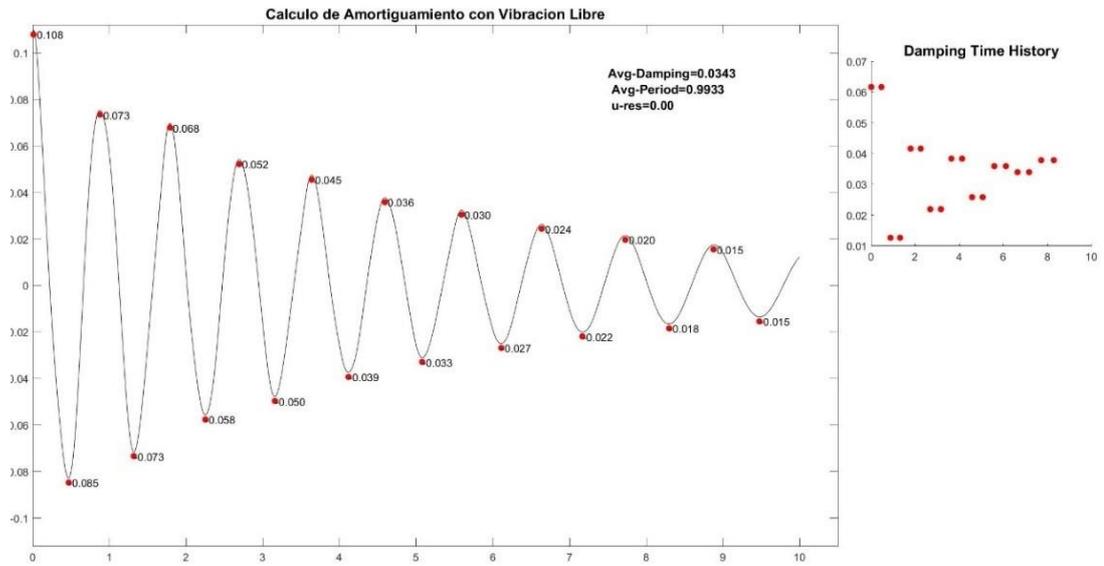


Figura 2-20 Cálculo de amortiguamiento con vibración libre Pórtico 3.

PÓRTICO 4:

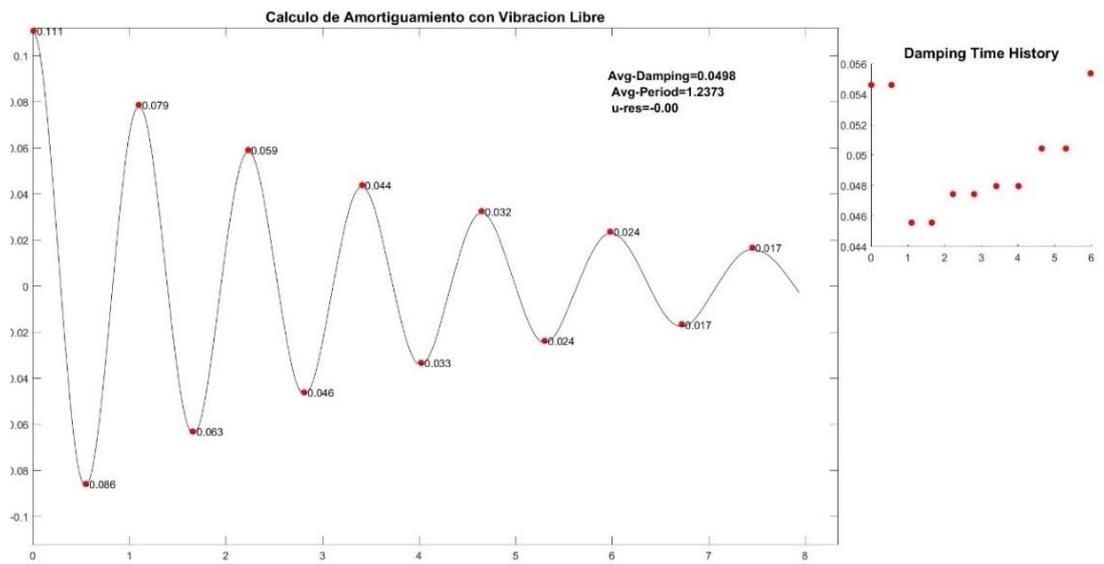


Figura 2-21 Cálculo de amortiguamiento con vibración libre Pórtico 4.

CAPÍTULO 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 (NEC, 2014), por lo tanto, se deben implementar medidas de mitigación que permitan a la estructura trabajar de manera ininterrumpida, más aún siendo estructuras esenciales, en caso de presentarse sobrecargas provocadas por eventos naturales.

Es por esto, que en el presente capítulo se analizará la implementación de aisladores sísmicos, los cuales 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. 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 con la rigidez horizontal, rigidez vertical, desplazamiento, capacidad de carga y capacidad de amortiguamiento requerida (Aguilar, Vergara, Guaygua, & Monge, 2014).

3.1.1. DIMENSIONAMIENTO DE AISLADORES

A continuación, se muestra el procedimiento de pre-dimensionamiento de un aislador con núcleo de plomo. Específicamente estos parámetros corresponden a los utilizados en el modelamiento para el Pórtico 1, tomando en cuenta que los valores que se denotan en un color distinto son cantidades que se pueden variar puesto que, las demás son fórmulas que se encuentran anexadas en otro documento.



Tabla 3-1 Coeficiente de amortiguamiento.

Amortiguamiento efectivo (δ)	Factor BD o B
2%	0.8
5%	1
10%	1.2
20%	1.5
30%	1.7
40%	1.9
50%	2

Fuente: ASCE 7 – 05

Tabla 3-2 Datos para pre dimensionar un aislador LRB

DATOS			
Período Objetivo	T	2.00	seg
Amortiguamiento Objetivo	β	11.26%	%
Coefficiente de Amortiguamiento	B	1.24	
Parámetro de espectro de aceleración 475 años	SD1	1.25	seg
Parámetro de espectro 2500 años	S1	2.07	seg
Peso pórtico	W	583.9776	Tn
		1287.451616	kips
DIMENSIONAMIENTO AISLADOR x UNIDAD			
Esf. Fluencia (plomo)	fy	1.3	ksi
Núm. de aisladores	n_{lrb}	5	u
Aisladores con plomo		5	u
Altura capa caucho	tr	9	in
Mod. Corte (caucho)	G_s	50.00	psi

Tabla 3-3 Cálculo de las características del modelo bilineal.

Rigidez efectiva Preliminar	K	32.88
Desplazamiento de diseño	D_d	19.69
Energía disipada	E_d	9019.12
Fuerza característica	Q	114.52
Rigidez postfluencia	k_p	27.07
Desplazamiento de fluencia	D_y	0.470
Fuerza característica	Q	117.32



Tabla 3-4 Cálculo del área de plomo requerida.

Área de plomo necesaria	Apb	90.25
Diámetro del plomo	Dp	7
Área de plomo 1 aislador	Apb 1 Aisl	30.00
Área de plomo 5 aisladores	Apb 5 Aisl	150.00
Fuerza característica	Q	195.00

Tabla 3-5 Dimensionamiento del aislador (iteración).

Rigidez postfluencia	Kp	26.93	kip/in				
Rigidez postfluencia 1 aislador	kp/5Aisl	5.39	kip/in				
Área del caucho	Ac	969.34	in ²				
Diámetro del caucho	Dc	35.13	35.5	in			
Otras características	S	8.16	8	Hertz			
módulo de elasticidad	Ec	18.01					
Rigidez vertical	kv	9697.56	ksi/in				
Período	T	0.12	seg				
Frecuencia	f	8.59	Hertz				
Grosor de capa de caucho	t	1.11	in				
Número de capas	n	8.11	9	u			
Grosor de capa de caucho	t	1.00	in				
Altura total del aislador	ht	11.72	in				
Rigidez efectiva	keff	36.83	33.53	33.09	32.95	32.91	kip/in
Energía disipada	Ed	14990.85	22408.62	24063.90	24613.56	24786.66	kips in
Amortiguamiento	β	16.71%	12.20%	11.55%	11.35%	11.29%	%
Desplazamiento máximo	D	29.53	31.66	32.36	32.58	32.65	in
Desplazamiento de fluencia	Dy	0.8047					
Coeficiente de Amortiguamiento	B		1.266	1.247	1.241	1.239	
Período	T		1.981	1.994	1.998	1.999	Seg

Fuente: Autor.

Período objetivo: 1.999 seg ≈ 2.00 seg

Amortiguamiento objetivo: 11.29% ≈ 11.26%

Tabla 3-6 Resultados de pre-dimensionamiento para Pórtico 1.

PÓRTICO 1		
	cm	in
Desp. máx	73.83	29.53
ht	29.76	11.72
Dp	17.78	7.00
Dc	90.17	35.50

Fuente: Autor.

El procedimiento anterior nos permite tener una idea acerca del aislador que debemos utilizar puesto que no se presentan las situaciones reales de modelación, es decir si nosotros colocamos este aislador en el pórtico 1 y lo calculamos, muy difícilmente llegaremos a ese período objetivo y a estos desplazamientos que hemos obtenido. Sin embargo, existen en la actualidad varias empresas dedicadas a la fabricación de estos elementos estructurales, y cada una de ellas tienen sus propios catálogos que nos brindan un rango de gamas que pueden funcionar según sea nuestro caso y podemos partir de lo que calculamos previamente. Como se muestra a continuación:

TAMANO DEL DISPOSITIVO				DIMENSIONES DE LA PLACA DE SOPORTE					
Díametro Aislador, D(in)	Altura Aislador, H(in)	Número de capas de caucho, N	Díametro del plomo D _i (in)	L (in)	T (in)	Cantidad orificios	Orificio ø (in)	A (in)	B (in)
12.0	5-11	4-14	0-4	14	1	4	1 1/16	2	-
14.0	6-12	5-16	0-4	16	1	4	1 1/16	2	-
16.0	7-13	6-20	0-5	18	1	4	1 1/16	2	-
18.0	7-14	6-20	0-5	20	1	4	1 1/16	2	-
20.5	8-15	8-24	0-7	22.5	1	8	1 1/16	2	2
22.5	8-15	8-24	0-7	24.5	1	8	1 1/16	2	2
25.5	8-15	8-24	0-8	27.5	1.25	8	1 1/16	2	2
27.5	8-17	8-30	0-8	29.5	1.25	8	1 5/16	2.5	3
29.5	9-18	8-30	0-9	31.5	1.25	8	1 5/16	2.5	3
31.5	9-20	8-33	0-9	33.5	1.25	8	1 5/16	2.5	3
33.5	9-21	8-35	0-10	35.5	1.5	12	1 5/16	2.5	3.75
35.5	10-22	9-37	0-10	37.5	1.5	12	1 5/16	2.5	3.75
37.5	10-23	10-40	0-11	39.5	1.5	12	1 5/16	2.5	3.75
39.5	11-25	11-40	0-11	41.5	1.5	12	1 9/16	3	4.5
41.5	12-26	12-45	0-12	43.5	1.75	12	1 9/16	3	4.5
45.5	13-30	14-45	0-13	47.5	1.75	12	1 9/16	3	4.5
49.5	14-30	16-45	0-14	52.5	1.75	16	1 9/16	3	4.5
53.5	16-30	18-45	0-15	56.5	2	16	1 9/16	3	4.5
57.1	17-30	20-45	0-16	60	2	20	1 9/16	3	4.5
61.0	18-30	22-45	0-16	64	2	20	1 9/16	3	4.5

(1) Las capacidades de carga axial corresponden a los máximos desplazamientos basados en los límites de diseño del 250% de tensión de corte del de caucho o 2/3 del diámetro del aislador. El desplazamiento real de un aislador y la capacidad de carga dependen del módulo y número de capas de caucho.

(2) Los Módulos de corte de caucho (G) están disponibles desde 55 psi hasta 100 psi.

(3) Para el modelamiento analítico bilineal de la rigidez elástica, utilice $K_a=10^*K_d$.

Figura 3-1 Catálogo de aisladores - empresa Dynamic Isolation Systems (DIS).

Fuente: Dynamic Isolation Systems (DIS)

Diámetro Aislador, Di (in)	PROPIEDADES DE DISEÑO			Desplazamiento Máximo, Dmax (in)	Capacidad Carga Axial, Pmax (kips)
	Rigidez Producida, Kd (k/in)	Resistencia Característica, Qd (kips)	Rigidez a la Compresión, Kv (k/in)		
12.0	1-5	0-15	>250	6	100
14.0	1-7	0-15	>500	6	150
16.0	2-9	0-25	>500	8	200
18.0	2-11	0-25	>500	10	250
20.5	2-13	0-40	>1,000	12	300
22.5	3-16	0-40	>3,000	14	400
25.5	3-20	0-50	>4,000	16	600
27.5	3-24	0-50	>4,500	18	700
29.5	3-27	0-60	>5,000	18	800
31.5	4-30	0-60	>6,000	20	900
33.5	4-35	0-80	>7,000	22	1,100
35.5	4-35	0-80	>8,000	22	1,300
37.5	4-35	0-110	>10,000	24	1,500
39.5	5-36	0-110	>11,000	26	1,700
41.5	5-36	0-130	>12,000	28	1,900
45.5	6-37	0-150	>16,000	30	3,100
49.5	7-38	0-170	>21,000	32	4,600
53.5	8-40	0-200	>29,000	34	6,200
57.1	9-41	0-230	>30,000	36	7,500
61.0	10-42	0-230	>37,000	36	9,000

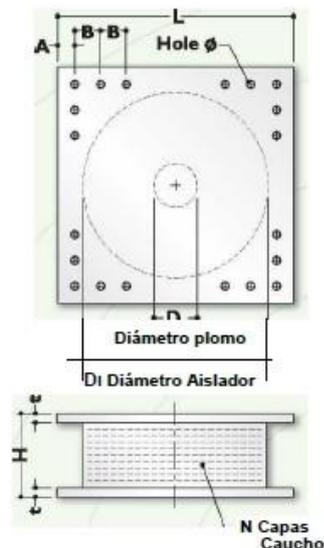


Figura 3-2 Propiedades de diseño de los aisladores DIS

Fuente: Dynamic Isolation Systems (DIS)

La empresa Dynamic Isolation Systems, nos muestra de manera muy clara la gama de alternativas que poseen, y los cuales según sus diámetros se puede variar en: altura, número de capas, diámetro de plomo, dimensiones de placa, etc.

Y en la segunda tabla nos muestran las características del modelo bilineal contra las que podemos comparar nuestro pre-dimensionamiento y optar por la mejor opción. Así como también nos facilitan el valor máximo de desplazamiento para tener en consideración para nuestro diseño.

Tabla 3-7 Selección de aisladores en base de pre-dimensionamiento.

	PÓRTICO 1		PÓRTICO 2		PÓRTICO 3		PÓRTICO 4	
	Predimensionamiento	DIS	Predimensionamiento	DIS	Predimensionamiento	DIS	Predimensionamiento	DIS
	in	in	in	in	in	in	in	in
Desp. máx	29.53	22	27.96	30	37.69	22	39.42	16
ht	11.72	12	15.81	15	17.17	21	9.63	10
Dp	7	7	9	9	4	4	4	4
Dc	35.5	35.5	45.5	45.5	33.5	33.5	25.5	25.5

Fuente: Autor.

Una vez obtenidas las dimensiones de los aisladores se realizarán nuevamente los análisis dinámicos no lineales para poder comparar así la eficacia de estos y a su vez obtener conclusiones acerca de los modelos estructurales, si son o no una buena opción para poder usar estas tipologías y configuraciones estructurales en la realidad.

Tabla 3-8 Verificación de desplazamientos máximos- sismo APED-E – período de retorno de 2500 años.

PÓRTICO	Desplazamiento del Aislador			
	Período de retorno 2500 años			
	OBTENIDO		PERMITIDO	
	in	cm	in	cm
1	-7.24	-18.40	±22.00	±55.88
2	-16.65	-42.30	±30.00	±76.20
3	7.09	18.00	±22.00	±55.88
4	9.17	23.30	±16.00	±40.64

Fuente: Autor

3.2. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL CON AISLACIÓN DE BASE

Al realizar el análisis modal nuevamente, ahora con la incorporación de los aisladores determinados anteriormente obtenemos un aumento en los períodos fundamentales.

Tabla 3-9 Períodos fundamentales de las estructuras con aislamiento de base.

Pórtico	Período (seg)
1	0.7446
2	0.8813
3	0.8331
4	1.0078

Fuente: Autor.

Con estos resultados se procede a escalar los sismos escogidos para el estudio para realizar la rutina de análisis dinámico no lineal descrito en el Capítulo 2 y se obtienen los siguientes resultados.



Tabla 3-10 Resultados del análisis no lineal pórtico 1 estructura aislada.

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS) PÓRTICO 1 - ESTRUCTURA AISLADA		
SISMO	TIEMPO – HISTORIA N+15.00m	DERIVAS DE PISO
APED-E		<p>t= 10.15 seg</p>
AGYE-N		<p>t= 45.9 seg</p>
PRAM-E		<p>t= 55.43 seg</p>
PRAM-N		<p>t= 46.37 seg</p>
PRAM-Z		<p>t= 37.96 seg</p>

Fuente: Autor.



Tabla 3-11 Resultados del análisis no lineal pórtico 2 estructura aislada.

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS) PÓRTICO 2 - ESTRUCTURA AISLADA																		
SISMO	TIEMPO – HISTORIA N+18.00m	DERIVAS DE PISO																
APED-E		<p>t= 14.48 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>-0.01%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>-0.12%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-0.33%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>-0.55%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>-0.65%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>-0.49%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	-0.01%	N+15.00m	-0.12%	N+12.00m	-0.33%	N+9.00m	-0.55%	N+6.00m	-0.65%	N+3.00m	-0.49%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	-0.01%																	
N+15.00m	-0.12%																	
N+12.00m	-0.33%																	
N+9.00m	-0.55%																	
N+6.00m	-0.65%																	
N+3.00m	-0.49%																	
N+0.00m	0.00%																	
AGYE-N		<p>t= 45.9 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>-0.24%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>-0.51%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-0.86%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>-1.14%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>-1.15%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>-0.69%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	-0.24%	N+15.00m	-0.51%	N+12.00m	-0.86%	N+9.00m	-1.14%	N+6.00m	-1.15%	N+3.00m	-0.69%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	-0.24%																	
N+15.00m	-0.51%																	
N+12.00m	-0.86%																	
N+9.00m	-1.14%																	
N+6.00m	-1.15%																	
N+3.00m	-0.69%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-E		<p>t= 86.65 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>0.38%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>0.62%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>0.84%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>0.99%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>0.98%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>0.67%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	0.38%	N+15.00m	0.62%	N+12.00m	0.84%	N+9.00m	0.99%	N+6.00m	0.98%	N+3.00m	0.67%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	0.38%																	
N+15.00m	0.62%																	
N+12.00m	0.84%																	
N+9.00m	0.99%																	
N+6.00m	0.98%																	
N+3.00m	0.67%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-N		<p>t= 50.39 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>-0.37%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>-0.64%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-0.95%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>-1.17%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>-1.17%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>-0.71%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	-0.37%	N+15.00m	-0.64%	N+12.00m	-0.95%	N+9.00m	-1.17%	N+6.00m	-1.17%	N+3.00m	-0.71%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	-0.37%																	
N+15.00m	-0.64%																	
N+12.00m	-0.95%																	
N+9.00m	-1.17%																	
N+6.00m	-1.17%																	
N+3.00m	-0.71%																	
N+0.00m	0.00%																	
PRAM-Z		<p>t= 37.93 seg</p> <table border="1"> <tr><th>Floor</th><th>Drift (%)</th></tr> <tr><td>N+18.00m</td><td>-0.35%</td></tr> <tr><td>N+15.00m</td><td>-0.60%</td></tr> <tr><td>N+12.00m</td><td>-0.85%</td></tr> <tr><td>N+9.00m</td><td>1.02%</td></tr> <tr><td>N+6.00m</td><td>1.02%</td></tr> <tr><td>N+3.00m</td><td>0.69%</td></tr> <tr><td>N+0.00m</td><td>0.00%</td></tr> </table>	Floor	Drift (%)	N+18.00m	-0.35%	N+15.00m	-0.60%	N+12.00m	-0.85%	N+9.00m	1.02%	N+6.00m	1.02%	N+3.00m	0.69%	N+0.00m	0.00%
Floor	Drift (%)																	
N+18.00m	-0.35%																	
N+15.00m	-0.60%																	
N+12.00m	-0.85%																	
N+9.00m	1.02%																	
N+6.00m	1.02%																	
N+3.00m	0.69%																	
N+0.00m	0.00%																	

Fuente: Autor.



Tabla 3-12 Resultados del análisis no lineal pórtico 3 estructura aislada.

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS) PÓRTICO 3 - ESTRUCTURA AISLADA		
SISMO	TIEMPO - HISTORIA N+18.00m	DERIVAS DE PISO
APED-E		<p>t= 9.08 seg</p>
AGYE-N		<p>t= 45.86 seg</p>
PRAM-E		<p>t= 80.43 seg</p>
PRAM-N		<p>t= 50.43 seg</p>
PRAM-Z		<p>t= 37.96 seg</p>

Fuente: Autor.



Tabla 3-13 Resultados del análisis no lineal pórtico 4 estructura aislada.

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (PERÍODO DE RETORNO 2500 AÑOS) PÓRTICO 4 - ESTRUCTURA AISLADA		
SISMO	TIEMPO – HISTORIA N+18.00m	DERIVAS DE PISO
APED-E		<p>t= 14.49 seg</p>
AGYE-N		<p>t= 45.91 seg</p>
PRAM-E		<p>t= 79.49 seg</p>
PRAM-N		<p>t= 61.09 seg</p>
PRAM-Z		<p>t= 47.72 seg</p>

Fuente: Autor.

3.3. ANÁLISIS PUSHOVER CÍCLICO CON AISLACIÓN DE BASE

MEJOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO:

PÓRTICO 1:



Figura 3-3 Curva histerética con aislador Pórtico 1.

PÓRTICO 2:

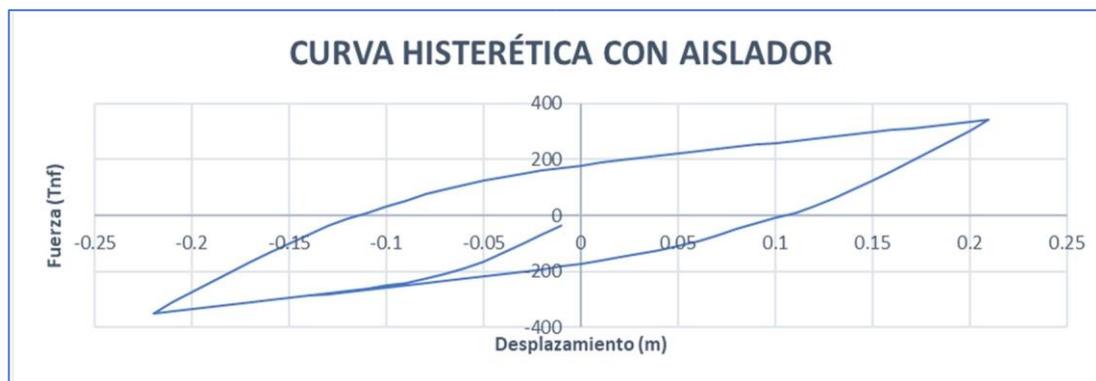


Figura 3-4 Curva histerética con aislador Pórtico 2.

PEOR COMPORTAMIENTO - DERIVAS DE PISO:

PÓRTICO 3:



Figura 3-5 Curva histerética con aislador Pórtico 3.

PÓRTICO 4:

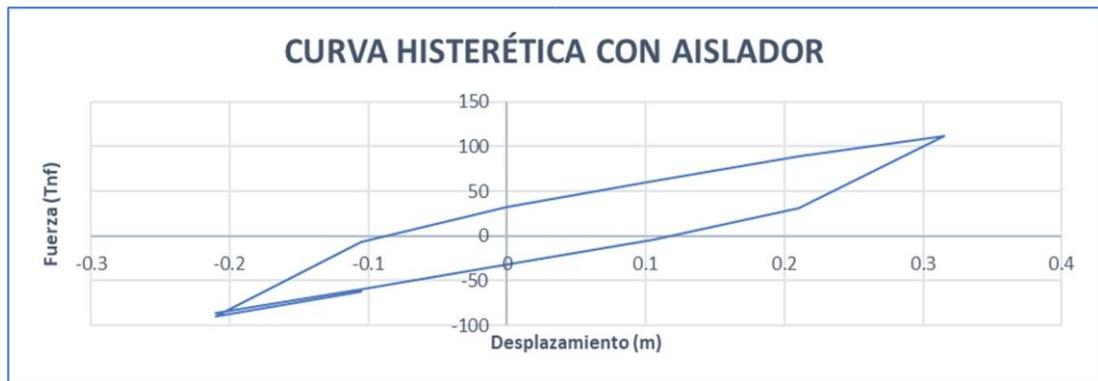


Figura 3-6 Curva histerética con aislador Pórtico 4.
Fuente: Autor.

Para concluir, se puede observar las curvas histeréticas después de la aplicación de las medidas de mitigación muestran mejores resultados al tener un área interna mayor, es decir, las estructuras luego de la incorporación de los aisladores elastoméricos son capaces de disipar más energía, lo cual se traduce en un mejor comportamiento al momento de la ocurrencia de un evento sísmico, puesto que se reducen en gran medida los desplazamientos, y las derivas se encuentran dentro de un rango controlado en la mayoría de los casos cumpliendo lo mencionado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción y se alejan de la posibilidad de colapsos disminuyendo su vulnerabilidad estructural.



CONCLUSIONES

El estudio realizado en este documento presenta los resultados esperados según el objetivo planteado referente a las derivas de piso basado en su comportamiento ante análisis dinámico. Puesto que, al tener inicialmente dos modelos con un comportamiento positivo, se esperaba obtener conclusiones alentadoras al final, y asimismo para el caso de los dos pórticos con un comportamiento deficiente, se esperaban resultados nada satisfactorios después de la implementación de las medidas de mitigación.

- La inserción de los elementos de aislamiento de base para los cuatro modelos objeto de estudio mostró buenos resultados para cada uno de ellos logrando disminuir las derivas de piso significativamente, a pesar de que en algunos casos no se llegó a lo establecido en la norma, se tiene la certeza de que la medida de mitigación escogida es capaz de ayudar a las estructuras a desempeñarse mejor ante un evento sísmico, pero se demuestra si existe un buen diseño y configuración estructural previo.
- Los pórticos 1 y 2, una vez realizado el análisis dinámico no lineal, con ayuda de los aisladores, se mejoraron las derivas de piso de 4,12% a 0.57% y de 3.64% a 1.17% respectivamente, cumpliendo lo establecido en la norma, la cual estipula que las derivas de piso deben ser menores al 2%. Por otro lado, los pórticos 3 y 4 si bien tuvieron una mejora significativa, esta no fue lo suficiente como para cumplir con los requerimientos esperados, obteniendo una mejora de 11.27% a 5.09% y de 7.65% a 2.47% respectivamente.
- Una buena configuración estructural es un punto clave que se debe tener en consideración al momento de diseñar una estructura. Los modelos seleccionados, son el resultado de una exhaustiva búsqueda a partir de un total de 120 configuraciones que fueron realizados en una investigación anterior, tomando en cuenta muchas variantes de estructuración para poder comparar y obtener resultados significativos. Partiendo de esto, y luego de la implementación de los aisladores se puede concluir que el pórtico 2 (mejor comportamiento) y pórtico 4 (peor comportamiento), regulares tanto en planta como en elevación obtuvieron



resultados favorables a pesar de su estado de deformación. Sin embargo, en el caso del pórtico 3 (peor comportamiento) tenemos una estructura irregular en elevación y con reducción de área por planta, obteniendo de esta manera elementos muy flexibles en la parte superior y llegando a tener desplazamientos grandes y por ende derivas que no cumplen con los requerimientos de la norma.

- En base al inciso anterior, llegamos a tener contradicciones con lo recomendado en el estudio realizado previo a este. En lo que se refiere a que una estructura con irregularidad en planta y con reducción de área por planta tiene un mejor comportamiento. Esto debido a que en dicho estudio solamente se consideró una carga viva de 200 kg/m^2 y en la presente investigación se expuso a los modelos a las peores situaciones de diseño para estructuras esenciales. Por lo tanto, el concepto de funcionalidad continua es muy difícil de aplicar en estos modelos, ya que no son aptas para ser implementados en estructuras esenciales.
- Cabe recalcar que los resultados obtenidos por parte del análisis estático no lineal, no muestran satisfactoria capacidad de resistencia de los pórticos, ya que según lo establecido en la NEC sobre el valor del cortante dinámico total obtenido por cualquiera de los métodos dinámicos debe exceder con un 80% (estructuras regulares) y con un 85% (estructuras irregulares) al cortante basal obtenido del método estático.
- Para finalizar, en las gráficas de las curvas histeréticas podemos observar que los resultados obtenidos a partir del análisis dinámico no lineal con aislamiento de base tienen mayor capacidad de disipación de energía.



RECOMENDACIONES

- Para poder obtener mejores resultados y a su vez confiables, se debe realizar previamente un correcto pre – dimensionamiento de estructuras esenciales además de una buena configuración estructural. Esto para garantizar que cada análisis muestre un comportamiento real de lo que pasa con cada modelo estudiado.
- Sabiendo que varias de las estructuras hospitalarias en el país tienen problemas en cuanto a lo referido en la línea de investigación Hospitales Seguros, se debería considerar incluir en la norma un capítulo dedicado a este tipo de estructuras y sobre el diseño de medidas de mitigación. Todo esto para poder actualizar la metodología de construcción actualmente utilizada en el Ecuador, teniendo en cuenta que nos encontramos en una zona propensa a este tipo de desastres naturales.
- Se debe tener en consideración continuar con una investigación en tercera dimensión para apreciar de mejor manera un comportamiento en ambas direcciones ante la presencia de movimientos telúricos.



REFERENCIAS

- 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.
- Charpentier, D. (17 de Septiembre de 2015). *bibliochile.cl*. Obtenido de <http://www.biobiochile.cl/noticias/2015/09/17/por-si-no-lo-sabias-la-razon-por-laque-en-chile-hay-tantos-terremotos.shtml>
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras*. Mexico: Pearson.
- Colunga, A., & Benítez, J. (2014). Impacto de la redundancia estructural en el comportamiento sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado. *Revista Internacional de Vol*, 19, 1-34.
- FEMA 356. (2000). *Federal Emergency Management Agency Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. 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 aporticadas 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>
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fendes, G. L. (2006). *OpenSees Command Language Manual*.
- 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.
- NEC. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Ecuador.
- NEC. (2014). *Peligro Sísmico - Diseño Sismo Resistente*. Ecuador.
- NEC. (2014). *PELIGRO SÍSMICO DISEÑO SISMO RESISTENTE*.
- Nikam, N. M., & Kalurkar, L. G. (2016). Pushover Analysis of Building with Shear Wall. *International Journal of Engineering Science and Computing*.
- NOTIMEX. (2 de Febrero de 2018). *Excelsior*. Obtenido de <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2018/02/09/1219223#view-2>
- Pacific Earthquake Engineering Research Center . (17 de Febrero de 2014). *Pacific Earthquake Engineering Research Center* . Obtenido de <http://peer.berkeley.edu/>
- 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. *COINESED*, 1-35.
- Nieto, M., Rivero, P., & Lobo, W. (2009). Análisis dinámico lineal de una edificación histórica en San Cristobal, estado Tachira. *Ciencia e Ingeniería*, 237-246.
- Organización Panamericana de la Salud . (2000). *Fundamentos de la Mitigación de Desastres en Establecimientos de la Salud*