



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE CONSTRUCCIONES**

**ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DEL “HOSPITAL MORENO  
VÁZQUEZ (GUALACEO)”, MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y REFUERZO  
PARA DISMINUIR SU VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

Autores:

**CARLOS EDUARDO AÑAZCO REYES**

Director:

**JOSÉ FERNANDO VÁZQUEZ CALERO**

**Cuenca-Ecuador**

**2017**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi padre y madre que siempre me han acompañado durante todo mi trayecto de vida que, con su demostración de cariño y respeto me han enseñado a no desfallecer ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional.

A mis hermanas especialmente, que siempre han estado junto a mí brindándome su ayuda, cariño y comprensión, que han sido parte fundamental en mi vida.

A mi hija que es mi motivación y es la causante de mi anhelo de salir adelante, progresar y culminar con éxito esta etapa de mi vida, agradezco a Dios por darme tan hermosa compañía y motivación para cada día ser mejor.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

Al Ing. José Vázquez Calero, director de tesis y docente de esta prestigiosa Universidad, por su valiosa guía y consejos a lo largo de toda la carrera universitaria.

Un agradecimiento especial a todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Civil por su apoyo y dedicación para impartir sus conocimientos.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>5</b>
<b>1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN</b> .....	<b>5</b>
1.1 METODOLOGÍA .....	5
1.2 ESTADO DEL ARTE .....	5
1.3 MARCO TEÓRICO .....	6
1.3.1 Definiciones (Anexo 1) .....	6
1.4 DATOS GENERALES.....	6
1.4.1 Información Arquitectónica y de Ingeniería (Anexo 2).....	6
1.5 CONCLUSIONES (ANEXO 3) .....	6
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>7</b>
<b>2 MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA</b> .....	<b>7</b>
2.1 MODELAMIENTO EN OPENSEES .....	7
2.2 GEOMETRÍA GENERAL .....	7

2.3	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS PÓRTICOS .....	9
2.3.1	Pórticos 1 y 2.....	9
2.4	ESPECTRO DE DISEÑO .....	9
2.4.1	Espectro de diseño (475 años).....	10
2.4.2	Espectro de diseño para un período de retorno de 2500 años.....	10
2.5	BASES DEL DISEÑO .....	11
2.5.1	Nivel de prevención de colapso (sismo extremo).....	11
2.5.2	Estructuras de ocupación esencial y especial .....	12
2.6	MODELO DE ANÁLISIS DE LAS FUERZAS SÍSMICAS .....	12
2.6.1	No lineales.....	12
2.6.2	Curvas de peligro sísmico .....	12
2.6.3	PGA (Peak Ground Acceleration).....	13
2.7	ESCALAMIENTO DE SISMOS.....	13
2.8	ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL EN OPENSEES .....	14
2.8.1	Análisis dinámico no lineal .....	15
2.8.2	Concrete 01 (MODELO DEL HORMIGÓN) .....	15
2.8.3	Steel01 (MODELO DE ACERO DE REFUERZO).....	16
2.8.4	Análisis tiempo-historia (período de retorno 475 años) .....	18
2.8.5	Análisis tiempo-historia (período de retorno 2500 años) .....	20
2.9	ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER).....	22
2.10	ANÁLISIS DE VIBRACIÓN LIBRE .....	23
2.11	CURVA DE HISTÉRESIS SIN AISLADOR .....	24

## **CAPÍTULO III..... 25**

### **3 MEDIDA DE MITIGACIÓN ..... 25**

3.1	AISLAMIENTO BASAL SÍSMICO .....	25
3.2	AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO (LRB).....	25
3.3	PRE-DIMENSIONAMIENTO DEL AISLADOR SÍSMICO (LBR).....	26
3.3.1	Características mecánicas de los aisladores elastómeros.....	26
3.3.2	Características mecánicas de los aisladores de plomo.....	27
3.3.3	Pre-dimensionamiento general del aislador con núcleo de plomo.....	28
3.3.4	Dimensión del aislador .....	30
3.4	DIMENSIONES DE LOS AISLADORES SÍSMICO (LBR).....	31
3.5	MODELAMIENTO DEL AISLADOR SÍSMICO (LBR) EN OPENSEES .....	31
3.6	ANÁLISIS DE LOS PÓRTICOS CON AISLADORES SÍSMICOS (LBR) EN OPENSEES .....	33
3.6.1	CURVAS HISTERÉTICAS .....	33

<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>35</b>
<b>4 ANÁLISIS PRESUPUESTARIO .....</b>	<b>35</b>
4.1 ESTIMACIÓN DEL COSTO TOTAL DE LA ENTIDAD HOSPITALARIA MORENO VÁZQUEZ .....	35
4.2 ELABORACIÓN DEL PRESUPUESTO DE LA MEDIDA DE MITIGACIÓN .....	36
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>38</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>39</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>40</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros de construcción de espectro de diseño 475 años.....	9
Tabla 2.2 Parámetros de construcción de espectro de diseño 2500 años.....	11
Tabla 2.3 Nivel de desempeño de estructuras esenciales.....	12
Tabla 2.4 Rutina element elasticBeamColumn.....	14
Tabla 2.5 Rutina uniaxialMaterial Concrete01 .....	16
Tabla 2.6 Rutina uniaxialMaterial Steel01.....	17
Tabla 2.7 Deformaciones y derivas pórtico 1 .....	19
Tabla 2.8 Deformación y derivas pórtico 2.....	20
Tabla 2.9 Deformación y derivas 2500 años.....	21
Tabla 2.10 Deformación y derivas pórtico 2.....	22
Tabla 3.1 Dimensiones de aisladores sísmicos .....	31
Tabla 3.2 Rutina uniaxialMaterial KikuchiAikenLRB .....	31
Tabla 3.3 Desplazamientos con aislador pórtico 1.....	33
Tabla 3.4 Desplazamientos con aislador pórtico 2.....	33
Tabla 4.1 Estimación del costo por m <sup>2</sup> del centro de salud tipo C .....	35
Tabla 4.2 Estimación del costo Hospital Moreno Vázquez .....	35
Tabla 4.3 Estimación del costo de la estructura aislada.....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Geometría general del Hospital Moreno Vázquez .....	8
Figura 2.2 Pórtico 1 .....	8
Figura 2.3 Pórtico 2.....	8
Figura 2.4 Espectro de diseño para un período de retorno de 475 años, pórtico 1 ....	10
Figura 2.5 Curva de peligro sísmico Cuenca .....	10
Figura 2.6 Espectro de diseño, período de retorno de 2500 años .....	11
Figura 2.7 Espectro de diseño fuentes diferentes.....	12
Figura 2.8 Espectros sin escalar .....	13
Figura 2.9 Sismos multiplicados por el factor FPS.....	13
Figura 2.10 Sismos escalados .....	14
Figura 2.11 Curva esfuerzo deformación del material elástico.....	15
Figura 2.12 Curva esfuerzo-deformación, típica del material concrete01 .....	16
Figura 2.13 Curva esfuerzo-deformación, típica del material Steel01.....	17
Figura 2.14 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 1 .....	18
Figura 2.15 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 2 .....	18
Figura 2.16 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 3 .....	18
Figura 2.17 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 1 .....	19
Figura 2.18 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 2 .....	19
Figura 2.19 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 3 .....	20
Figura 2.20 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 1 .....	20
Figura 2.21 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 2 .....	20
Figura 2.22 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 3 .....	21
Figura 2.23 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 1 .....	21
Figura 2.24 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 2 .....	21
Figura 2.25 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 3 .....	22
Figura 2.26 Curva de capacidad resistente pórtico 1 .....	22
Figura 2.27 Curva de capacidad resistente pórtico 2 .....	23
Figura 2.28 Análisis de vibración libre de la estructura.....	23
Figura 2.29 Vibración libre pórtico 1.....	23
Figura 2.30 Vibración libre pórtico 2.....	24
Figura 2.31 Curva histéresis pórtico 1 .....	24
Figura 2.32 Curva histéresis pórtico 2 .....	24

Figura 3.1 Curva de histéresis .....	27
Figura 3.2 Coeficiente de amortiguamiento ASCE 7-10 .....	29
Figura 3.3 Curva de histéresis aislador sísmico .....	32
Figura 3.4 Curva histerética aislador sísmico 1 .....	32
Figura 3.5 Curva histerética aislador sísmico 2 .....	32
Figura 3.6 Curva histerética pórtico 1 .....	34
Figura 3.7 Curva histerética pórtico 2 .....	34
Figura 4.1 Áreas del hospital .....	36
Figura 4.2 Comparación en porcentaje del costo de la estructura convencional vs estructura aislada .....	37

## ÍNDICE DE ANEXOS

### **Anexo 1**

Recopilación de información y definiciones.

### **Anexo 2**

Información Arquitectónica y de Ingeniería.

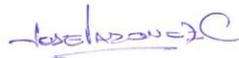
### **Anexo 3**

Conclusiones trabajo previo.

**RESUMEN****ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DEL “HOSPITAL MORENO VÁZQUEZ  
(GUALACEO)”, MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y REFUERZO PARA  
DISMINUIR SU VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL****RESUMEN**

Para evaluar el riesgo sísmico de estructuras existen diversas metodologías que tienen su base en el cálculo dinámico no lineal. En este trabajo se realiza el análisis de riesgo sísmico para el hospital Moreno Vázquez y conocer el comportamiento de esta estructura en un eventual sismo como el ocurrido en nuestro país en Abril del 2016. Los resultados obtenidos a partir del análisis dinámico no lineal nos demostraron la deficiencia en la construcción de estructuras esenciales. No obstante, como conclusión general, se puede determinar que es necesario la implementación de aisladores y disipadores sísmicos en las estructuras esenciales. Este resultado se atribuye a los excesivos desplazamientos que sufre la estructura y sus derivas, que sobrepasan los valores máximos que están en las normas.

**Palabras clave:** OpenSees, Tiempo-Historia, Vibración libre, Pushover, Aislación Basal.



José Fernando Vázquez Calero

**Director del Trabajo de Titulación**



José Fernando Vázquez Calero

**Director de Escuela**



Carlos Eduardo Añazco Reyes

**Autor**

**ABSTRACT**

Añazco Reyes xi

**NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF "MORENO VÁSQUEZ HOSPITAL (GUALACEO); MITIGATION AND REINFORCEMENT MEASURES TO REDUCE ITS STRUCTURAL VULNERABILITY.**

**ABSTRACT**

In order to evaluate the seismic risk of structures, there are several methodologies based on nonlinear dynamic calculation. This work aimed to perform a seismic risk analysis appropriate for *Moreno Vásquez* hospital, and to know the behavior of this structure in the eventuality of an earthquake such as the one that occurred in our country in April, 2016. The results obtained from the non-linear dynamic analysis demonstrated the deficiency of essential structures in the construction. However, as a general conclusion, it was determined that it is necessary to implement seismic isolators in all essential structures. This situation was attributed to the excessive displacements suffered by the structure, and the drifts that surpassed the standard.

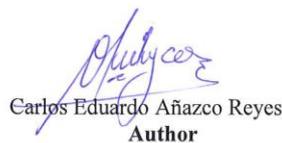
**Keywords:** OpenSees, Time-History, Free Vibration, Pushover, Base Insulation.



José Fernando Vázquez Calero  
**Thesis Director**



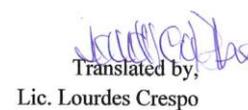
José Fernando Vázquez Calero  
**School Director**



Carlos Eduardo Añazco Reyes  
**Author**



Facultad de Ciencias  
UNIVERSIDAD DE GUALAQUIZA  
Lic. Sciomás



Translated by,  
Lic. Lourdes Crespo

Carlos Eduardo Añezco Reyes

Trabajo de Titulación

Ing. José Fernando Vázquez Calero M.Sc.

Julio, 2017

**ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DEL “HOSPITAL MORENO  
VÁZQUEZ (GUALACEO)”, MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y REFUERZO  
PARA DISMINUIR SU VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL**

**INTRODUCCIÓN**

La sismicidad a nivel del Ecuador es consecuencia de la convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. La subducción de la primera bajo la segunda ha sido ya bien descrita en la bibliografía científica, aunque su historia geológica no se haya definido con exactitud. El Ecuador se ve afectado tanto por sismos originados en la zona de subducción como por sismos superficiales relacionados con la deformación andina actual. La mayoría de estudios sismológicos realizados anteriormente en el Ecuador se basan en los sismos localizados por la red mundial (magnitud superior a 4.0). Dada la inadecuada distribución de las estaciones de esa red en esta parte del mundo, las localizaciones son poco exactas y no permiten realizar un estudio exhaustivo de la sismicidad. (H. Yepes, J. Chatelain, B. Guillier, Estudio del riesgo sísmico en el Ecuador)

La presente investigación se encuentra dentro de la línea de investigación científica aprobada por la Universidad del Azuay denominada “Vulnerabilidad estructural” y de acuerdo al programa de investigación científica “Implementación de una estrategia de Hospitales Seguros Frente a Desastres”.

La investigación está encaminada a realizar un análisis dinámico no lineal de la entidad hospitalaria “Moreno Vázquez”, utilizando software especializado OpenSees, que es una plataforma informática para el desarrollo de simulaciones de los

comportamientos estructurales mediante el cual se medirá su vulnerabilidad estructural; estableciendo medidas de mitigación y refuerzo.

En el Capítulo I se recopilará la información de ingeniería de la entidad hospitalaria del cantón Gualaceo, provincia del Azuay, obtenida de la investigación realizada por la Ing. Verónica Serrano e Ing. José Calle; la información adquirida se utilizará para realizar el análisis dinámico no lineal de la entidad hospitalaria, medidas de mitigación para disminuir su vulnerabilidad estructural.

En el Capítulo II se modelará la estructura utilizando el software OpenSees para realizar un análisis inelástico no lineal, para determinar sus máximas derivas y comportamiento de la estructura.

En el Capítulo III, como medida de mitigación a la vulnerabilidad estructural se propuso un aislamiento estructural, el cual se basó en pre dimensionar un aislador sísmico (LBR); posteriormente se modeló en OpenSees para verificar la disminución de desplazamientos y garantizar la seguridad de la estructura ante eventos sísmicos.

En el Capítulo IV se realizó una estimación del costo de la entidad hospitalaria existente y se comparó con el costo de la medida de mitigación planteada para realizar un análisis costo beneficio, verificando la factibilidad económica de la medida de mitigación.

## ANTECEDENTES

El Ecuador tiene una larga historia de actividad sísmica que, en los últimos 460 años, ha provocado la destrucción de ciudades enteras como Riobamba e Ibarra, con la muerte de más de 60 000 personas (Yépez H. et al 1998). Escenarios sísmicos probables evaluados en Quito (EPNet al 1994), Guayaquil (Argudo J. et al, 1 999) y Cuenca (García E. et al 2 000), muestran la necesidad urgente por emprender en programas para la mitigación del riesgo sísmico. El estudio del riesgo sísmico y su impacto en el desarrollo, constituye un reto científico crucial para el siglo veinte y uno. (NEC - Riesgo Sísmico y Rehabilitación Estructural, 2014)

El riesgo sísmico resulta de la combinación de 3 factores:

- peligro sísmico,
- nivel de exposición y
- vulnerabilidad al daño de las edificaciones.

La mayoría del territorio del Ecuador se encuentra ubicado en una zona de alto peligro sísmico, como se evidencia en la **NEC-SE-DS**. La vulnerabilidad o susceptibilidad al daño de muchas edificaciones que tienen un alto grado de exposición por estar en su mayoría situadas en ciudades con alta peligrosidad sísmica como Quito, Guayaquil y todas las ciudades costeras, de aquellas construidas antes de la promulgación de los códigos de la construcción o de aquellas que no han sido diseñadas apropiadamente y que a lo largo de su vida han sido reformadas, o que han sufrido un cambio en el tipo de uso distinto al contemplado en el diseño. El riesgo sísmico es alto y debe ser considerado en la toma de decisiones. (NEC - Riesgo Sísmico y Rehabilitación Estructural, 2014)

Ante esta realidad, los países de las Américas acordaron adoptar “Hospitales Seguros frente a los Desastres” como una política nacional de reducción de riesgos para lograr que todos los hospitales nuevos se construyan con un nivel de protección que garantice su capacidad de seguir funcionando en situaciones de desastre, que implanten medidas adecuadas de mitigación para reforzar los establecimientos de

salud existentes, especialmente los que brindan atención primaria. (Organización Panamericana de la Salud, Guía para la evaluación de Establecimientos de la Salud de mediana y baja complejidad, 2010)

En América Latina no se cumple con las normas de diseño sismorresistente, es por esta razón que los hospitales tienen una alta probabilidad de colapso ante un evento telúrico, se debe tener en cuenta que las partes no estructurales pueden causar daño al no estar sujetas a las partes estructurales de la entidad hospitalaria. Los hospitales son de gran importancia, debido a que ante una emergencia deben ser las zonas más seguras y resistentes para atención a la comunidad, de aquí surge la necesidad de un estudio a detalle para su construcción, la cual genera una alta inversión.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Realizar el análisis dinámico no lineal del “Hospital Moreno Vázquez”, de la ciudad de Gualaceo, provincia del Azuay, para determinar medidas pertinentes de mitigación y reforzamiento.

### **Objetivos específicos**

- Sistematizar la evaluación estructural disponible del “Hospital Moreno Vázquez”.
- Realizar el análisis dinámico no lineal de la estructura de la edificación hospitalaria.
- Diseñar el reforzamiento y medidas de mitigación para la edificación hospitalaria. (FEMA 356, 2000) (ACI 440.2R-08, 2008) (ACI 318, 2011)
- Realizar un análisis costo beneficio de las medidas evaluadas.

## CAPÍTULO I

### 1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

#### 1.1 Metodología

Se recolectará y se clasificará la información de la edificación hospitalaria del trabajo de investigación previo realizado por la Ing. Verónica Serrano e Ing. José Calle, sistematizando la información arquitectónica y de ingeniería, para realizar un análisis no lineal.

Mediante la utilización de software especializado se realizará un modelo matemático y analizaremos la estructura en el rango inelástico. Se ingresarán las cargas de acuerdo a la normativa vigente. (NEC - Peligro Sísmico, 2014), se analizarán las áreas de posible colapso parcial, progresivo y total, con esto se determinará las zonas de plastificación de la estructura.

Se seleccionarán medidas de reforzamiento y mitigación para disminuir la vulnerabilidad de la edificación hospitalaria. (FEMA 356, 2000), (ACI 440.2R-08, 2008), (ACI 318, 2011). Se obtendrá un presupuesto conceptual de la entidad hospitalaria dependiendo de su tipo y clasificación, para analizar si es conveniente reforzar la estructura actual o construir una nueva.

Se realizará el presupuesto de las medidas de reforzamiento y mitigación seleccionadas, se compararán los resultados de los presupuestos.

#### 1.2 Estado del arte

Para el desarrollo de planes de protección civil, ante terremotos, resulta necesario evaluar la vulnerabilidad y el riesgo sísmico para las estructuras de importancia especial. La asignación de ésta importancia es independiente de su tipología estructural. Se basa en el uso que se le da a la estructura. (Alvarez, 2012)

Para la estructura a construirse se clasificará en una de las categorías que se establece y se adoptará el correspondiente 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 - Riesgo Sísmico y Rehabilitación Estructural, 2014)

Los hospitales son estructuras esenciales porque son imprescindibles para la preservación y la atención de los seres humanos. En esta tesina y artículo científico se busca evaluar el comportamiento sísmico lineal y no lineal de la entidad hospitalaria Moreno Vázquez, por medio del software OpenSees.

### **1.3 Marco teórico**

#### **1.3.1 Definiciones (Anexo 1)**

#### **1.4 Datos generales**

El Hospital “Moreno Vázquez”, se encuentra ubicado en la provincia del Azuay, cantón Gualaceo, en la calle 9 de octubre 11-68 y Abelardo J Andrade. Pertenece a los establecimientos de salud distrito 01D04 Chordeleg – Gualaceo primer nivel en la zona 6, determinado por el Ministerio de Salud Pública. (Serrano & Calle, 2016)

El hospital tiene una capacidad resolutive alta, contando actualmente con personal calificado y con las siguientes especialidades médicas: Pediatría, Cirugía, Ginecología, y Clínica. Dotado de 25 camas: 9 Clínica, 6 Cirugía, 5 Ginecología, 5 Pediatría. En el área de hospitalización cuenta con su respectiva estación de enfermería, un cuarto para preparación de medicación, un cuarto para ropería y un cuarto para utensilios médicos, además está distribuido en 8 salas; una sala de pediatría, una sala de Ginecología, una sala de recuperación, una sala de aislamiento y una sala de cuidados intermedios. (Serrano & Calle, 2016)

#### **1.4.1 Información Arquitectónica y de Ingeniería (Anexo 2)**

### **1.5 CONCLUSIONES (Anexo 3)**

## CAPÍTULO II

### 2 MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA

El presente capítulo trata sobre la modelación de la estructura del hospital “Moreno Vázquez” en el software OpenSees, donde se especifica si es una modelación en 2D o 3D, se ingresa la geometría de la estructura, nudos de control, secciones de vigas y columnas, cargas aplicadas, acero longitudinal y transversal, tipo de análisis elástico o inelástico.

#### 2.1 Modelamiento en OpenSees

OpenSees es un software para simulación de estructuras y análisis geotécnicos, ingresando sismos, además tiene capacidades avanzadas para la modelación y análisis de la respuesta no lineal de sistemas estructurales, para ello utiliza varios algoritmos de solución. El software siempre está en constante desarrollo inclusive ya cuenta con una interfaz gráfica y su uso es libre.

El lenguaje de interpretación llamado lenguaje tcl, originado del acrónimo en inglés “Tool Command Language” o lenguaje de herramientas de comando, ha sido utilizado para soporte de los comandos de OpenSees, los cuales son usados para la definición de la geometría del problema, estados de carga, formulación y solución. Tcl provee útiles herramientas de programación, permite manipulación de variables, contiene estructuras básicas de control (if, while, for, foreach), evaluación de expresiones matemáticas y manipulación de archivos. (Mendoza, 2012)

#### 2.2 Geometría general

El Hospital Moreno Vázquez del cantón Gualaceo consta de un solo nivel y una altura 3.20 m, su construcción es mixta de pórticos hormigón armado, pórticos de acero estructural y una cubierta de acero estructural con cielo raso.

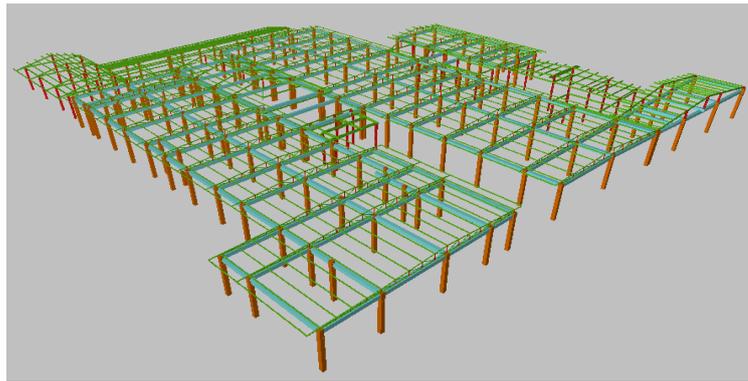


Figura 2.1 Geometría general del Hospital Moreno Vázquez

Fuente: (Serrano & Calle, 2016)

De la edificación se tomó dos pórticos para realizar el análisis dinámico no lineal:

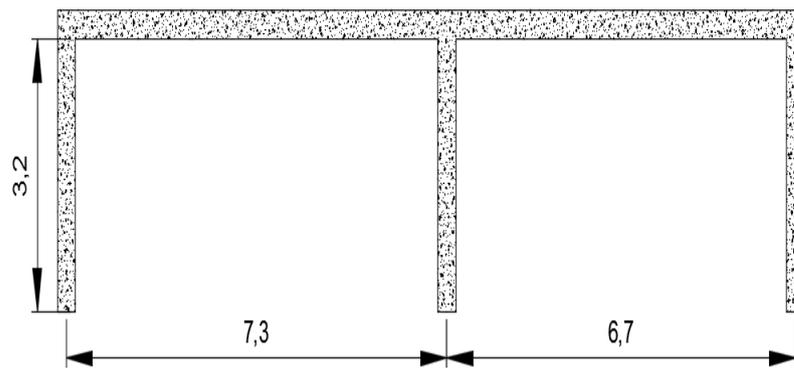


Figura 2.2 Pórtico 1

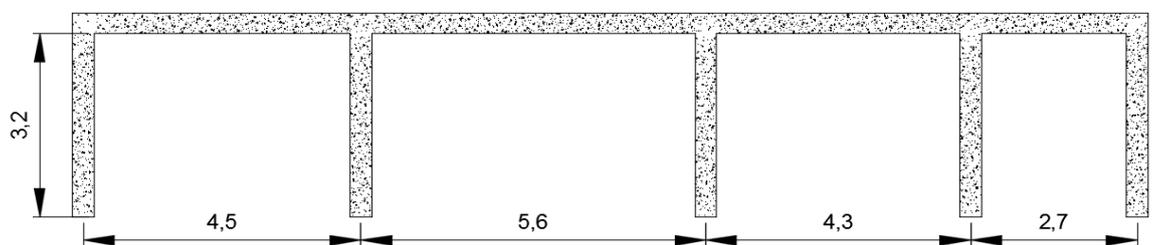


Figura 2.3 Pórtico 2

## 2.3 Especificaciones técnicas de los pórticos

### 2.3.1 Pórticos 1 y 2

Columnas de hormigón armado con una resistencia a la compresión de  $250 \text{ Kg/cm}^2$ , sección cuadrada de  $35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ , armado longitudinal  $4\Phi 16 \text{ mm}$ .

Vigas de hormigón armado con una resistencia a la compresión de  $250 \text{ Kg/cm}^2$ , una sección rectangular con un ancho de  $30 \text{ cm}$  y un peralte de  $35 \text{ cm}$ , armado longitudinal  $6\Phi 20 \text{ mm}$ .

## 2.4 Espectro de diseño

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC - Peligro Sísmico, 2014) especifica los parámetros necesarios para la construcción del espectro de diseño para un período de retorno de 475 años, con un amortiguamiento del 5%; se establece los siguientes factores.

**Fa:** Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.

**Fd:** Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para el diseño en roca.

**Fs:** Coeficiente de amplificación de suelo.

Tabla 2.1 Parámetros de construcción de espectro de diseño 475 años

Ubicación	Gualaceo
Z	0.25
n	2.48
I (f. import.)	1.5
Fa	1.3
Fd	1.28
Fs	0.94
r	1

### 2.4.1 Espectro de diseño (475 años)

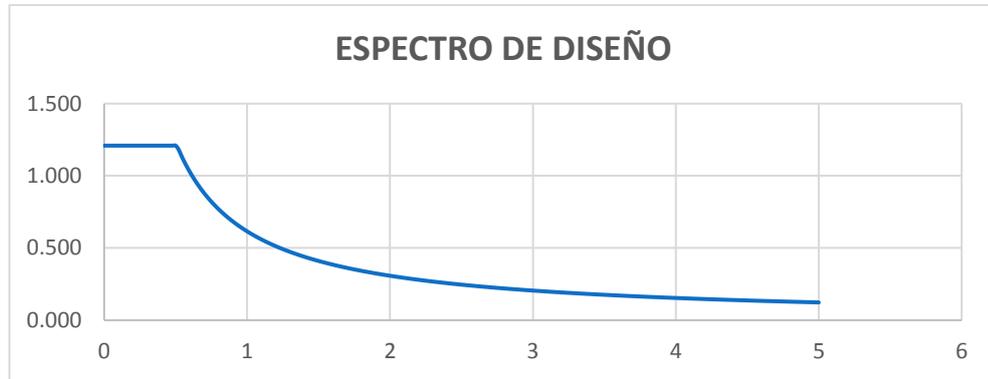


Figura 2.4 Espectro de diseño para un período de retorno de 475 años, púrtico 1

### 2.4.2 Espectro de diseño para un período de retorno de 2500 años

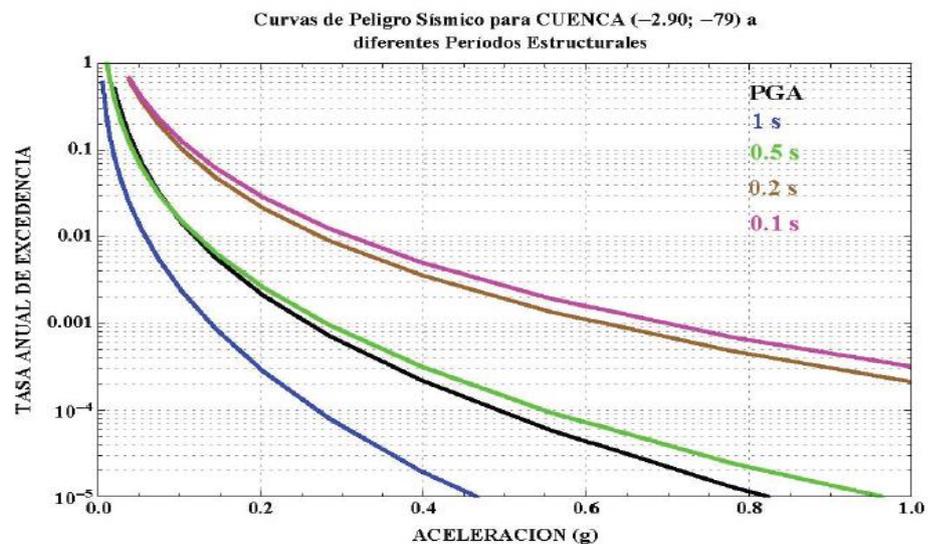


Figura 2.5 Curva de peligro sismico Cuenca

Fuente: (NEC - Peligro Sismico, 2014)

#### 2.4.2.1 Tasa anual de excedencia

Para las estructuras esenciales, se deberá verificar un correcto desempeño sismico en el rango inelástico para el No-colapso (nivel de prevenci3n de colapso), ante un terremoto de 2500 años de período de retorno (probabilidad anual de excedencia 0.0004). (NEC - Riesgo Sismico y Rehabilitaci3n Estructural, 2014) .

### 2.4.2.2 Parámetros necesarios para la definición del espectro de 2500 años

Tabla 2.2 Parámetros de construcción de espectro de diseño 2500 años

Ubicación	Gualaceo
Z	0.34
n	2.48
I (f. import.)	1.5
Fa	1.23
Fd	1.36
Fs	1.24
r	1

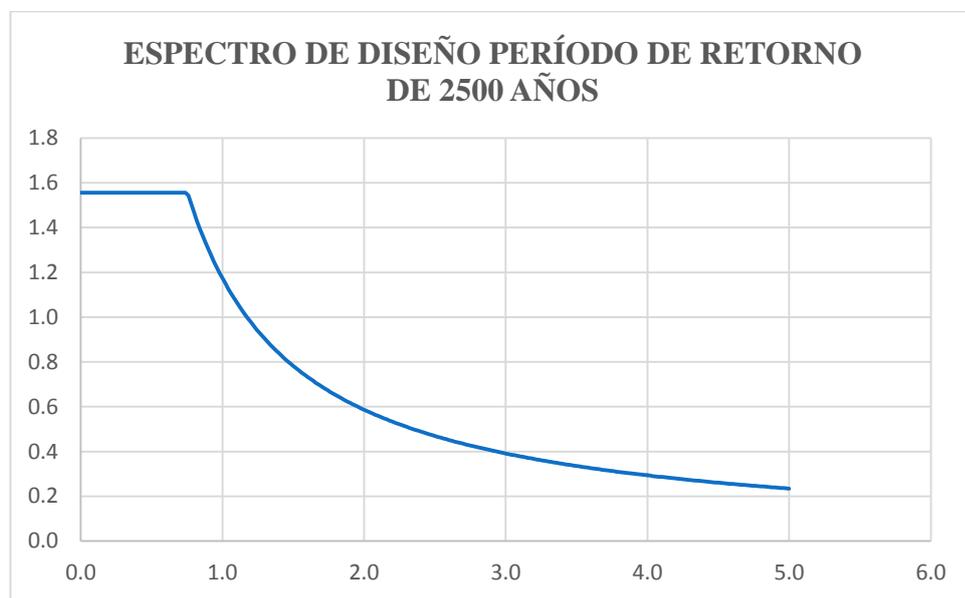


Figura 2.6 Espectro de diseño, período de retorno de 2500 años

## 2.5 Bases del diseño

En las estructuras de ocupación especial y edificaciones esenciales, se aplicarán verificaciones de comportamiento inelástico para diferentes niveles de terremotos. La resistencia mínima de diseño para todas las estructuras deberá basarse en las fuerzas sísmicas de diseño establecidas en el presente capítulo. (NEC, 2014)

### 2.5.1 Nivel de prevención de colapso (sismo extremo)

Impedir el colapso de la estructura ante un terremoto de 2500 años de período de retorno (sismo severo, probabilidad anual de excedencia 0.0004 en las curvas de peligro sísmico). (NEC - Peligro Sísmico, 2014)

### 2.5.2 Estructuras de ocupación esencial y especial

Tabla 2.3 Nivel de desempeño de estructuras esenciales

NIVEL DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL	ESTRUCTURAS DE OCUPACION ESPECIAL	ESTRUCTURAS ESENCIALES	TASA ANUAL DE EXCENDENCIA
<b>Daño</b>	Si	SI	0.00211
<b>Colapso</b>	Si	Si	0.0004

Fuente: (NEC - Riesgo Sísmico y Rehabilitación Estructural, 2014)

## 2.6 Modelo de análisis de las fuerzas sísmicas

### 2.6.1 No lineales

Se realiza dos tipos de Análisis: dinámico espectral, paso a paso en el tiempo. (NEC - Riesgo Sísmico y Rehabilitación Estructural, 2014)



Figura 2.7 Espectro de diseño fuentes diferentes

Fuente: (NEC - Riesgo Sísmico y Rehabilitación Estructural, 2014)

### 2.6.2 Curvas de peligro sísmico

Para el diseño de estructuras de ocupación especial y/o esencial, como puentes, obras portuarias y otras estructuras diferentes a las de edificación, es necesario utilizar diferentes niveles de peligro sísmico con el fin de verificar el cumplimiento de diferentes niveles de desempeño. (NEC - Riesgo Sísmico y Rehabilitación Estructural, 2014)

### 2.6.3 PGA (Peak Ground Acceleration)

Aceleración sísmica máxima (pico) horizontal en roca.

### 2.7 Escalamiento de sismos

El escalamiento de los tres sismos se lo realiza de acuerdo a la norma ASCE 7-05, procedemos a escalar con los pasos especificados en el libro de “ (Charney, 2009)”.

El escalamiento se hace tomando en cuenta tres sismos ocurridos en nuestro país en abril del 2016.

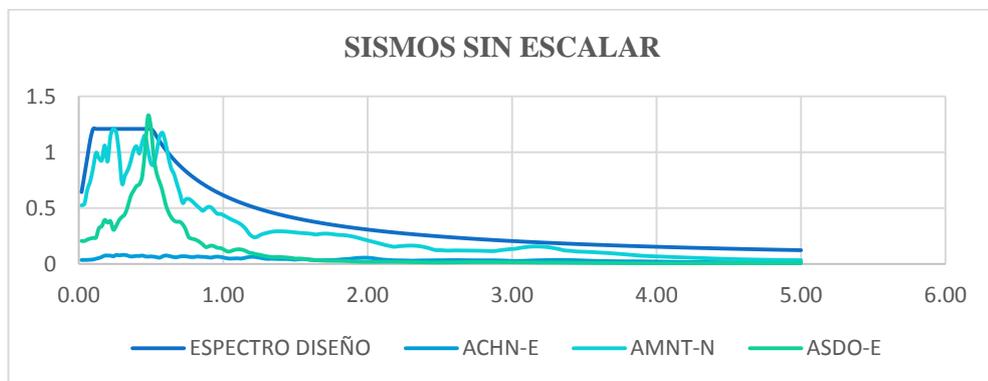


Figura 2.8 Espectros sin escalar

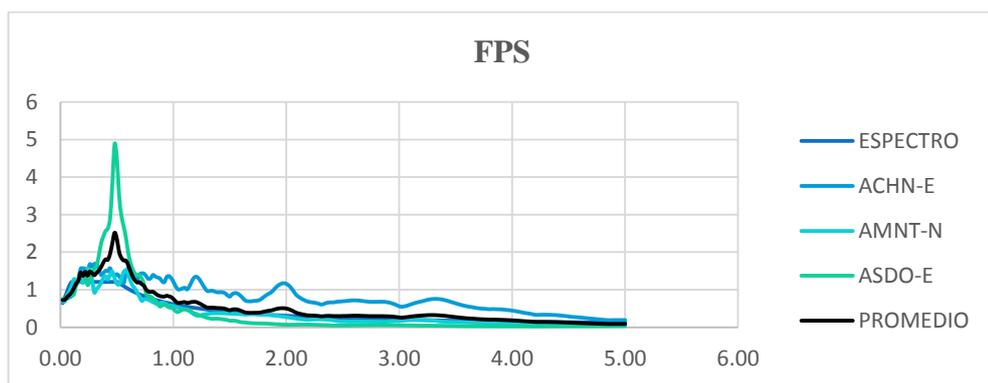


Figura 2.9 Sismos multiplicados por el factor FPS

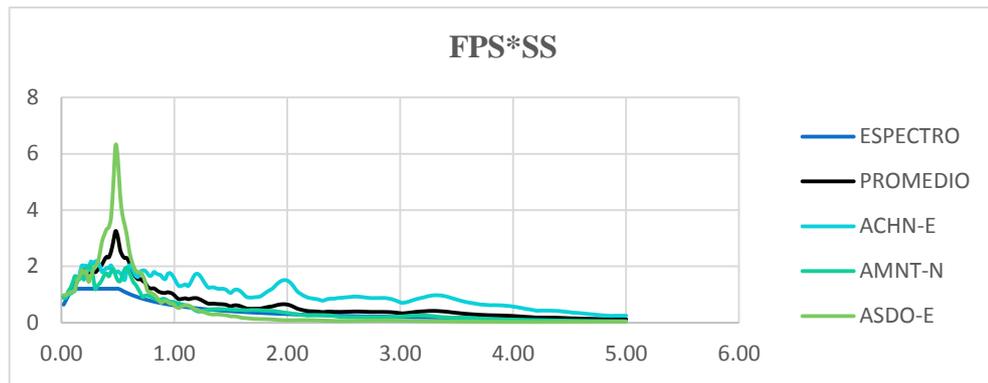


Figura 2.10 Sismos escalados

### 2.8 Análisis dinámico no lineal en OpenSees

Ingresar los pórticos en OpenSees: se ingresa la geometría, sección y material de cada pórtico. En análisis no lineal su principal comando es elasticBeamColumn, donde crea el elemento columna y viga elástica.

Tabla 2.4 Rutina element elasticBeamColumn

<b>\$ eleTag</b>	<b>Identificador del material</b>
<b>\$ INode de \$ JNode</b>	Nodos finales
<b>\$ A</b>	Área de sección transversal de elemento
<b>\$ E</b>	El módulo de Young
<b>\$ G</b>	Módulo de corte
<b>\$ J</b>	Momento de torsión de inercia de la sección transversal
<b>\$ Iz</b>	Segundo momento de área sobre el eje z local de
<b>\$ Iy</b>	Segundo momento de área sobre el eje y locales
<b>\$ transfTag</b>	Identificador
<b>\$ massDens</b>	Masa elemento por unidad de longitud
<b>-cMass</b>	Para formar la matriz de masa consistente (opcional,
<b>element elasticBeamColumn \$eleTag \$iNode \$jNode \$A \$E \$G \$J \$Iy \$Iz</b> <b>\$transfTag &lt;-mass \$massDens&gt; &lt;-cMass&gt;</b>	

Fuente: (OpenSees, 2006)

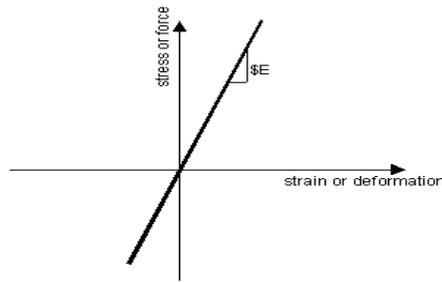


Figura 2.11 Curva esfuerzo deformación del material elástico

Fuente: (OpenSees, 2006)

### 2.8.1 Análisis dinámico no lineal

Para el análisis dinámico no lineal la estructura se modela de manera similar al dinámico lineal, a diferencia que se incorpora el comportamiento inelástico de los elementos estructurales por las leyes de histéresis. (Alvarez, 2012)

Para realizar el análisis dinámico no lineal se utiliza la ecuación de movimiento de una estructura para sistema de varios grados de libertad. La ecuación de movimiento se puede deducir por el principio de D'Alembert de la siguiente forma:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t)$$

Dónde:

u: es el desplazamiento

M: la matriz de masa

C: la matriz de amortiguamiento

K: la matriz de rigidez

f (t): la fuerza sísmica

### 2.8.2 Concrete 01 (MODELO DEL HORMIGÓN)

OpenSees presenta una amplia variedad de modelos que describen el comportamiento del hormigón; para la presente investigación se optó por el uso del **concrete01** o concreto 01, que es la representación del diagrama esfuerzo-deformación de un elemento de hormigón sometido a una carga de compresión basada en el modelo de Kent-Scott-Park (Scott et al. 1982), que considera

exclusivamente el hormigón en compresión y sin resistencia a la tracción propia del material. (Celi, 2014)

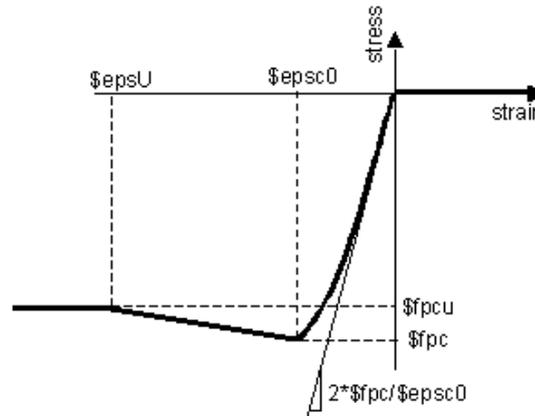


Figura 2.12 Curva esfuerzo-deformación, típica del material concrete01

Fuente: (OpenSees, 2006)

Tabla 2.5 Rutina uniaxialMaterial Concrete01

<b>uniaxialMaterial Concrete01</b>	<b>\$matTag</b>	<b>\$fpc</b>	<b>\$eps_c0</b>	<b>\$fpcu</b>	<b>\$eps_cU</b>
<b>\$matTag</b>	Nombre asignado al material				
<b>\$fpc</b>	Resistencia máxima a la compresión				
<b>\$eps_c0</b>	Deformación correspondiente a <b>\$fpc</b>				
<b>\$fpcu</b>	Esfuerzo residual				
<b>\$eps_cU</b>	Deformación correspondiente a <b>\$fpcu</b>				

Fuente: (OpenSees, 2006)

### 2.8.3 Steel01 (MODELO DE ACERO DE REFUERZO)

El modelo Steel01 contempla una curva esfuerzo – deformación, compuesta por una primera sección de comportamiento elástico lineal propia del material, seguida de un comportamiento bilineal producto de un endurecimiento cinemático, e incluso opcionalmente en esta sección se permite tomar en consideración el endurecimiento isotrópico. (Celi, 2014)

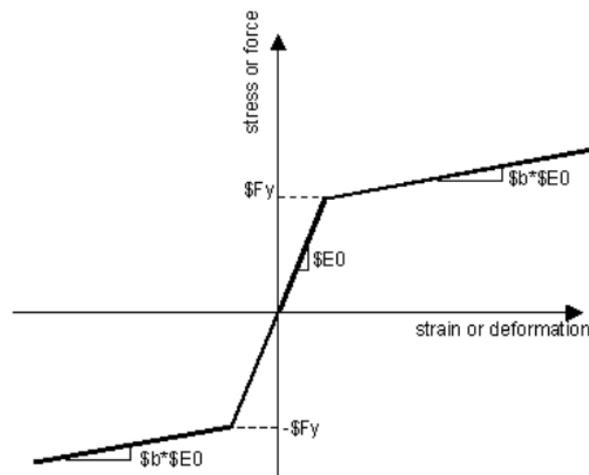


Figura 2.13 Curva esfuerzo-deformación, típica del material Steel01

Fuente: (OpenSees, 2006)

Tabla 2.6 Rutina uniaxialMaterial Steel01

<b>uniaxialMaterial Steel01</b>	<b>\$matTag \$Fy \$E0 \$b &lt;\$a1 \$a2 \$a3 \$a4&gt;</b>
<b>\$matTag</b>	Nombre asignado al material
<b>\$Fy</b>	Esfuerzo de Fluencia
<b>\$E0</b>	Pendiente inicial elástica
<b>\$b</b>	Ratio esfuerzo-endurecimiento(ratio entre la pendiente elástica y la pendiente post fluencia)
<b>&lt;\$a1 \$a2 \$a3 \$a4&gt;</b>	Parámetros de endurecimiento isotrópico

Fuente: (OpenSees, 2006)

Una vez definido el tipo de material de cada pórtico a utilizar en OpenSees, realizamos un análisis tiempo-historia para un espectro de diseño con un período de retorno de 475 años y 2500 años, con los registros de aceleraciones previamente escalados para cada período de retorno, además se realiza un análisis estático no lineal (Pushover).

**2.8.4 Análisis tiempo-historia (período de retorno 475 años)**

**2.8.4.1 Análisis con un período de retorno de 475 años pórtico 1**

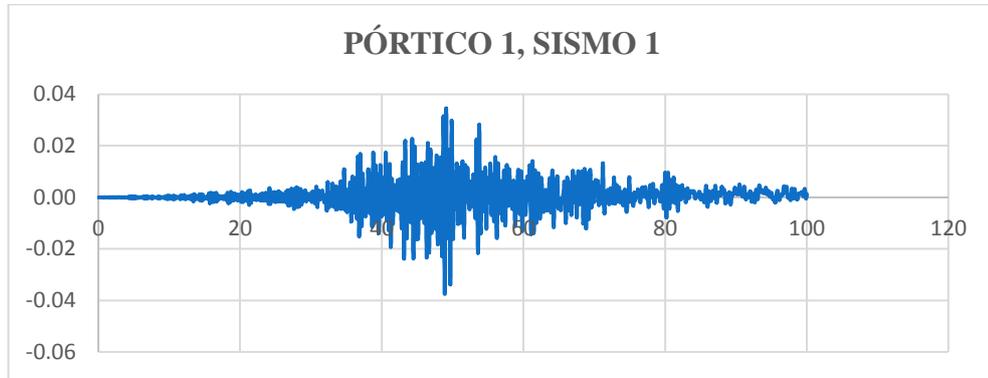


Figura 2.14 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 1

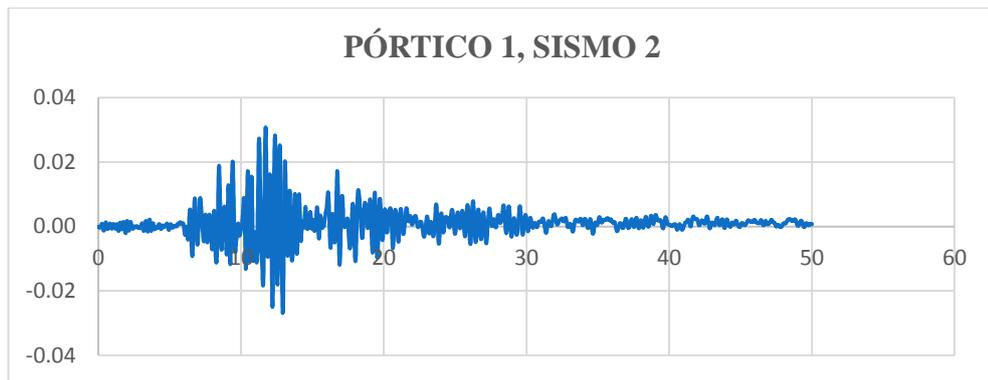


Figura 2.15 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 2

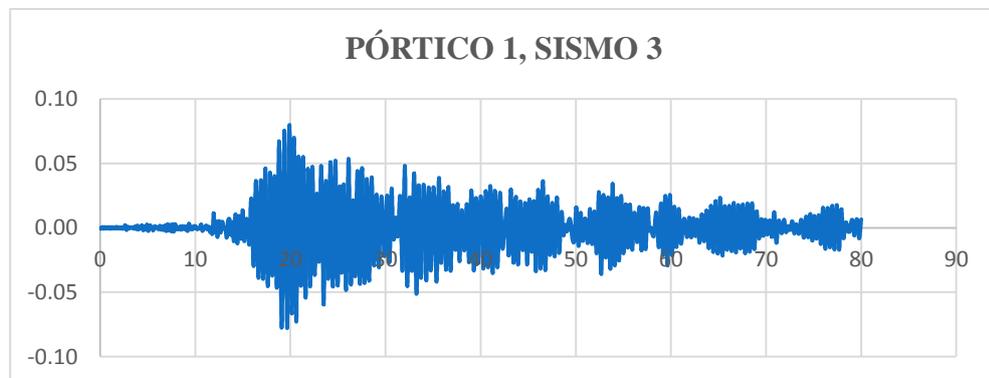


Figura 2.16 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 3

Tabla 2.7 Deformaciones y derivas pórtico 1

<b>PÓRTICO 1 ESPECTRO DE DISEÑO 475 AÑOS</b>			
SISMO	1_AGYE-E	2_AMNT-N	3_ASDO-E
DEFORMACIÓN (m)	0.010802375	0.009607094	0.024972656
DERIVA (%)	1.08%	0.96%	2.49%

La Norma Ecuatoriana de la Construcción nos especifica que las derivas de una edificación tienen que ser menor al 2%; analizando el pórtico 1 se observa que tiene una deformación residual y una deriva del 2.49% en el sismo 3\_ASDO-E por lo tanto no se cumple con lo que especifica la norma ecuatoriana de la construcción.

#### 2.8.4.2 Análisis con un período de retorno de 475 años pórtico 2

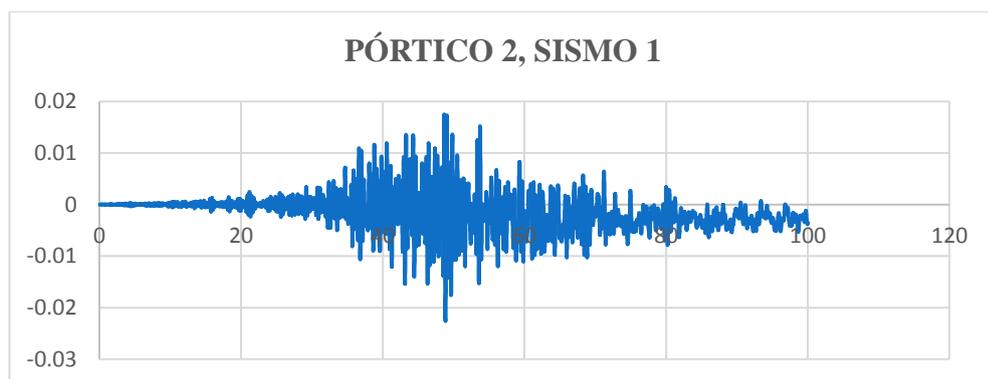


Figura 2.17 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 1

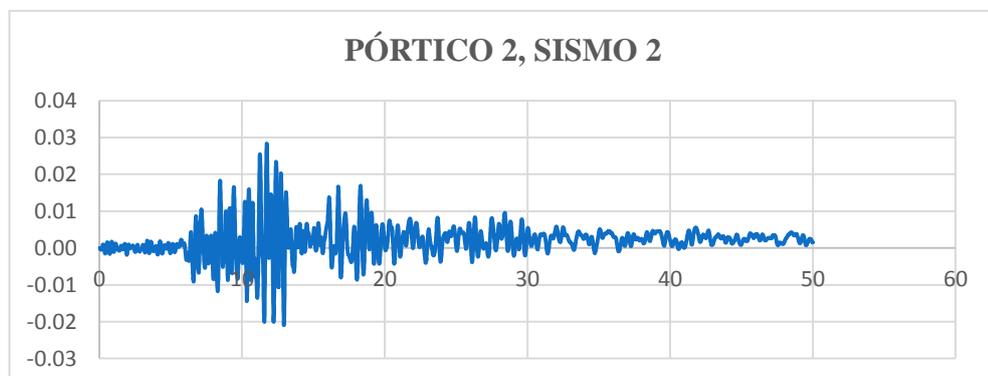


Figura 2.18 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 2

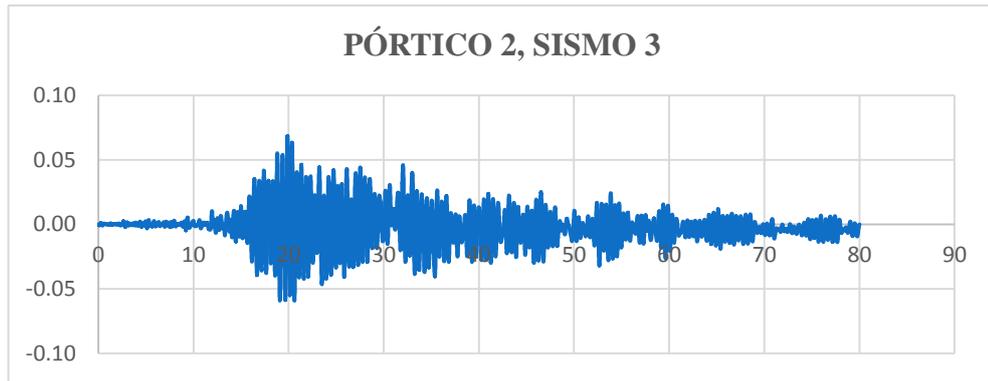


Figura 2.19 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 3

Tabla 2.8 Deformación y derivas pórtico 2

PÓRTICO 2 ESPECTRO DE DISEÑO 475 AÑOS			
SISMO	1_AGYE-E	2_AMNT-N	3_ASDO-E
DEFORMACIÓN (m)	0.0174341	0.028347	0.068581
DERIVA (%)	0.50%	0.88%	2.14%

### 2.8.5 Análisis tiempo-historia (período de retorno 2500 años)

#### 2.8.5.1 Análisis con un período de retorno de 2500 años pórtico 1

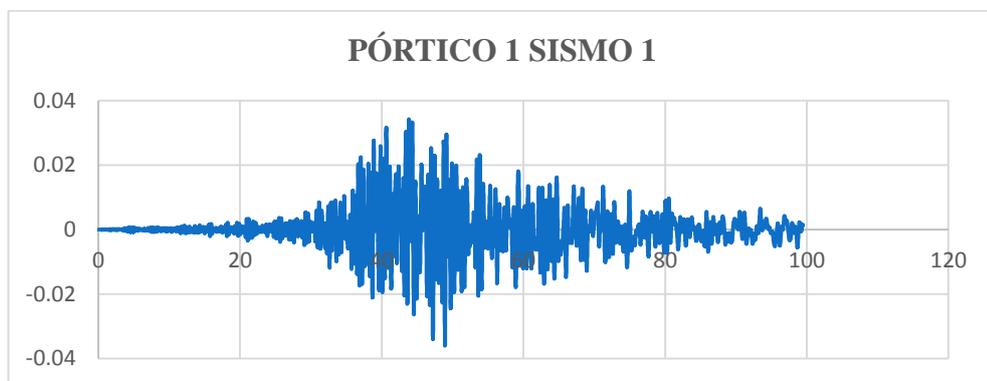


Figura 2.20 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 1

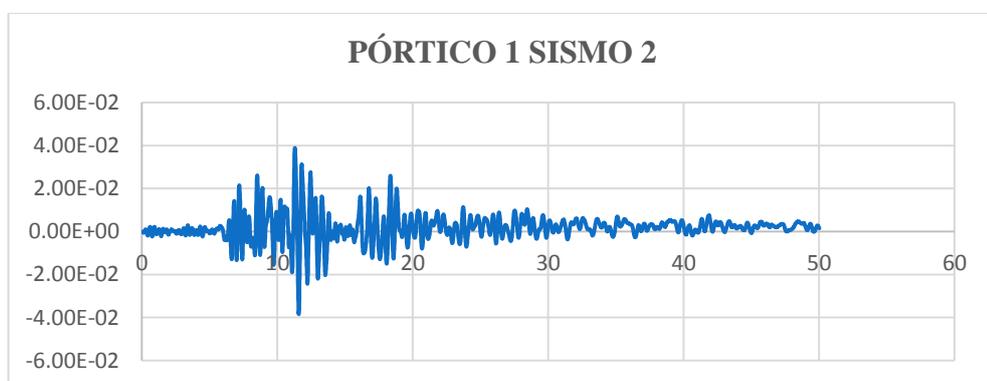


Figura 2.21 Análisis tiempo historia pórtico 1 sismo 2

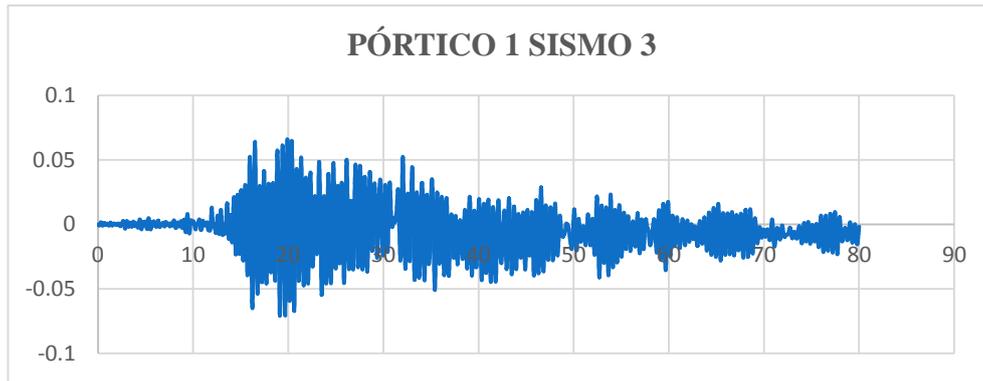


Figura 2.22 Análisis tiempo historia pÓrtico 1 sismo 3

Tabla 2.9 Deformación y derivas 2500 años

PÓRTICO 1 ESPECTRO DE DISEÑO 2500 AÑOS			
SISMO	1_AGYE-E	2_AMNT-N	3_ASDO-E
DEFORMACIÓN (m)	0.034263	0.034263	0.0661039
DERIVA (%)	1.07%	1.21%	2.06%

### 2.8.5.2 Análisis con un período de retorno de 2500 años pÓrtico 2

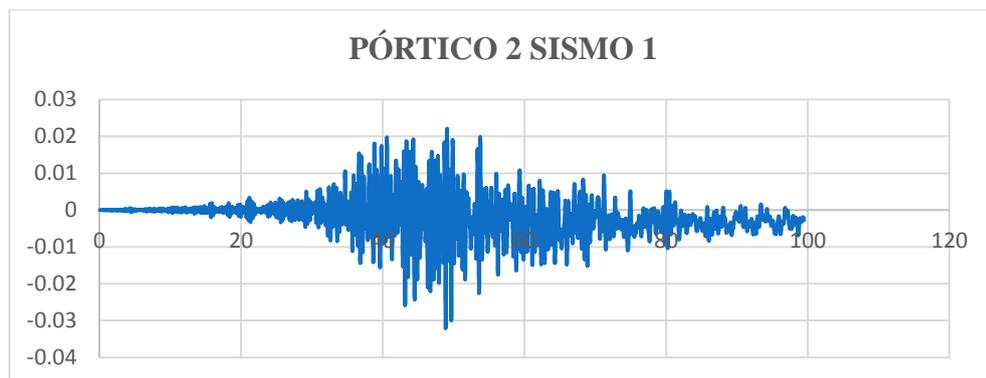


Figura 2.23 Análisis tiempo historia pÓrtico 2 sismo 1

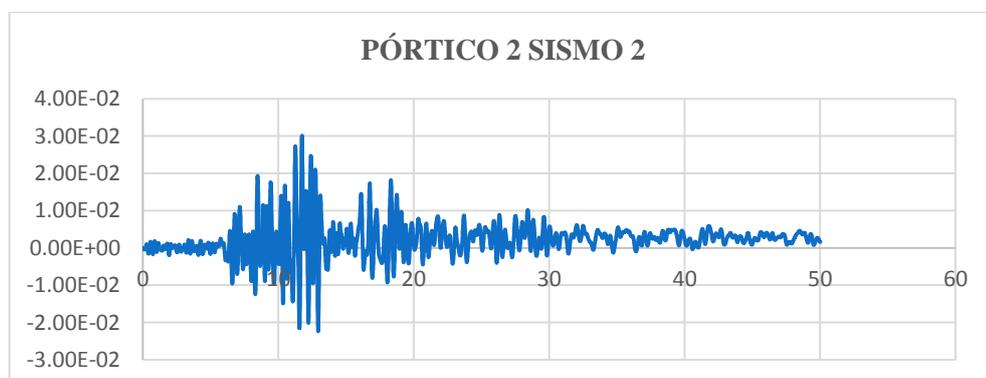


Figura 2.24 Análisis tiempo historia pÓrtico 2 sismo 2

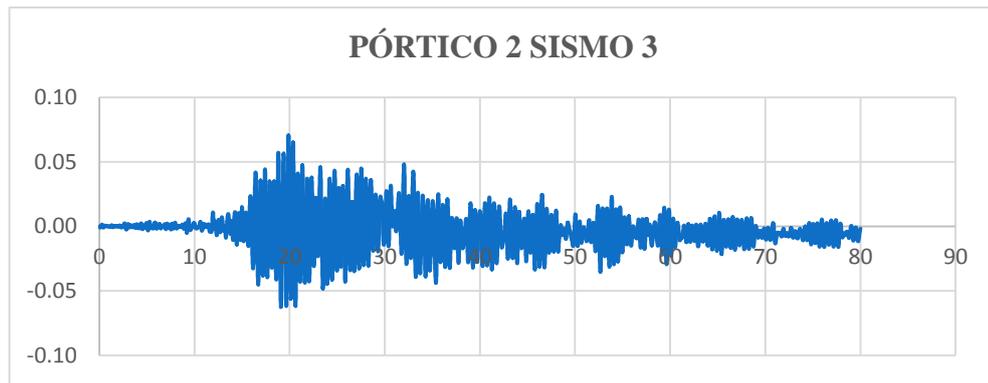


Figura 2.25 Análisis tiempo historia pórtico 2 sismo 3

Tabla 2.10 Deformación y derivas pórtico 2

<b>PÓRTICO 2 ESPECTRO DE DISEÑO 2500 AÑOS</b>			
<b>SISMO</b>	<b>1_AGYE-E</b>	<b>2_AMNT-N</b>	<b>3_ASDO-E</b>
DEFORMACIÓN (m)	0.022106	0.0300831	0.070525
DERIVA (%)	0.69%	0.94%	2.20%

## 2.9 Análisis estático no lineal (Pushover)

El análisis pushover nos permite visualizar la capacidad resistente de la estructura utilizando la combinación de cargas laterales efectos P-Delta; nos relaciona el cortante basal con el desplazamiento lateral.

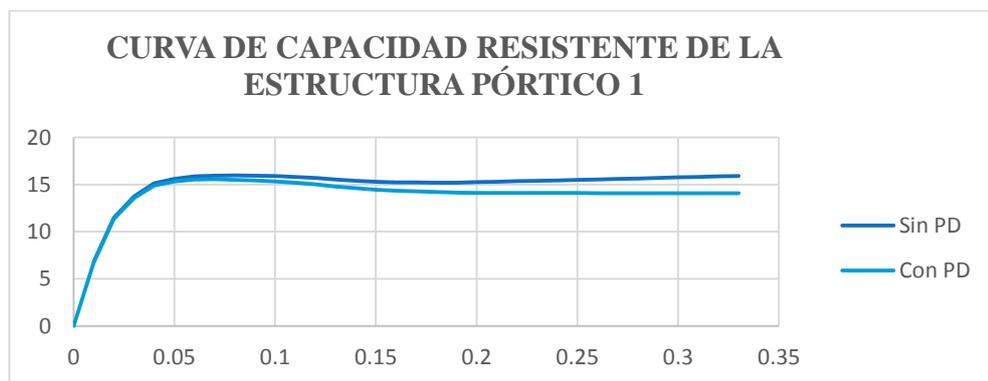


Figura 2.26 Curva de capacidad resistente pórtico 1

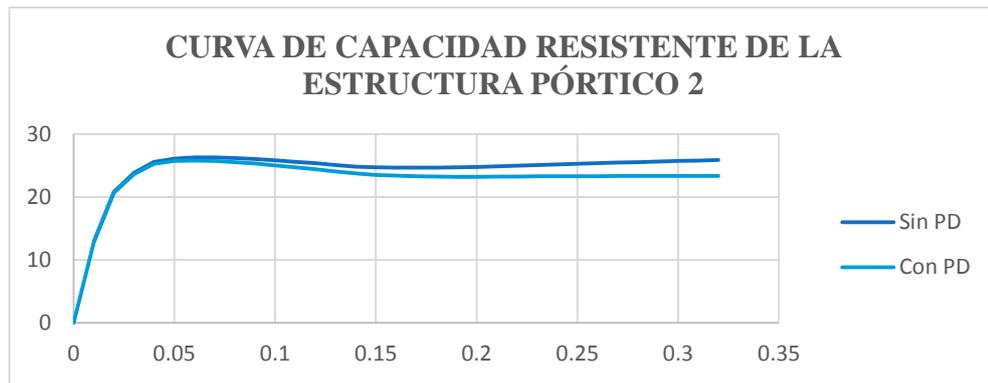


Figura 2.27 Curva de capacidad resistente pórtico 2

### 2.10 Análisis de vibración libre

Determinamos el amortiguamiento de la estructura utilizando el software OpenSees con interface en Matlab teniendo como resultado un amortiguamiento del 3%.

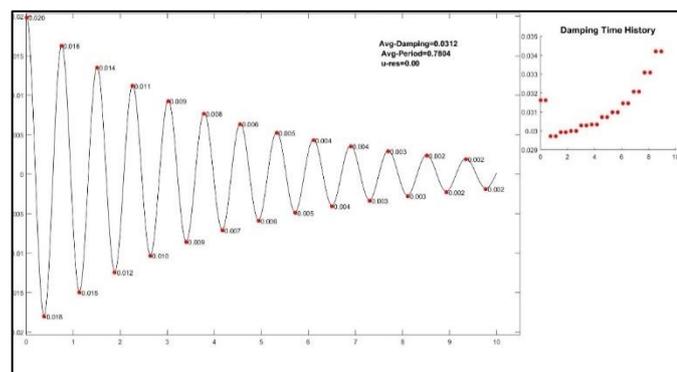


Figura 2.28 Análisis de vibración libre de la estructura

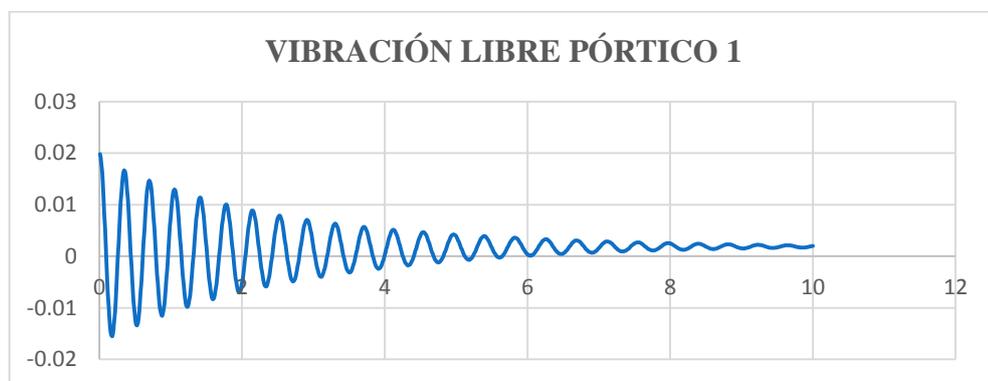


Figura 2.29 Vibración libre pórtico 1

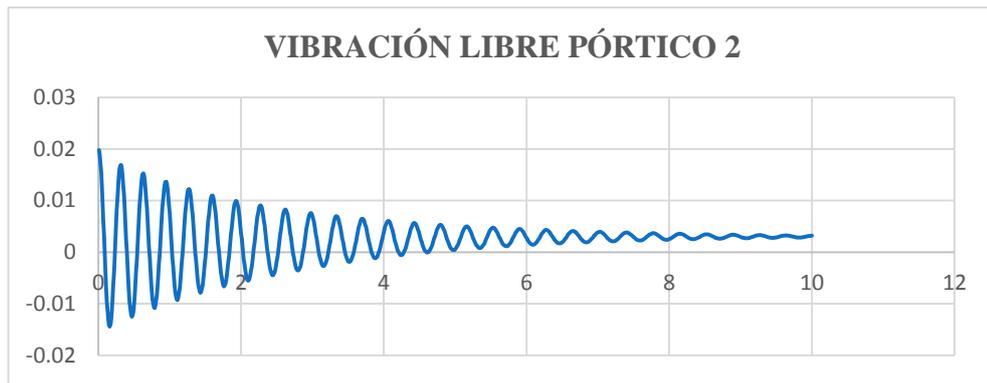


Figura 2.30 Vibración libre pórtico 2

### 2.11 Curva de Histéresis sin aislador

Nos determina la energía de disipación de cada pórtico.

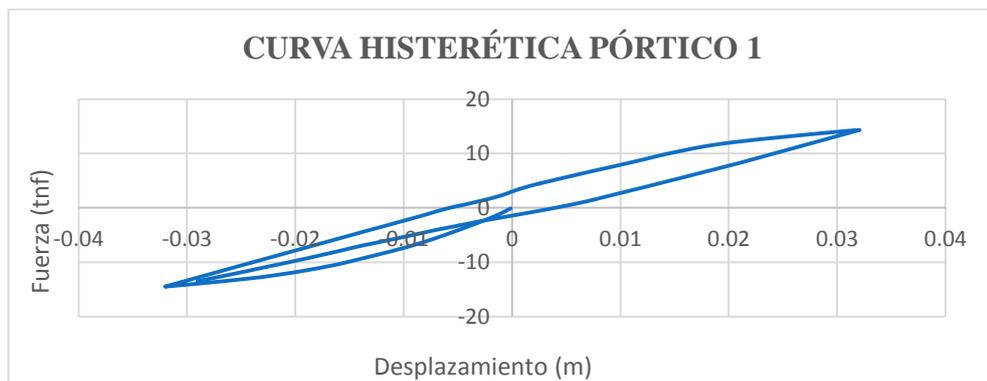


Figura 2.31 Curva histéresis pórtico 1

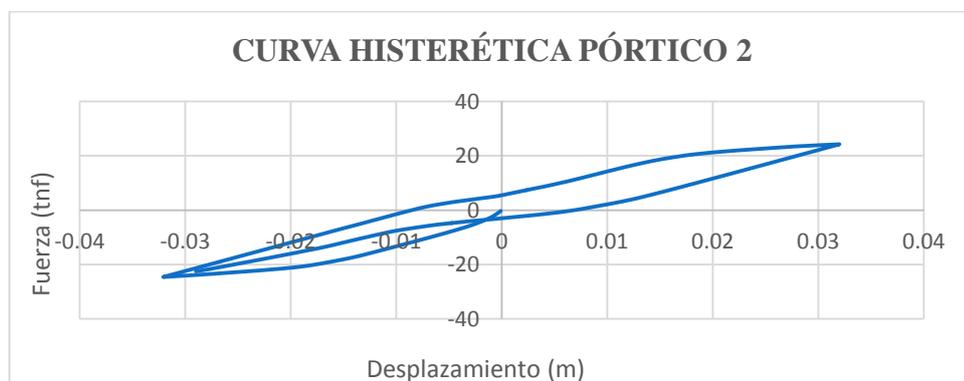


Figura 2.32 Curva histéresis pórtico 2

## CAPÍTULO III

### 3 MEDIDA DE MITIGACIÓN

En el presente apartado una vez realizado el análisis dinámico no lineal de la estructura se presenta como medida de mitigación un aislamiento basal sísmico; como principal objetivo es disminuir las derivas de la estructura, el aislamiento sísmico a utilizar es un aislador sísmico LRB.

#### 3.1 Aislamiento basal sísmico

El concepto de aislación sísmica consiste en incorporar un sistema altamente flexible en la dirección horizontal, permitiendo desligar el movimiento de la estructura del movimiento del suelo. De acuerdo a Rodrigo Retamales, ingeniero civil de la Universidad de Chile y especialista en protección sísmica de RBA, el sistema de aislación funciona como un “espejo” que refleja la energía del sismo, evitando que ésta ingrese a la estructura, haciendo que su respuesta sísmica sea considerablemente menor. (Alfredo Saavedra L, 2013)

El aislamiento sísmico puede ser una estrategia de rehabilitación eficaz si los resultados de una evaluación sísmica muestran deficiencias atribuibles a las fuerzas sísmicas o excesivas demandas de deformación. (FEMA 356, 2000)

#### 3.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) poseen un núcleo de plomo, ubicado en el centro del aislador, que permite aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 20-30%. Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un sismo, el núcleo de plomo fluye, incurriendo en deformaciones plásticas y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original,

mientras el núcleo de plomo recristaliza. De esta forma el sistema queda listo para un nuevo evento sísmico. (Nitsche, 2012)

### 3.3 Pre-dimensionamiento del aislador sísmico (LBR)

#### 3.3.1 Características mecánicas de los aisladores elastómeros

Para el pre-dimensionamiento del aislador sísmico lo realizamos bajo la norma (ASCE 7-10, 2010)

##### 3.3.1.1 Rigidez horizontal

Esta propiedad mecánica es una de las más importante de los aisladores LBR es su rigidez horizontal dada por:

$$k_H = \frac{GA}{t_r}$$

Dónde:

$K_H$ : Rigidez horizontal

$G$ : Módulo de corte del elastómero

$A$ : Área de la sección de goma

$t_r$  : Altura total de goma del aislador

El desplazamiento horizontal máximo  $D$  está relacionado con la deformación máxima de corte  $\gamma$  por:

$$\gamma = \frac{D}{t_r}$$

##### 3.3.1.2 Rigidez vertical

$$k_V = \frac{E_C A}{t_r}$$

$K_V$ : Rigidez vertical

$A$ : Área de la sección transversal del aislador

$t_r$ : Espesor total del caucho

$E_C$ : Módulo de compresión instantáneo del caucho

$E_C$ : Capa de caucho está controlado por el factor de forma  $S$ , definido como:

$$S = \frac{\text{Área de Carga}}{\text{Área libre de carga}}$$

### 3.3.2 Características mecánicas de los aisladores de plomo

La rigidez efectiva de un aislador de buje de plomo, definido en base a las cargas de pico a pico, se reduce constantemente con el desplazamiento. En términos de los parámetros básicos  $K_1$ ,  $K_2$  y  $Q$ , está dado por:

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad D \geq D_y$$

$D_y$ : Desplazamiento de fluencia.

#### 3.3.2.1 Modelado del aislamiento elastómero por modelo bilineal

Todos los aislamientos están modelados por un modelo bilineal basado en los tres parámetros  $K_1$ ,  $K_2$  y  $Q$

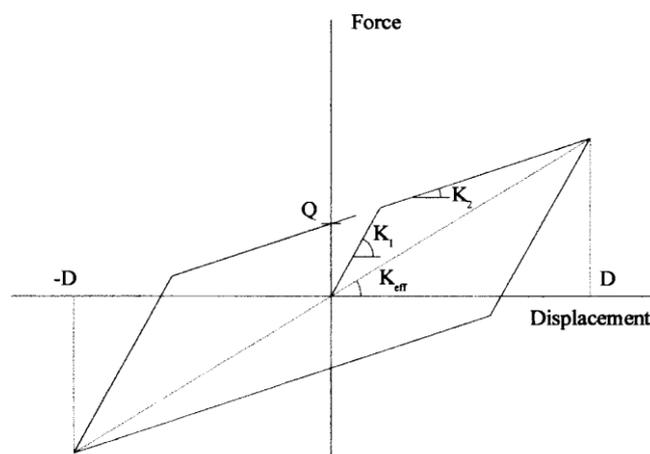


Figura 3.1 Curva de histéresis

Fuente: (Charney, 2009)

La rigidez efectiva, definida como la pendiente de la recta secante de los valores pico a pico en un bucle de histéresis, está dada por:

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad D \geq D_y$$

$D_y$  : Desplazamiento de fluencia definido por:

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2}$$

Y el área del bucle de histéresis (la energía disipada por ciclo),  $WD$ , se da como:

$$WD = 4Q(D - D_y)$$

La amortiguación efectiva  $\beta_{eff}$  se define por:

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2}$$

### 3.3.3 Pre-dimensionamiento general del aislador con núcleo de plomo

El procedimiento de un sistema de aislador de núcleo de plomo que proporciona el mismo período y amortiguación global al desplazamiento de diseño obtenido para el sistema de alta amortiguación de goma se detalla a continuación.

Desplazamiento mínimo de diseño:

$$D_d = \frac{g S_{D1} T_o}{4\pi^2 B_D}$$

$g$ : Aceleración

$S_{D1}$ : Parámetro del espectro de aceleración en 1s

$T_o$  : Período objetivo

$B_D$  : Coeficiente del amortiguamiento efectivo

**Table 17.5-1 Damping Coefficient,  $B_D$  or  $B_M$** 

Effective Damping, $\beta_D$ or $\beta_M$ (percentage of critical) <sup>a,b</sup>	$B_D$ or $B_M$ Factor
$\leq 2$	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
$\geq 50$	2.0

Figura 3.2 Coeficiente de amortiguamiento ASCE 7-10

Fuente: (ASCE 7-10, 2010)

Rigidez efectiva

$$K_{eff} = W \left( \frac{2\pi}{T_0} \right)^2$$

$W$ : Peso de la estructura

$T_0$ : Período objetivo

Energía de disipación

$$W_D = 2\pi K_{eff} \beta_o D_d^2$$

$\beta_o$ =Amortiguamiento objetivo de la tabla

Fuerza Característica

$$Q_0 = \frac{W_D}{4(D_d - D_y)}$$

$D_y$ : Desplazamiento de fluencia

**Nota:** Como no se conoce  $D_y$ , se debe aproximar la fuerza característica despreciando el desplazamiento de fluencia.

**Proceso iterativo**

Calculo de la fuerza característica sin considerar el desplazamiento de fluencia.

$$Q_0 = \frac{W_D}{4(D_d)}$$

Rigidez post-fluencia

$$K_2 = K_{eff} - \frac{Q}{D_d}$$

Rigidez inicial

$$K_1 = 10K_2$$

Desplazamiento de fluencia

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2}$$

Fuerza característica

$$Q_0 = \frac{W_D}{4(D_d - D_y)}$$

**Nota:** Calculada la fuerza característica se vuelve a calcular  $K_2$   $K_1$   $D_y$  hasta que el valor de fuerza característica converja.

### 3.3.4 Dimensión del aislador

Área de plomo

$$A_p = \frac{Q}{F_y}$$

$F_y$ : Esfuerzo d fluencia del plomo 10.52 Mpa

Diámetro del núcleo de plomo

$$D_p = \sqrt{\frac{4A_p}{n_{LBR}\pi}}$$

$n_{LBR}$ : Numero de aisladores

Área de goma

$$A_e = \frac{t_r}{G_e} K_2$$

$t_r$ : Altura del caucho

$G_e$ : Módulo de corte del caucho 0.4 Mpa

Diámetro de goma

$$D_e = \sqrt{\frac{4(A_e + 0.99A_p)}{n_{LBR}\pi}}$$

### 3.4 Dimensiones de los aisladores sísmico (LBR)

Se procede con el pre-dimensionamiento del aislador siguiendo la norma ASCE 7-10, obteniendo las dimensiones del aislador sísmico para cada pórtico.

Tabla 3.1 Dimensiones de aisladores sísmicos

Pórtico	Desplazamiento(cm)	h(cm)	Dp(cm)	De(cm)
1	20.7	20	2	15
2	20.4	20	2	10

### 3.5 Modelamiento del aislador sísmico (LBR) en OpenSees

Para determinar el aislador sísmico (LBR) el identificador en OpenSees es uniaxialMaterial KikuchiAikenLRB, produciendo curvas de histéresis no lineales.

Tabla 3.2 Rutina uniaxialMaterial KikuchiAikenLRB

uniaxialMaterial KikuchiAikenLRB \$matTag \$type \$ar \$hr \$gr \$ap \$tp \$alph \$beta <-T \$temp> <-coKQ \$rk \$rq> <-coMSS \$rs \$rf>	
\$ matTag	Identificador del material
\$ type	Tipo de caucho
\$ AR	Área de aislador de caucho [unidad: m ^ 2]
\$ h	Espesor total de caucho [unidad: m]
\$ gr	Módulo de corte del caucho [unidad: N / m ^ 2]
\$ ap	Área del núcleo de plomo [unidad: m ^ 2]
\$ tp	Tensión de fluencia del plomo [unidad: N / m ^ 2]
\$ alph	Módulo de corte de plomo [unidad: N / m ^ 2]
\$ beta	Relación de rigidez inicial a la rigidez producida

Fuente: (OpenSees, 2006)

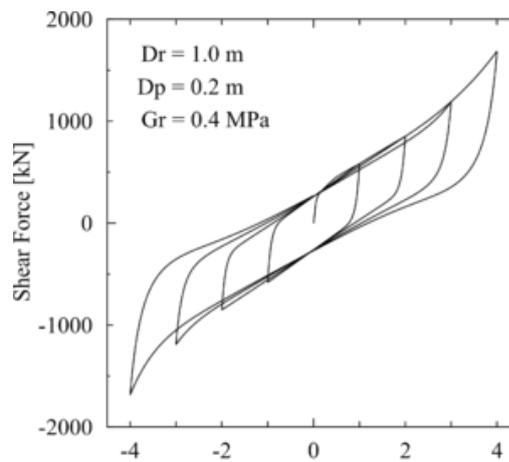


Figura 3.3 Curva de histéresis aislador sísmico

Fuente: (OpenSees, 2006)

Para obtener las curvas de histéresis se procede a modelar cada uno de los pórticos en OpenSees.

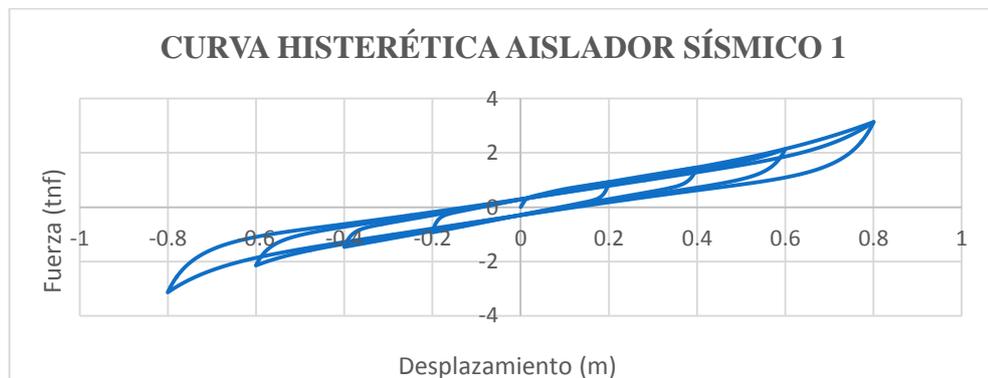


Figura 3.4 Curva histerética aislador sísmico 1

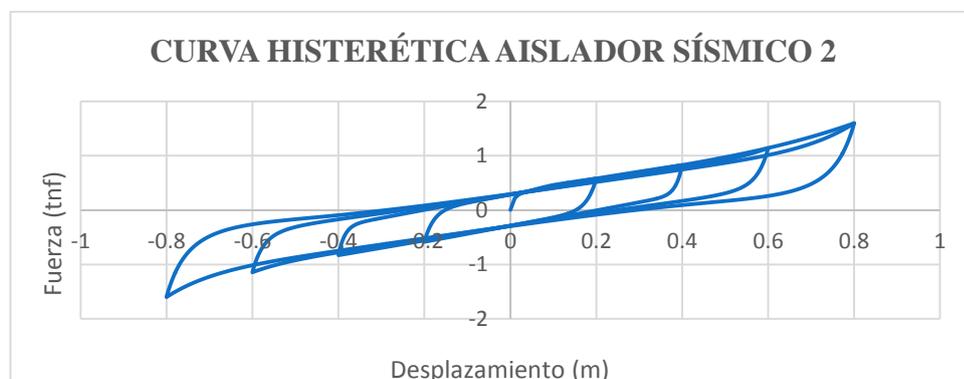


Figura 3.5 Curva histerética aislador sísmico 2

Obtenidas las curvas de histéresis de cada aislador, se ha verificado que los modelos de aisladores sísmicos (LBR) son los óptimos.

### 3.6 Análisis de los pórticos con aisladores sísmicos (LBR) en OpenSees

Determinamos los modelos con cada aislador que fue pre-dimensionado para cada pórtico, verificando que el período fundamental de la estructura aumente significativamente con el fin de disminuir los desplazamientos, a través de un análisis tiempo historia.

Tabla 3.3 Desplazamientos con aislador pórtico 1

<b>DESPLAZAMIENTO CON AISLADOR PÓRTICO 1</b>		
<b>SISMOS</b>	<b>DESPLAZAMIENTOS</b>	<b>DERIVA (%)</b>
SISMO 1	0.009842	0.230671875
SISMO 2	0.014236	0.33365625
SISMO 3	0.013208	0.3095625

Tabla 3.4 Desplazamientos con aislador pórtico 2

<b>DESPLAZAMIENTO CON AISLADOR PÓRTICO 2</b>		
<b>SISMOS</b>	<b>DESPLAZAMIENTOS</b>	<b>DERIVA (%)</b>
SISMO 1	0.00654	0.344460937
SISMO 2	0.008814	0.206578125
SISMO 3	0.00654	0.15328125

Realizados los análisis para cada pórtico con el aislador sísmico (LBR) en el software OpenSees, se verifica que sus desplazamientos disminuyeron en cada pórtico y con todos los sismos.

#### 3.6.1 CURVAS HISTERÉTICAS

Graficando la curva histerética de cada pórtico se observa cómo actúa cada aislador minorando los desplazamientos.

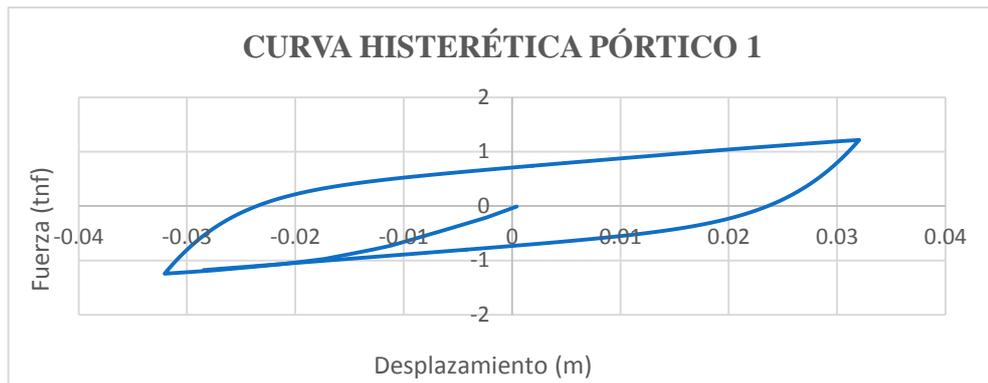


Figura 3.6 Curva histerética pórtico 1

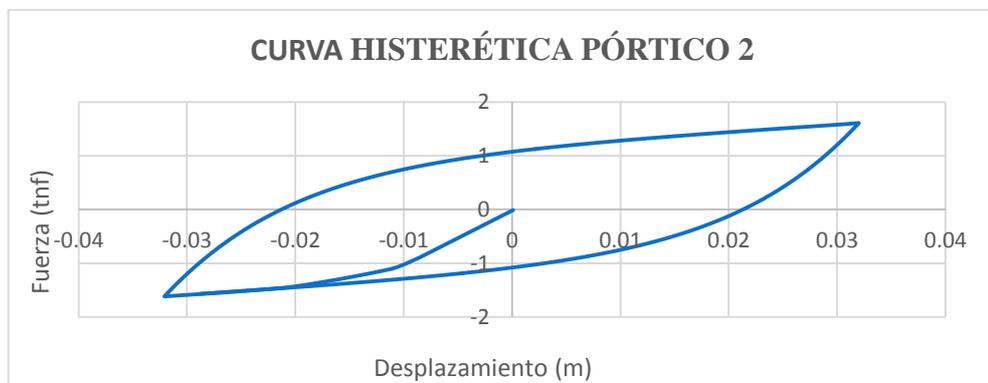


Figura 3.7 Curva histerética pórtico 2

## CAPÍTULO IV

### 4 ANÁLISIS PRESUPUESTARIO

En el actual Capítulo se determinará el análisis costo beneficio de implementar una medida de mitigación de la entidad hospitalaria, realizando un presupuesto conceptual de la estructura existente versus la medida de mitigación analizando si es necesario realizar la mitigación propuesta.

#### 4.1 Estimación del costo total de la entidad hospitalaria Moreno Vázquez

Para determinar el costo referencial por metro cuadrado de la entidad hospitalaria, se tomó como base el presupuesto referencial del Centro de Salud Tipo C Materno Infantil y Emergencia Ciudad de Cuenca,

Tabla 4.1 Estimación del costo por m<sup>2</sup> del centro de salud tipo C

Centro de salud tipo C materno infantil y emergencia Ciudad de Cuenca.	
<b>Costo total de construcción</b>	\$ 4,161,887.43
<b>Área total de construcción</b>	2719
<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	\$ 1,530.67

Tabla 4.2 Estimación del costo Hospital Moreno Vázquez

HOSPITAL MORENO VÁZQUEZ				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
<b>Área de construcción</b>	m <sup>2</sup>	3705.1	\$ 1,530.67	\$5,671,285.417

## 4.2 Elaboración del presupuesto de la medida de mitigación

Determinamos el valor del metro cuadrado de la entidad hospitalaria, realizando un presupuesto conceptual en base a hospitales construidos de similares características. Para el precio unitario del aislador sísmico (LBR), se toma como referencia el trabajo de investigación de la Ing. Leidy Núñez. (Ñúñez, 2014)



Figura 4.1 Áreas del hospital

Tabla 4.3 Estimación del costo de la estructura aislada

<b>HOSPITAL MORENO VÁZQUEZ</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Área de construcción	m <sup>2</sup>	3705.1	\$ 1,530.67	\$ 5,671,285.417
Aislador sísmico (LBR)	u	162	\$ 1,500.00	\$ 243,000.00
Estructura aislada				\$ 5,914,285.417

Realizado la estimación observamos que la estructura aislada es mayor en su costo que la estructura convencional, teniendo un aumento en la inversión de un 4.28%, este valor no es significativo, al comparar el comportamiento de la estructura convencional frente a la estructura aislada, ya que su objetivo principal de los dispositivos de aislación sísmica es mejorar las seguridad de las estructuras.

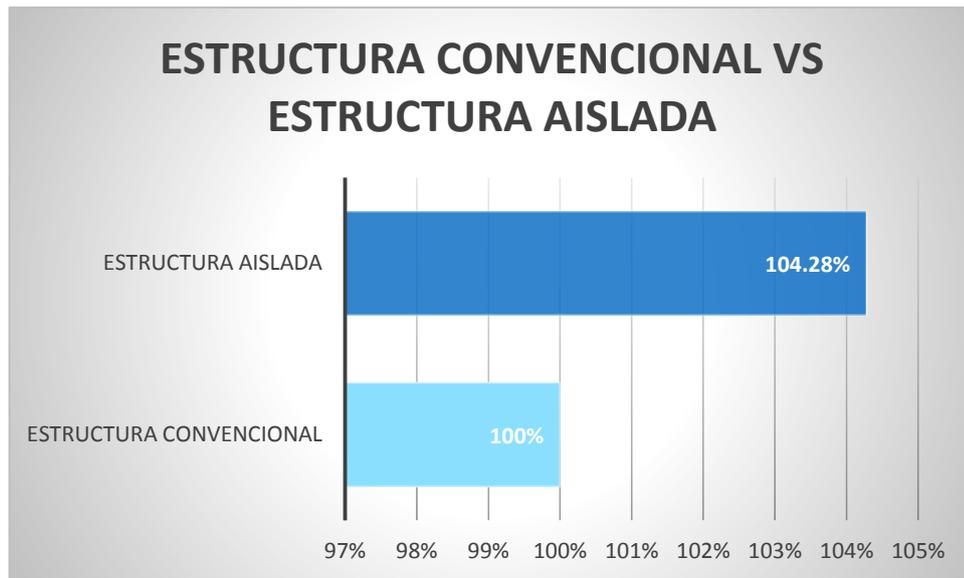


Figura 4.2 Comparación en porcentaje del costo de la estructura convencional vs estructura aislada

## CONCLUSIONES

La presente tesina tuvo como objetivo realizar un análisis dinámico no lineal de la entidad Hospitalaria “Moreno Vázquez”, para verificar su comportamiento estructural ante un evento sísmico y realizar una medida de mitigación para garantizar la seguridad de la estructura en caso de desastre natural.

El uso del software OpenSees en el análisis dinámico no lineal de la entidad hospitalaria aplicando la Norma Ecuatoriana de la construcción con un período de retorno de 475 años, no mostró un buen comportamiento de la estructura y sobrepasó las derivas especificadas en la norma (2%), en la cual presenta deformaciones residuales en los dos pórticos analizados con diferentes sismos ocurridos en nuestro país. Analizando para un período de retorno de 2500 años los 2 pórticos sobrepasaron el 2% las derivas, pero no existe un colapso total de la estructura.

Para el sistema aislado se tomó como base lo considerado por la NEC\_11 y la norma ASCE 7\_10 que indican el comportamiento dinámico de edificios con aisladores sísmicos. Como resultado del aislamiento sísmico se pre dimensionó dos tipos de aisladores una para cada pórtico dando como resultado diámetros muy pequeños de 10 y 15 cm que no existen en el mercado, que sólo se obtienen bajo pedido.

La entidad hospitalaria aislada aumenta significativamente su amortiguamiento respecto a la misma estructura sin aislamiento, de manera que las derivas disminuyen hasta en un 80%, lo que nos concluye que es un método muy confiable.

Determinando el análisis económico nos muestra que es muy conveniente el uso de aisladores sísmicos, ya que existe un ahorro del 4.28% comparado con el costo total de la estructura.

Con todos los resultados del presente estudio se puede determinar que es conveniente el uso de aislamiento sísmico, debido a su bajo costo comparado con la inversión que se utiliza en la construcción de un hospital, además ante un evento sísmico el lugar más seguro debe ser una entidad de salud, es una edificación indispensable.

## **RECOMENDACIONES**

Debido a que nuestro país se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, es necesario que las estructuras esenciales tengan un tipo de aislamiento o disipación para garantizar su funcionalidad estructural y funcionalidad continua, incluso en situaciones de desastres.

Ante la posibilidad de realizar la colocación de este tipo de aisladores en la entidad hospitalaria, se debe tomar en cuenta el valor de la colocación de este tipo de aisladores y el número de años de vida útil que tiene el hospital, ya que supera los 40 años de construcción.

Recomendar este tipo de estudios a nivel de todas las estructuras esenciales del país para garantizar la seguridad y considerar además disipación sísmica.

Usar aislamiento y disipación sísmica en todas las estructuras nuevas a construirse, debido a que nuestro país tiene un alto riesgo sísmico, y así contar con hospitales seguros frente a desastres.

## BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Alfredo Saavedra L. (2013). El poder de la aislación. *Revista Bit*, 1-2.
- Alvarez, M. G. (2012). *Análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal del Hospital de Vielha*. Barcelona.
- ASCE 7-10. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*.
- Celi, C. (2014). *Análisis Paramétrico de la Fiabilidad del modelamiento Sísmico en el rango no Lineal*. Quito.
- Charney, F. (2009). *Seismic Loads*.
- FEMA 356. (2000). *Federal Emergency Management Agency Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. United States of America.
- H. Yepes, J. Chatelain, B. Guillier, Estudio del riesgo sísmico en el Ecuador. (n.d.). Estudio del riesgo sísmico en el Ecuador.
- Mendoza, D. (2012). *Sensibilidad a parámetros de modelamiento estructural e incertidumbre*. Loja - Ecuador.
- NEC - Riesgo Sísmico y Rehabilitación Estructural. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Ecuador.
- NEC - Peligro Sísmico. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción - Peligro Sísmico*. Ecuador.
- NEC. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Ecuador.
- Nitsche, C. (2012). *Protección Sísmica de Estructuras*.

Ñuñez, L. (2014). *AISLACIÓN SÍSMICA DE UN EDIFICIO (ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO Y COSTOS CON UN EDIFICIO TRADICIONAL)*.

OpenSees. (2006). *OpenSees Command Language Manual*.

Organización Panamericana de la Salud, Guía para la evaluación de Establecimientos de la Salud de mediana y baja complejidad. (2010). Guía para la evaluación de Establecimientos de la Salud de mediana y baja complejidad.

Serrano, V., & Calle, J. (2016). *Evaluación Estructural del "Hospital Moreno Vázquez" de la ciudad de Gualaceo - provincia del Azuay, para cuantificar las amenazas y vulnerabilidad de la edificación hospitalaria*. Cuenca.