



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE CONSTRUCCIONES

**ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DEL “HOSPITAL SAN SEBASTIÁN
(SÍGSIG)”, 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:

CRISTIAN JOSÉ GUALPA UVIDIA

Director:

JOSÉ FERNANDO VÁZQUEZ CALERO

Cuenca-Ecuador

2017

DEDICATORIA

A mi hijo Cristian, mi máspreciado tesoro, por ser fuente de mi inspiración y la razón de mi vida, a ti van dedicados cada uno de mis logros.

A mis padres quienes me apoyaron todo el tiempo, por haberme enseñado que únicamente con trabajo y preparación se pueden llegar a cumplir todos los objetivos y metas que uno se proponga. A mi madre Laura, por demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional, por creer y luchar por mí sin importar nuestras diferencias de opiniones, por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles de mi vida. A mi padre Manuel, a pesar de haberlo perdido muy pronto ha estado siempre conmigo cuidándome y guiándome desde el cielo, sé que está orgulloso de la persona en la cual me he convertido, seré mejor cada día y será siempre mi inspiración. A mis hermanos, que siempre han estado a mi lado brindándome su apoyo incondicional.

A mis abuelos, tíos y demás familiares, por creer y confiar en mí, por el apoyo que me brindaron para poder terminar mi carrera universitaria.

Para una persona muy especial, Paúl; más que un amigo fue un hermano para mí, que siempre estuvo a mi lado apoyándome y guiándome, por haberme brindado su amistad, sus consejos en todo momento.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradecer a Dios por haberme guiado a lo largo de mi carrera, por ser siempre mi fortaleza y acompañarme en los momentos más difíciles.

A mi hijo por ser siempre mi mayor inspiración y mi mayor felicidad, que me impulsa cada día a ser mejor persona y padre.

A mis padres, por la confianza que pusieron en mí, por todos los sacrificios que han hecho para que tuviera una buena educación, por siempre impulsarme a no rendirme nunca y apoyarme en mis decisiones.

Al Ingeniero José Fernando Vázquez Calero, por ser nuestro tutor y gran amigo, por la confianza y ayuda brindadas en esta tesis, al Ingeniero Francisco Flores Solano por sus tiempo y valiosos conocimientos impartidos.

A los miembros del tribunal Ingeniero Roberto Gamón Torres e Ingeniero Juan Carlos Malo.

A mis amigos, por su amistad y su apoyo en mi carrera universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
OBJETIVOS	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	4
 CAPÍTULO I	 5
1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	5
1.1 Metodología.....	5
1.2 Estado del arte	6
1.3 Marco teórico	7
1.4 Información general del Hospital San Sebastián.....	7
 CAPÍTULO II	 8
2 MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA	8
2.1 Modelamiento en OpenSees	8
2.2 Estructura en el rango elástico.....	9

2.2.1	Análisis tiempo historia	9
2.2.2	Análisis modal espectral	9
2.2.3	Efectos P- Δ	10
2.2.4	Análisis estático no lineal (Pushover)	10
2.2.5	Procedimiento Dinámico No Lineal (NDP)	10
2.3	Geometría general y ubicación de la edificación	10
2.4	Especificaciones de la estructura.....	12
2.5	Espectro de diseño	13
2.5.1	Espectro de diseño para un período de retorno de 475 años	13
2.5.2	Espectro de diseño para un período de retorno de 2500 años	14
2.6	Deriva de piso.....	15
2.7	Espectros sísmicos y registros acelerográficos	15
2.7.1	Escalamiento de sismos.....	17
2.8	Análisis Dinámico Lineal de los pórticos.....	18
2.8.1	Análisis de los pórticos en Etabs.....	18
2.8.2	Análisis Dinámico Lineal en OpenSees.....	20
2.8.3	Análisis Dinámico Lineal comparativo entre OpenSess y Etabs 2016	21
2.9	Análisis Dinámico no Lineal en el software OpenSees.....	24
2.10	Análisis tiempo historia.....	24
2.10.1	Análisis con un período de retorno de 475 años	24
2.10.2	Análisis con un período de retorno de 2500 años	26
2.11	Análisis estático no lineal (Pushover)	27
2.11.1	Análisis de vibración libre	28
2.12	Curva de histéresis.....	29

CAPÍTULO III	30
3 MEDIDAS DE MITIGACIÓN	30
3.1 Aislamiento basal sísmico	30
3.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)	31
3.3 Pre-dimensionamiento del Aislador Sísmico (LBR)	31
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	32
 CAPÍTULO IV	 34
4 ANÁLISIS PRESUPUESTARIO	34
4.1 Estimación del costo total de la entidad hospitalaria San Sebastián	34
4.2 Elaboración del presupuesto de las medidas propuestas en el Capítulo 3...	34
 CONCLUSIONES	 36
RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFÍA	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resultado ensayo en vigas	12
Tabla 2.2: Resultado ensayo en columnas	13
Tabla 2.3: Deriva máxima expresada como fracción de la altura de piso.....	15
Tabla 2.4: Deriva máxima inelástica.....	15
Tabla 2.5: Resultados desplazamientos en Etabs	20
Tabla 2.6: Resultados período de vibración en OpenSees	20
Tabla 2.7: Desplazamientos en OpenSees	21
Tabla 2.8: Resultado análisis modal.....	21
Tabla 2.9: Resultado análisis tiempo historia	22
Tabla 2.10: Resultado análisis tiempo historia con inercias agrietadas	24
Tabla 2.11: Análisis tiempo historia 475 años	25
Tabla 2.12: Análisis tiempo historia 2500 años	27
Tabla 2.13: Cortante basal.....	28
Tabla 3.1: Dimensiones aisladores sísmicos (LBR)	31
Tabla 3.2: Análisis modal con aisladores sísmicos	32
Tabla 3.3: Análisis tiempo historia con aislador sísmico.....	33
Tabla 4.1: Estimación del costo por m ²	34
Tabla 4.2: Estimación del costo hospital San Sebastián	34
Tabla 4.3: Estimación del costo de la estructura aislada.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Distribución física	7
Figura 2.1: Maqueta virtual hospital San Sebastián.....	11
Figura 2.2: Pórtico 1.....	11
Figura 2.3: Pórtico 2.....	11
Figura 2.4: Nomenclatura en vigas	12
Figura 2.5: Nomenclatura en columnas	12
Figura 2.6: Espectro de diseño para un período de retorno de 475 años	13
Figura 2.7: Curva de peligro sísmico para Cuenca	14
Figura 2.8: Espectro de diseño para un período de retorno de 2500 años	14
Figura 2.9: Espectro de sismo de análisis 1	16
Figura 2.10: Espectro de sismo de análisis 2	16
Figura 2.11: Espectro de sismo de análisis 3	16
Figura 2.12: Sismos sin escalar	17
Figura 2.13: Sismos con factor FPS	17
Figura 2.14: Sismos escalados	17
Figura 2.15: Período fundamental pórtico 1 $T=0.37$, pórtico 2 $T=0.35$	18
Figura 2.16: Espectro de respuesta Sígsig.....	18
Figura 2.17: Función tiempo historia	19
Figura 2.18: Desplazamiento máximo tiempo historia	19
Figura 2.19: Registro de sismo de análisis 1.....	20
Figura 2.20: Registro de sismo de análisis 2.....	21
Figura 2.21: Registro de sismo de análisis 3.....	21
Figura 2.22: Análisis tiempo historia sismo 1.....	22
Figura 2.23: Análisis tiempo historia sismo 2.....	23
Figura 2.24: Análisis tiempo historia sismo 3.....	23
Figura 2.25: Análisis tiempo historia sismo 1.....	24
Figura 2.26: Análisis tiempo historia sismo 2.....	25
Figura 2.27: Análisis tiempo historia sismo 3.....	25
Figura 2.28: Análisis tiempo historia sismo1 2500 años	26
Figura 2.29: Análisis tiempo historia sismo2 2500 años	26

Figura 2.30: Análisis tiempo historia Sismo3 2500 años.....	26
Figura 2.31: Curva de capacidad pórtico 1	27
Figura 2.32: Curva de capacidad pórtico 2	27
Figura 2.33: Vibración libre pórtico 1 Matlab	28
Figura 2.34: Vibración libre pórtico 1 OpenSees.....	28
Figura 2.35: Vibración libre pórtico 2 OpenSees.....	29
Figura 2.36: Curva histerética pórtico 1.....	29
Figura 2.37: Curva histerética pórtico 2.....	29
Figura 3.1: Curva de histéresis aislador pórtico 1	32
Figura 3.2: Curva de histéresis aislador pórtico 2.....	32
Figura 3.3: Curva histerética con aislador pórtico 1	33
Figura 3.4: Curva histerética con aislador pórtico 2	33
Figura 4.1: Distribución de columnas	35
Figura 4.2: Comparación en porcentaje del costo de la estructura convencional vs aislada.....	35

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Definiciones.

Anexo 2: Información arquitectónica y de ingeniería.

Anexo 3: Parámetros necesarios para la definición del espectro de diseño para un período de retorno de 475 años.

Anexo 4: Parámetros necesarios para la definición del espectro de diseño para un período de retorno de 475 años.

Anexo 5. Rutina element elasticBeamColumn

Anexo 6. Rutina Concrete01, Steel01.

Anexo 7. Rutina uniaxialMaterial KikuchiAikenLRB.

**ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DEL “HOSPITAL SAN SEBASTIÁN
(SÍGSIG)”, MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y REFUERZO PARA DISMINUIR
SU VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL**

RESUMEN

El presente estudio realiza una evaluación sísmica en el software especializado en modelación dinámica no lineal OpenSees, para la entidad hospitalaria San Sebastián, que forma parte del proyecto de investigación científica de la Universidad del Azuay, “Implementación de una estrategia de Hospitales Seguros Frente a Desastres”. Se recopiló información de la entidad hospitalaria de estudios previamente realizados, definiendo los pórticos de estudio; se realiza los análisis: modal, tiempo-historia, vibración libre y análisis estático no lineal (pushover), iniciamos la evaluación sísmica con un análisis dinámico lineal y un análisis dinámico no lineal determinando el período fundamental de la estructura, desplazamientos, derivas y la capacidad estructural; se plantea como medida de mitigación un aislador basal de tipo LRB para disminuir su vulnerabilidad estructural.

Palabras clave: OpenSees, modal, sismo, Tiempo-Historia, vibración libre, Pushover, aislación basal.



José Fernando Vázquez Calero

Director del Trabajo de Titulación



José Fernando Vázquez Calero

Director de Escuela



Cristian José Guallpa Uvidia

Autor

NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF "San Sebastian HOSPITAL (SÍGSIG)", MITIGATION AND REINFORCEMENT MEASURES TO REDUCE ITS STRUCTURAL VULNERABILITY.

ABSTRACT

This study conducted a seismic evaluation of *San Sebastian* hospital building through OpenSees software specialized in nonlinear dynamic modeling. This is part of the scientific research project of *Universidad del Azuay* on Hospitals Safe from Disasters, entitled "*Implementación de una estrategia de Hospitales Seguros Frente a Desastres.*" Information of previously performed studies was collected from the hospital, defining the frames under study. Then, modal, time-history, free-vibration and non-linear static (pushover) analysis, were performed. The seismic evaluation began with a linear dynamic analysis and a nonlinear dynamic analysis, determining the fundamental period of the structure, displacements, drifts and structural capacity. A LRB type Lead Rubber Bearing base isolator to reduce its structural vulnerability was proposed as a mitigation measure.

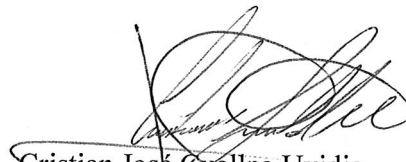
Keywords: OpenSees, Modal, Earthquake, Time-History, Free-Vibration, Pushover, Base Insulation.



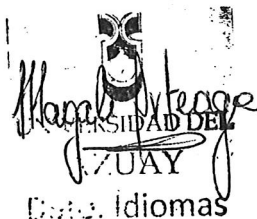
José Fernando Vázquez Calero
Thesis Director



José Fernando Vázquez Calero
School Director



Cristian José Gualpa Uvidia
Author



Lic. Lourdes Crespo

Cristian José Guallpa Uvidia

Trabajo de Titulación

Ing. José Fernando Vázquez Calero M.Sc.

Julio, 2017

INTRODUCCIÓN

La investigación presentada a continuación 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”.

El Ecuador al estar ubicada en una zona donde la placa de Nazca y la placa Sudamericana convergen, se considera un país con un riesgo sísmico elevado; siendo un territorio sísmicamente activo que históricamente ha sido afectado por numerosos terremotos destructivos; una serie de sismos que han provocado el colapso total o parcial de estructuras, llegando al punto de destruir ciudades enteras, que han perjudicado la economía del estado. Por esta razón es de gran importancia desarrollar mecanismos de disminución de vulnerabilidad de las estructuras, sobre todo en las esenciales como los hospitales; frente a un evento sísmico estas estructuras deben garantizar su funcionalidad total.

La presente investigación está dirigida a realizar un análisis dinámico no lineal de la entidad hospitalaria San Sebastián, utilizando OpenSees que es un software especializado en modelación dinámica no lineal, con lo cual se medirá la vulnerabilidad estructural; estableciendo medidas de mitigación y refuerzo para disminuir su vulnerabilidad estructural.

En el primer Capítulo se recopilará la información arquitectónica y de ingeniería del Hospital San Sebastián, del cantón Sigsig, provincia del Azuay, obtenida en la investigación realizada por el Ing. Carlos Bermeo; la información se utilizará para realizar el análisis dinámico no lineal y medidas de mitigación de la entidad hospitalaria.

En el segundo Capítulo se modelara la estructura utilizando OpenSees, que es un softwares especializados en modelación dinámica lineal y no lineal, se realizará un análisis dinámico lineal en los softwares OpenSees y Etabs, con el objetivo de verificar el correcto ingreso del material y secciones.

En el tercer Capítulo, como medida de mitigación se ha propuesto un aislamiento basal sísmico, el cual será pre dimensionar un aislador sísmico (LBR), generando un análisis sísmico de la estructura en el rango dinamo no lineal, con el objetivo de disminuir los desplazamientos.

En el Capítulo cuatro se realizó una estimación del costo de la entidad hospitalaria existente, estimando un costo de la estructura aislada; realizando un análisis costo beneficio, se compararán los resultados de los presupuestos obtenidos, verificando la factibilidad económica de las medidas de reforzamiento y mitigación.

ANTECEDENTES

El Ecuador al ser un país situado en el “Cinturón de Fuego del Pacífico”, zona que es considerada la más susceptible a sufrir actividades volcánicas y sismos. La zona del Cinturón de Fuego del Pacífico se produce debido a la subducción entre dos placas tectónicas, la Placa Nazca y la Placa Sudamericana, en el caso de Ecuador. El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional es el organismo encargado de realizar la vigilancia y el estudio de las amenazas volcánicas y sísmicas, este organismo tiene como misión: “Reducir el impacto en la población y la infraestructura provocado por los fenómenos volcánicos y sísmicos en el Ecuador mediante la vigilancia permanente, la investigación científica y la aplicación tecnológica, impulsando la creación de una cultura de prevención”. (Ortiz, 2013)

Ecuador es un territorio sísmicamente activo que históricamente ha sido afectado por numerosos terremotos destructivos, entre los que se puede citar en terremoto de Esmeraldas de 1906 (M=8.8, uno de los más grandes registrados en el mundo), Ambato de 1949 (M=6.8) que dejó cerca de 5050 fallecidos (USGS), Reventador en 1987 (M=6.1 y 6.9) que provocó deslizamientos de lodo y avalanchas de rocas destruyendo parte del oleoducto ecuatoriano causando un gran impacto en la economía del país, Bahía de Caráquez en 1998 (M=7.2), que afectó cerca del 60% de las edificaciones de la zona (Ortiz, 2013). Estas reseñas históricas muestran la necesidad urgente de pensar en programas para la mitigación del riesgo sísmico.

El país debe asegurar la operatividad de cada sector e institución, esencialmente de las entidades hospitalarias después de sufrir un evento natural que pudiese producir catástrofes: “Considerando que los hospitales del país se encuentran ubicados en zonas de alto riesgo por lo tanto se hace necesario ejecutar acciones para contar con Hospitales Seguros” (Ministerio de Salud Pública, 2007). Como parte de estas acciones el estado Ecuatoriano crea el Comité Nacional del “Programa Hospital Seguro” con el fin que las entidades hospitalarias permanezcan accesibles y funcionales, debido a que más de $\frac{3}{4}$ de la población está expuesta a desastres de carácter sísmico; puesto que, 8 de 58 fuentes sismo genéticas son de alto riesgo (Ministerio de Salud Pública, 2007).

En el año de 1976 se celebra un nuevo contrato para la construcción del nuevo edificio del hospital, el mismo que entra en funcionamiento en el año de 1980 ubicándose en la Av. Kennedy junto al Colegio Técnico Sígusig, lugar que es utilizado hasta la actualidad y que se encuentra bajo administración estatal ya que forma parte del Ministerio de Salud Pública. (Quizhpe & varios, 2011)

Los planes de mitigación de desastres deben incluir alternativas de reparación en caso de presentarse deterioro o serios daños en las instalaciones hospitalarias, tanto para antes como para después de la ocurrencia de un desastre. Eventos pasados han demostrado que ésta es una clara deficiencia de los planes existentes. La experiencia indica que se deben hacer consideraciones en el diseño y construcción de las edificaciones, con el fin de proveer seguridad y preservar ciertas áreas críticas del hospital, tales como el servicio de emergencias, los servicios de diagnóstico, el centro quirúrgico, la farmacia, las áreas de almacenamiento de alimentos y medicinas, entre otros (Organización Panamericana de la Salud, 2000).

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar el análisis dinámico no lineal del “Hospital San Sebastián”, del cantón Sígusig, provincia del Azuay, para determinar medidas pertinentes de mitigación y reforzamiento.

Objetivos específicos

- Sistematizar la evaluación estructural disponible del “Hospital San Sebastián”.
- 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

En el presente Capítulo se recopilará la información arquitectónica y de ingeniería del Hospital San Sebastián, del cantón Sígig, provincia del Azuay, obtenida en la investigación realizada por el Ing. Carlos Bermeo; la información obtenida se utilizará para realizar el análisis dinámico no lineal de la entidad hospitalaria.

1.1 Metodología

Se recolectará y se clasificará la información arquitectónica y de ingeniería de la edificación hospitalaria, del trabajo de investigación previo realizado por el Ing. Carlos Bermeo, efectuando la sistematización de la información recolectada, obteniendo así los datos necesarios para un análisis dinámico no lineal de la edificación.

Realizar el modelo matemático idealizado de la estructura mediante la utilización de software especializado, analizaremos en el rango inelástico la estructura; se ingresarán las cargas de acuerdo a la normativa vigente (NEC - Peligro Sísmico, 2014); identificando las zonas de plastificación, se analizarán las áreas de posible colapso parcial, progresivo y total; determinando así el desempeño inelástico de la estructura.

Diseñar medidas de reforzamiento y mitigación para disminuir la vulnerabilidad de la edificación hospitalaria, basado en las normativas: Federal Emergency Management Agency - Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356, 2000), American Concrete Institute – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08, 2008) y American Concrete Institute – Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318, 2011), Contando con un proyecto de reforzamiento y mitigación.

Estimación del costo de la estructura hospitalaria existente, mediante un presupuesto conceptual dependiendo de su tipo y clasificación; se realizará un presupuesto mediante el análisis de precios unitarios de las medidas de reforzamiento y mitigación seleccionadas; Realizando un análisis costo beneficio se compararán los resultados de los presupuestos obtenidos, verificando la factibilidad económica de las medidas de reforzamiento y mitigación.

1.2 Estado del arte

La mayoría de los inmuebles colapsados o que sufrieron daños graves durante el sismo de 1985 en la Ciudad de México, eran edificios flexibles con períodos fundamentales iniciales mayores o iguales a 0.7 s y debido a la larga duración del sismo (aproximadamente 3 minutos) incursionaron dentro del intervalo no lineal, aumentando su período, llevándolo cada vez más cerca al del terreno. Esto agravó las aceleraciones que experimentaron hasta llegar a la resonancia. En cambio, los edificios antiguos construidos en la zona del lago, no sufrieron daño debido a su corta altura (dos o tres niveles) que hizo que sus períodos naturales (menores a 0.5 s) quedaran fuera del intervalo de resonancia del terreno.

Tres son las fuentes principales de no-linealidad:

Grandes deformaciones: cuando los desplazamientos son excesivos, las ecuaciones de equilibrio no se pueden plantear sobre la geometría inicial del problema, sino sobre la final. Además, en las relaciones entre deformación unitaria y desplazamiento deben retenerse los términos cuadráticos, resultando relaciones asimismo no lineales.

Determinados tipos de rozamiento o amortiguamiento: el ejemplo más claro de no linealidad de esta clase es el rozamiento de Coulomb o rozamiento seco, un ejemplo particularmente sencillo de no cumplimiento del Principio de Superposición.

No-linealidad en las ecuaciones constitutivas del material: algunos materiales como el acero, presentan esta no-linealidad, sólo para valores grandes de los esfuerzos. La plasticidad es un caso típico de no-linealidad. (Departamento de Ingeniería Mecánica, Energía, y de Materiales, 2014)

1.3 Marco teórico

Definiciones. (Anexo 1)

1.4 Información general del Hospital San Sebastián



Figura 1.1: Distribución física

Fuente: (Bermeo, 2016)

El cantón Sígsig se encuentra ubicado al sureste de la Provincia del Azuay, posee una altitud media de 2500 m.s.n.m, se encuentra asentado sobre elevaciones que poseen grandes pendientes y rodeado por numerosos cuerpos de agua como ríos y lagunas. El hospital San Sebastián se encuentra ubicado en la zona baja del área urbana, precisamente en la Av. John F. Kennedy entre Sor Carmelina Arias y Regina Maldonado, con coordenadas geográficas $3^{\circ}03'02.07''\text{S}$ $78^{\circ}47'50.25''\text{O}$ y una elevación de 2459 m.s.n.m.

Se procedió a la clasificación de la información arquitectónica y de ingeniería de la edificación hospitalaria del trabajo de investigación previo realizado por el Ing. Carlos Bermeo, obteniendo así los datos necesarios para realizar un análisis dinámico no lineal de la entidad hospitalaria San Sebastián en el software especializado OpenSees. (Anexo 2)

CAPÍTULO II

2 MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Este capítulo trata sobre la modelación de la estructura del Hospital San Sebastián en el software OpenSees; especificando refuerzo longitudinal, transversal de las secciones estructurales y de la geometría en general de la entidad hospitalaria a analizar. Se realizará una modelación bidimensional de la estructura seleccionando dos pórticos, estos se emplearán para la modelación 2D en el análisis dinámico no lineal, empleando el análisis a nivel de rótulas plásticas y fibras; planteamos un análisis dinámico lineal en el software OpenSees y procedemos a comparar los resultados con el software Etabs 2016, verificando el ingreso correcto de las secciones y material en el software OpenSees.

2.1 Modelamiento en OpenSees

OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), ha sido promovido por el Pacific Earthquake Engineering Research Center a través de la fundación nacional de ciencia de los Estados Unidos. Es una plataforma informática para el desarrollo de aplicaciones de simulación del comportamiento de sistemas estructurales y geotécnicos, sometidos a eventos sísmicos, posee capacidades avanzadas para la modelación y análisis de la respuesta no-lineal de sistemas estructurales, para ello dispone de un amplio rango de modelos de materiales, elementos y algoritmos de solución.

OpenSees utiliza métodos basados en elementos finitos, por lo tanto el primer paso para la modelación es subdividir el sistema en elementos y nudos, para de esta manera definir la acción de cargas, y las restricciones nodales. La característica principal de OpenSees es que la modelación y simulación se la realiza a través de una fuente abierta.

El lenguaje de interpretación llamado lenguaje tcl, 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 Estructura en el rango elástico

El análisis sísmico de la estructura en rango elástico se lo realiza con los siguientes métodos: análisis tiempo historia, análisis modal de respuesta espectral y análisis estático no lineal (pushover).

2.2.1 Análisis tiempo historia

El análisis tiempo historia se realizará con no menos de tres registros de aceleraciones de sismos reales, previamente estos registros deben ser normalizados de manera que la aceleración máxima sea igual a la del espectro de diseño. Los registros se pueden escalar de tal manera que el valor medio de los espectros no caiga por debajo de 1,4 veces del espectro para el sismo de diseño durante períodos de entre $0,2 T$ segundo y $1,5 T$ segundo (donde T es el período fundamental de la construcción). (FEMA 356, 2000)

2.2.2 Análisis modal espectral

El análisis espectral modal se lleva a cabo usando espectros de respuesta elástica que no son modificados para tener en cuenta la respuesta no lineal. Se espera producir desplazamientos máximos aproximados durante el sismo de diseño. (FEMA 356, 2000)

Un análisis dinámico no lineal se lo puede realizar a cualquier tipo de estructura, este análisis nos muestra como es el comportamiento de las acciones sísmicas vs tiempo, además nos permite obtener los desplazamientos y deformaciones.

Para realizar un análisis de la estructura en el rango inelástico, se puede con los métodos de: análisis tiempo historia, análisis estático no lineal (Pushover), análisis de vibración libre.

2.2.3 Efectos P-Δ

Definidos como los efectos combinados de las cargas de gravedad que actúan en conjunto con derivas lateral debido a las fuerzas sísmicas, estos efectos son causados por las cargas de gravedad que actúan a través de la configuración deformada de un edificio y el resultado en un aumento de los desplazamientos laterales. (FEMA 356, 2000)

2.2.4 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 monotónicamente, 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)

2.2.5 Procedimiento Dinámico No Lineal (NDP)

Si se selecciona el Procedimiento Dinámico No Lineal (NDP) para el análisis sísmico del edificio, un modelo matemático que incorpore directamente las características no lineales de carga de los componentes y elementos individuales del edificio deberá ser sometido a agitación sísmica representada por historias de tiempo de movimiento del terreno de acuerdo con la Sección 1.6.2.2 para obtener fuerzas y desplazamientos. (FEMA 356, 2000)

2.3 Geometría general y ubicación de la edificación

El hospital San Sebastián del cantón Sígsig se encuentra ubicado en la provincia del Azuay, esta edificación consta de un solo nivel, una altura de entrepiso de 3.15 m, el nivel superior presenta una cubierta de losa plana y una estructura de cubierta.



Figura 2.1: Maqueta virtual hospital San Sebastián

Fuente: (Bermeo, 2016)

Para la presente investigación, el análisis dinámico no lineal del hospital San Sebastián se lo realiza en dos pórticos.

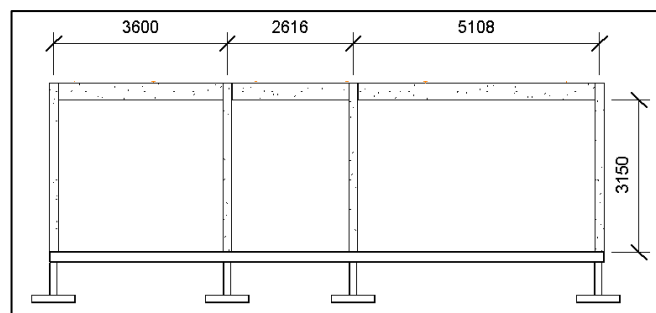


Figura 2.2: Pórtico 1

Fuente: Revit v2018

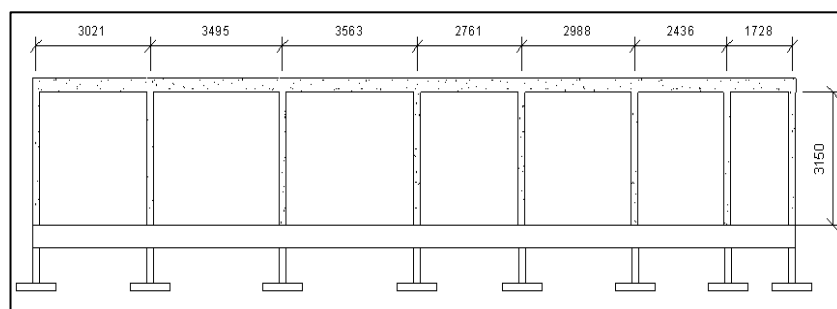


Figura 2.3: Pórtico 2

Fuente: Revit v2018

2.4 Especificaciones de la estructura

Los dos pórticos presentan igual sección, en columnas y en vigas.

Columna Tipo.

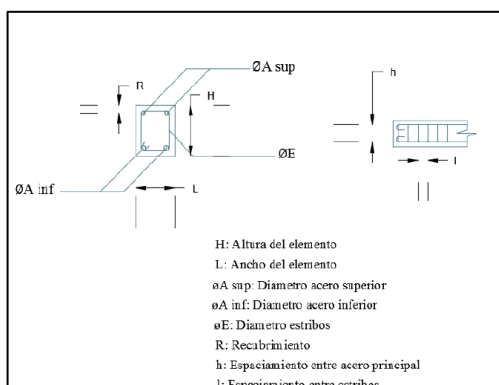


Figura 2.4: Nomenclatura en vigas

Fuente: (Bermeo, 2016)

Tabla 2.1: Resultado ensayo en vigas

Ensayo en vigas		Viga 1	Viga 2	Viga 3
H	cm	35	35	35
L	cm	17	17	17
ØA sup	mm	20	20	20
ØA inf	mm	20	20	20
ØE	mm	10	10	10
R	cm	4	4	4
h	cm	25	26	25
l	cm	20	18	20

Fuente: (Bermeo, 2016)

Viga tipo

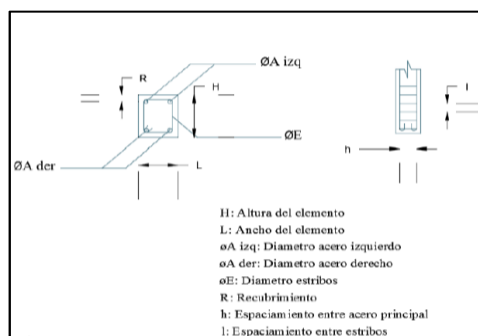


Figura 2.5: Nomenclatura en columnas

Fuente: (Bermeo, 2016)

Tabla 2.2: Resultado ensayo en columnas

Ensayo en columnas				
Columna 1		Columna 2		Columna 3
H	cm	17	17	17
L	cm	30	30	30
øA sup	mm	15	17	16
øA inf	mm	15	17	16
øE	mm	10	10	10
R	cm	4	4	4
h	cm	25	25	25
l	cm	10	10	10

Fuente: (Bermeo, 2016)

- El hormigón tiene una resistencia a los 28 días de, $f'_c=230 \text{ kg/cm}^2$.
- El acero de refuerzo y el acero en estribos es de tipo corrugado y tiene un esfuerzo de fluencia $F_y=4200 \text{ kg/cm}^2$.
- El recubrimiento de la columna es de 4.0 cm.
- El recubrimiento en vigas es de 4 cm.

2.5 Espectro de diseño

2.5.1 Espectro de diseño para un período de retorno de 475 años

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 es del 5%; se establece los siguientes factores. (Anexo3)

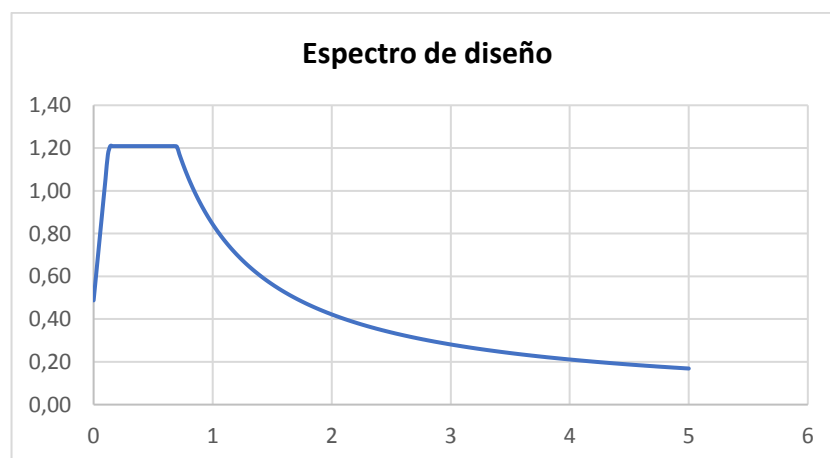


Figura 2.6: Espectro de diseño para un período de retorno de 475 años

2.5.2 Espectro de diseño para un período de retorno de 2500 años

Parámetros necesarios para la construcción del espectro de diseño para un período de retorno de 2500 años. (Anexo 4)

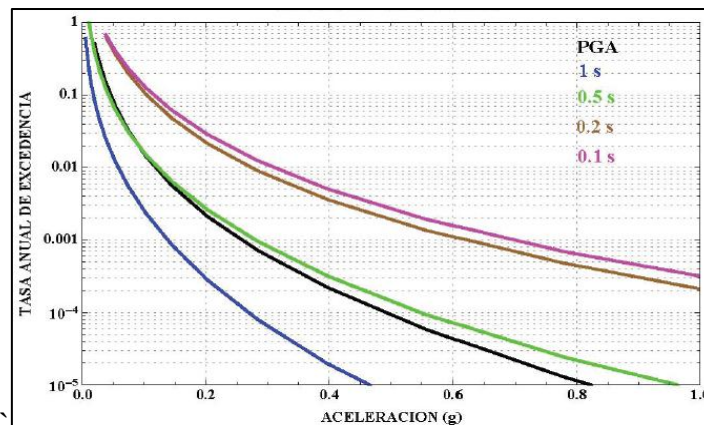


Figura 2.7: Curva de peligro sísmico para Cuenca

Fuente: (NEC - Peligro Sísmico, 2014)

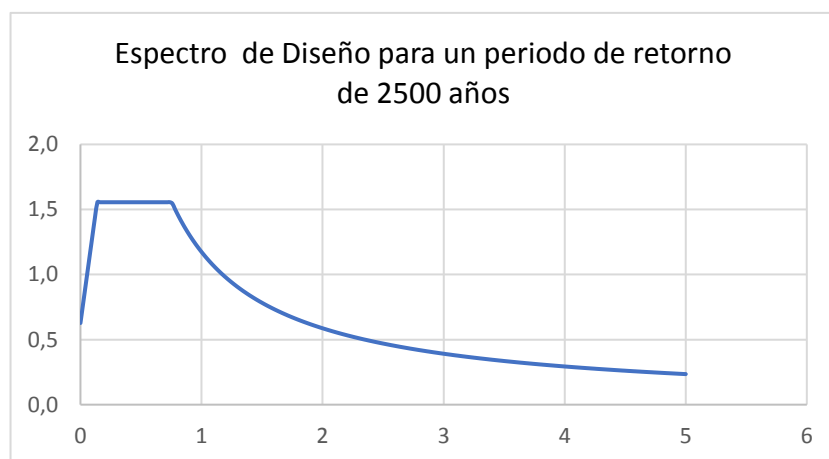


Figura 2.8: Espectro de diseño para un período de retorno de 2500 años

2.6 Deriva de piso

Es la diferencia entre los desplazamientos horizontales de los niveles, entre los cuales está comprendido los pisos. La NEC establece, que la deriva máxima no puede exceder los límites establecidos en la siguiente tabla, esta se expresa como un porcentaje de la altura de piso.

Tabla 2.3: Deriva máxima expresada como fracción de la altura de piso

Estructura de :	Δ_M máxima (sin unidad)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0,02
De mampostería	0,01

Fuente: (NEC - Peligro Sísmico, 2014)

La norma además, establece límites para la deriva máxima inelástica Δ_M de cada piso mediante la siguiente relación.

Tabla 2.4: Deriva máxima inelástica

Deriva máxima inelástica	
Δ_M : deriva máxima inelástica	$\Delta_M = 0,75 R \Delta_E$
Δ_E : desplazamiento obtenido de las fuerzas laterales	

Fuente: (NEC - Peligro Sísmico, 2014)

La Norma Ecuatoriana de la Construcción establece factores reductores de la inercia para vigas y columnas de 0.5 y 0.8 respectivamente. Indica que la masa para la carga sísmica debe considerar la combinación del 100% de las cargas muertas y el 25% de las cargas vivas.

2.7 Espectros sísmicos y registros acelerográficos

La norma ASCE 7-10 establece que para el análisis tiempo historia se realizará con tres espectros y registros acelerográficos correctamente escalados.

Espectros sísmicos



Figura 2.9: Espectro de sismo de análisis 1



Figura 2.10: Espectro de sismo de análisis 2

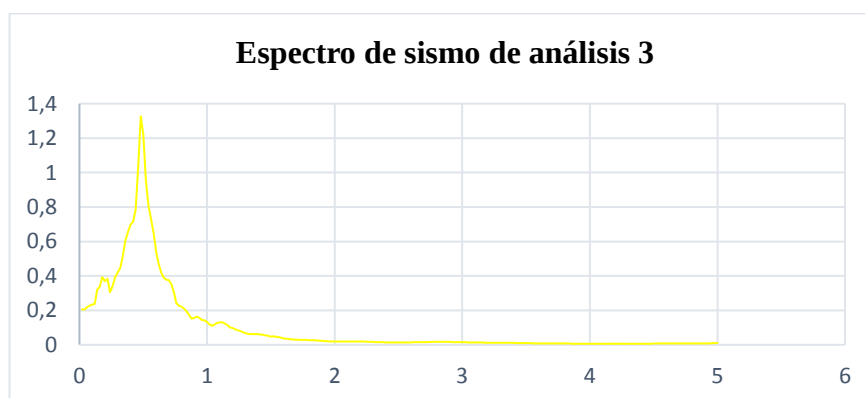


Figura 2.11: Espectro de sismo de análisis 3

2.7.1 Escalamiento de sismos

El escalamiento de los tres sismos se lo realiza de acuerdo a la norma ASCE 7-10.

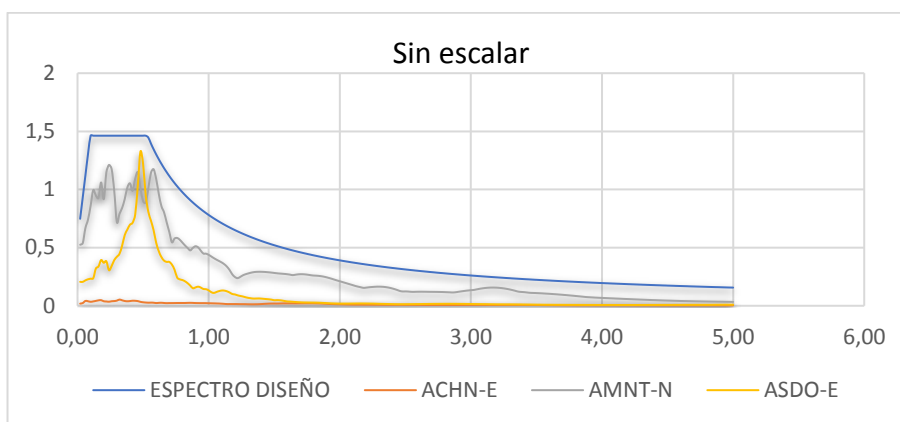


Figura 2.12: Sismos sin escalar

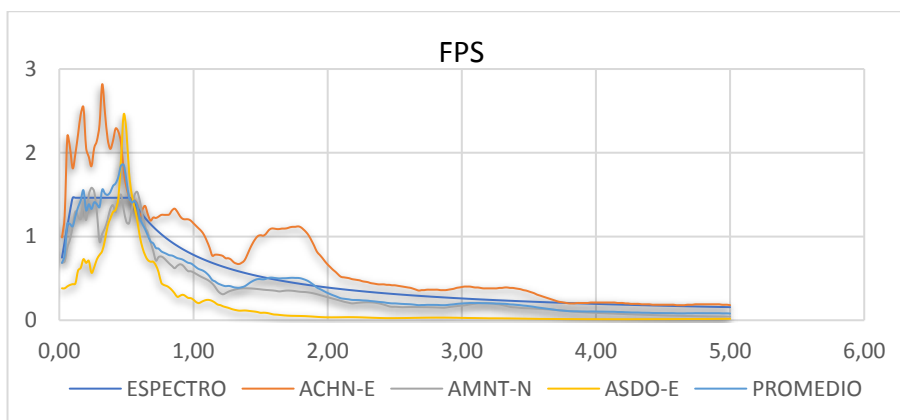


Figura 2.13: Sismos con factor FPS

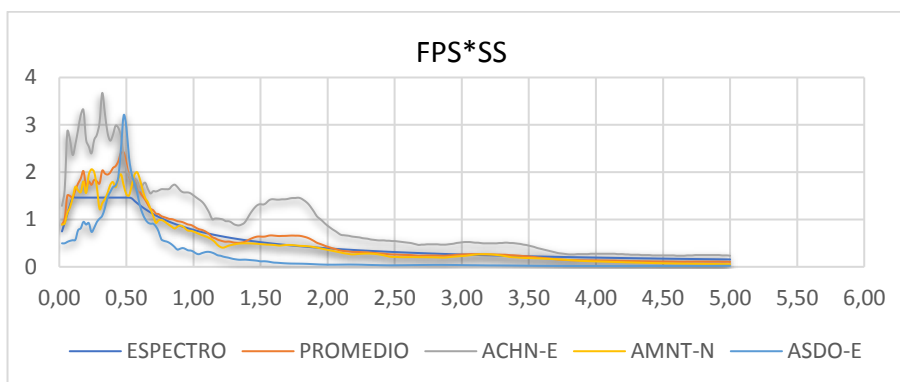


Figura 2.14: Sismos escalados

2.8 Análisis Dinámico Lineal de los pórticos

2.8.1 Análisis de los pórticos en Etabs

Para el modelamiento de los pórticos en Etabs se determina lo siguiente: ingreso de las secciones y geometrías de cada pórtico; ingreso de las masas.

2.8.1.1 Ingresado cada pórtico procedemos a calcular el período fundamental.

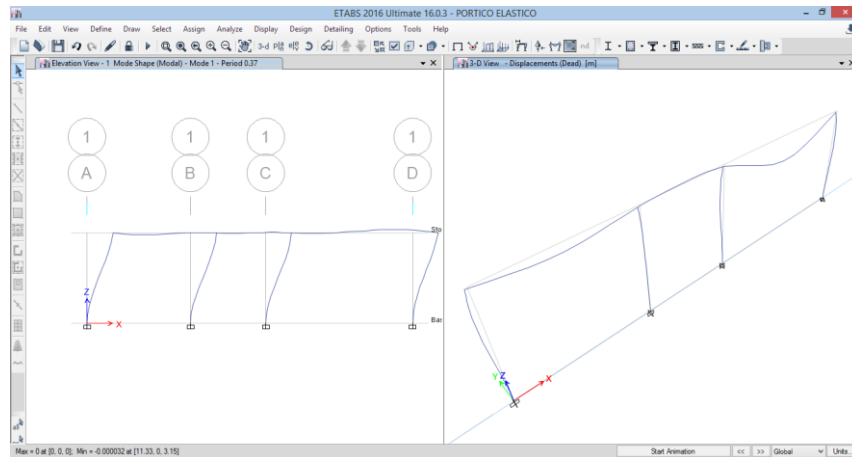


Figura 2.15: Período fundamental pórtico 1 $T=0.37$, pórtico 2 $T=0.35$

Fuente: Etabs 2016

Realizamos un análisis modal espectral y un análisis tiempo historia, ingresamos el espectro de respuesta del sitio.

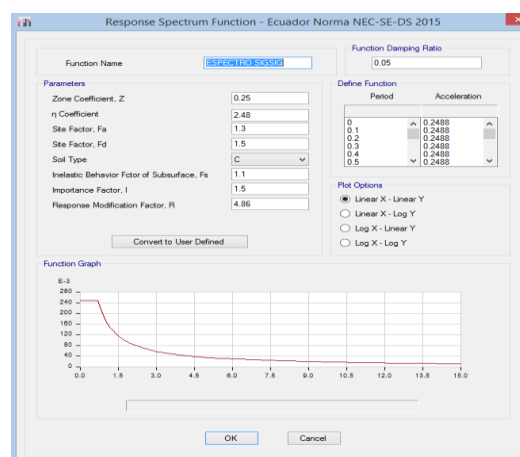


Figura 2.16: Espectro de respuesta Sígsig

Fuente: Etabs 2016

Al realizar los análisis tiempo historia ingresamos tres registros sísmicos con sus respectivos factores de escala.

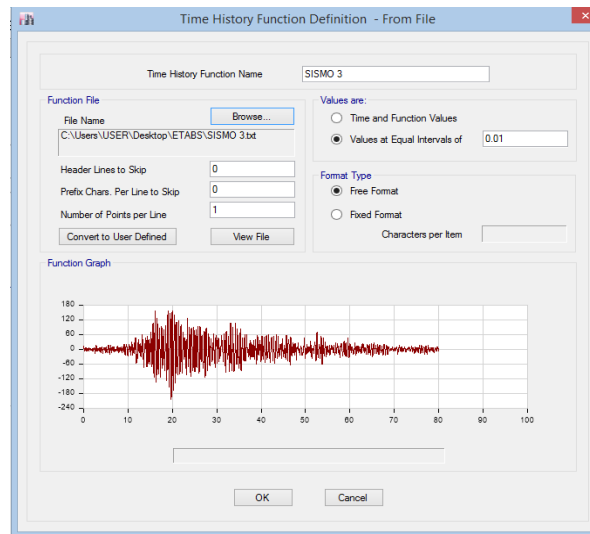


Figura 2.17: Función tiempo historia

Fuente: Etabs 2016

Terminado el ingreso de las funciones y los respectivos casos de analisis, se calcula los desplazamiento de cada pórtico.

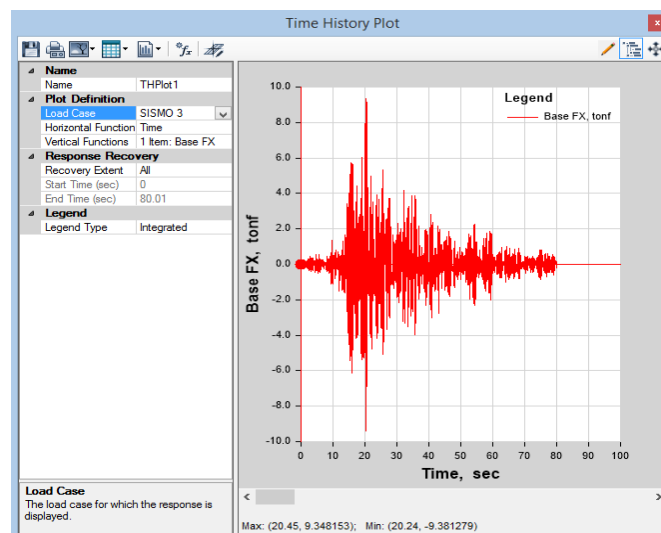


Figura 2.18: Desplazamiento máximo tiempo historia

Fuente: Etabs 2016

Tabla 2.5: Resultados desplazamientos en Etabs

Pórtico	Desp. Sismo 1 (m)	Desp. Sismo 2 (m)	Desp. Sismo 3 (m)
1	0.009792	0.00981	0.01010
2	0.008948	0.009066	0.009376

Fuente: Etabs 2016

2.8.2 Análisis Dinámico Lineal en OpenSees

Al ingresar los pórticos se necesita especificar, ingreso de la geometría, sección y material de cada pórtico. En el análisis lineal en OpenSees se define con el comando **elasticBeamColumn**, nos crea un elemento de viga-columna elástica. (Anexo 5)

Una vez definido el material, calculamos el período fundamental de cada pórtico.

Tabla 2.6: Resultados período de vibración en OpenSees

Pórtico	T (seg)
1	0.3628
2	0.3472

Terminado el análisis modal, realizamos un análisis tiempo historia calculando los desplazamientos en cada pórtico, con los registros sísmicos previamente escalados.

Registros sísmicos

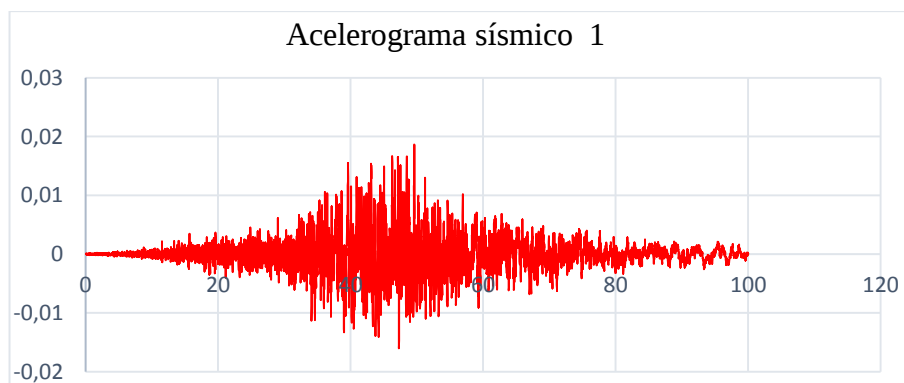


Figura 2.19: Registro de sismo de análisis 1

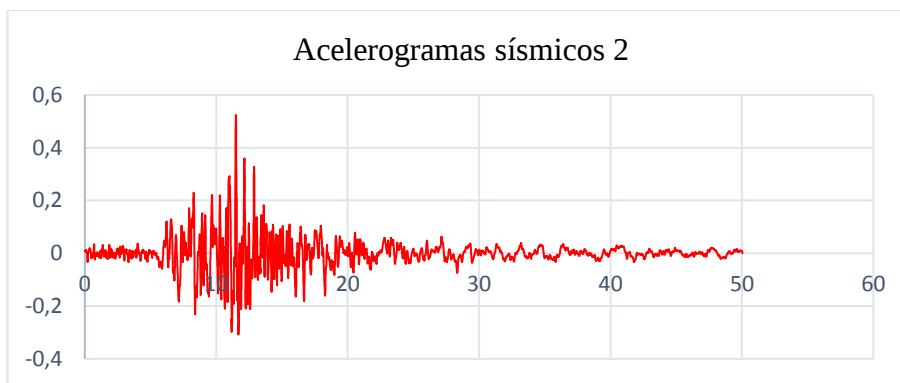


Figura 2.20: Registro de sismo de análisis 2

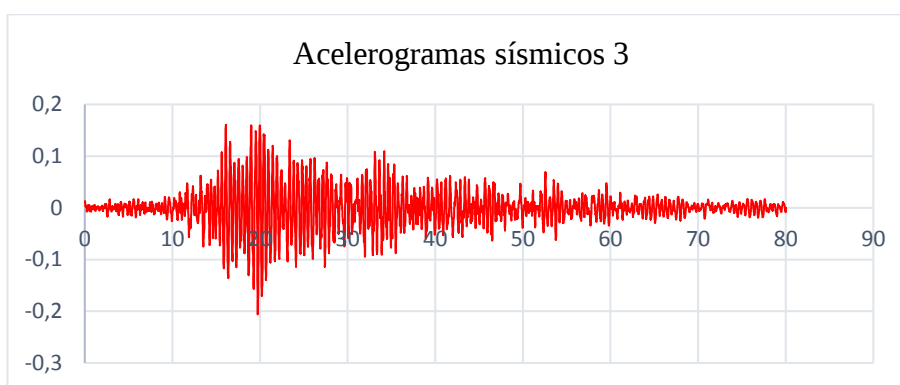


Figura 2.21: Registro de sismo de análisis 3

Una vez ejecutada la programación en OpenSees obtenemos los siguientes resultados.

Tabla 2.7: Desplazamientos en OpenSees

Pórtico	Desp. Sismo 1 (m)	Desp. Sismo 2 (m)	Desp. Sismo 3 (m)
1	0.009510	0.009844	0.010017
2	0.008860	0.008940	0.008990

2.8.3 Análisis Dinámico Lineal comparativo entre OpenSess y Etabs 2016

2.8.3.1 Análisis dinámico lineal

Realizamos una comparación de resultados de análisis modal y tiempo historia realizados en Etabs como en OpenSees.

Tabla 2.8: Resultado análisis modal

Pórtico	OpenSees T(seg)	Etabs 2016 T(seg)
1	0.3628	0.368

2	0.3472	0.35
---	--------	------

Los resultados del análisis modal tanto en OpenSees como en Etabs representan igual similitud en el análisis dinámico lineal, es decir, se realiza un correcto ingreso de datos.

Tabla 2.9: Resultado análisis tiempo historia

	OpenSees		Etabs 2016	
Pórtico 1	Desplazamiento (m)	Deriva (%)	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.009510	1.8114	0.009792	1.8651
Sismo 2	0.009844	1.8751	0.009810	1.8686
Sismo 3	0.010017	1.9079	0.010100	1.9238
	OpenSees		Etabs 2016	
Pórtico 2	Desplazamiento (m)	Deriva (%)	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.008860	1.6876	0.008948	1.7044
Sismo 2	0.008940	1.7029	0.009066	1.7269
Sismo 3	0.008990	1.7123	0.009376	1.7859

Se muestra los desplazamientos obtenidos en los dos programas, se puede observar que en el análisis dinámico lineal no presentan deformación residual.

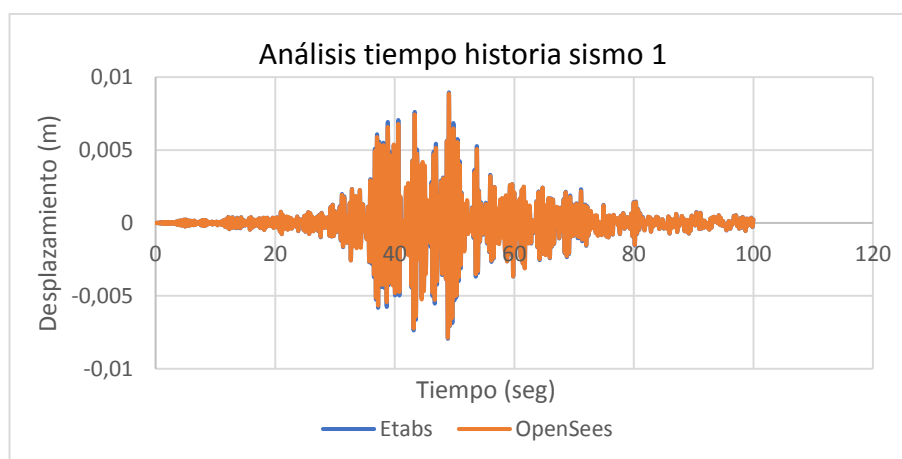


Figura 2.22: Análisis tiempo historia sismo 1

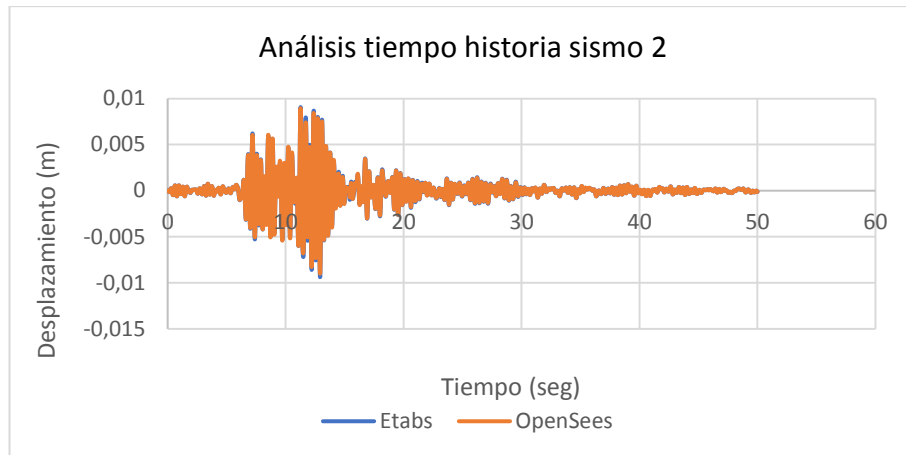


Figura 2.23: Análisis tiempo historia sismo 2

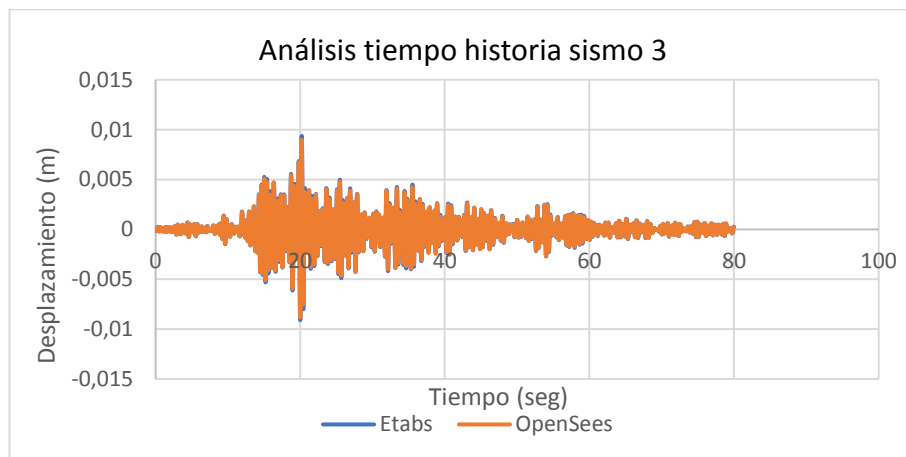


Figura 2.24: Análisis tiempo historia sismo 3

Las curvas de desplazamiento obtenidas en OpenSees y Etabs, de cada uno de los sismos presentan igual similitud en deformaciones; representando un correcto análisis dinámico lineal en los dos programas.

2.8.3.2 Análisis dinámico lineal con inercias agrietadas

Se analiza con inercias agrietadas para el cálculo de derivas máximas en las secciones de hormigón armado, con el fin de prevenir cualquier tipo de falla en miembros estructurales.

Tabla 2.10: Resultado análisis tiempo historia con inercias agrietadas

	OpenSees		Etabs 2016	
Pórtico 1	Desplazamiento (m)	Deriva (%)	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.016937	3.226	0.017344	3.304
Sismo 2	0.016078	3.062	0.016993	3.237
Sismo 3	0.016832	3.206	0.017782	3.387
	OpenSees		Etabs 2016	
Pórtico 2	Desplazamiento (m)	Deriva (%)	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.074377	14.1670	0.074937	14.2737
Sismo 2	0.074580	14.2056	0.075290	14.3410
Sismo 3	0.068792	13.1033	0.069414	13.2217

2.9 Análisis Dinámico no Lineal en el software OpenSees

Se define la sección y geometría de cada uno de los pórticos a modelar, además de los materiales como el hormigón y el acero de refuerzo, detallando un modelo por fibras de cada material.

Rutina Concrete01, Steel01. (Anexo 6)

2.10 Análisis tiempo historia

2.10.1 Análisis con un período de retorno de 475 años

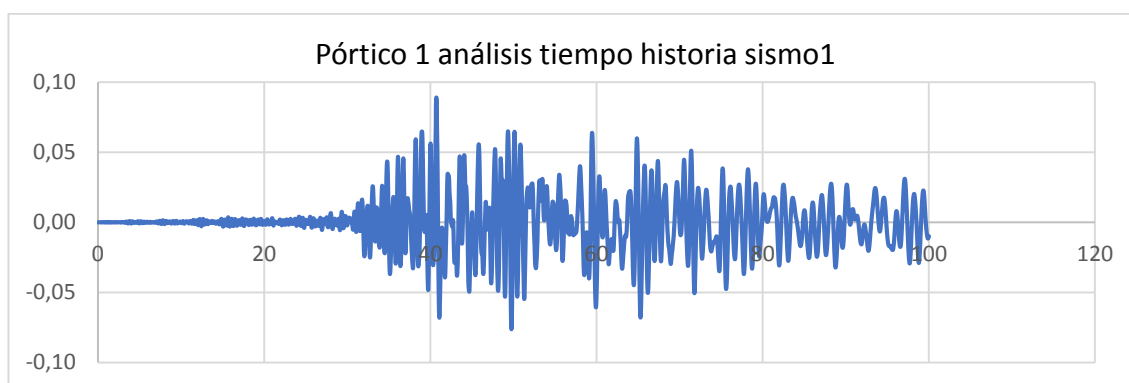


Figura 2.25: Análisis tiempo historia sismo 1



Figura 2.26: Análisis tiempo historia sismo 2

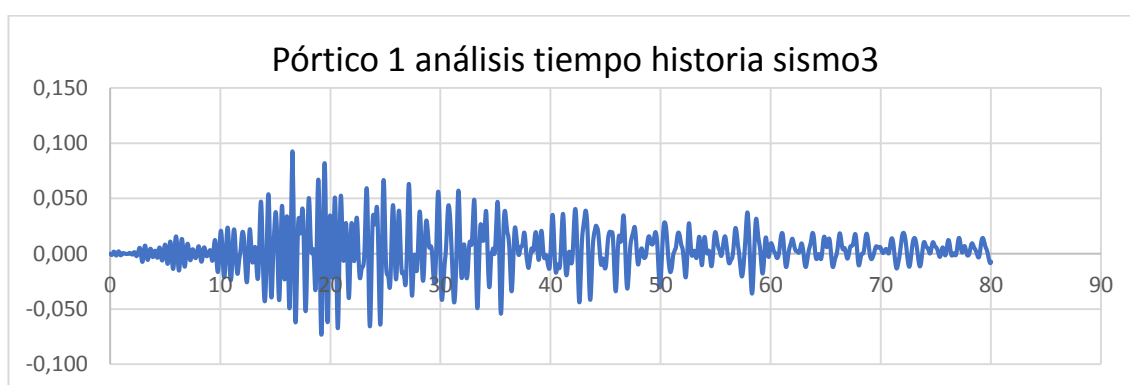


Figura 2.27: Análisis tiempo historia sismo 3

Las gráficas del análisis tiempo historia se pueden apreciar que presenta deformación residual; la estructura se encuentra en el rango inelástico.

Tabla 2.11: Análisis tiempo historia 475 años

Espectro de diseño (475 años)		
PÓRTICO 1	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.086103	2.0501
Sismo 2	0.085771	2.0422
Sismo 3	0.086100	2.0500
PÓRTICO 2	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.089093	2.1213
Sismo 2	0.100607	2.3954
Sismo 3	0.092532	2.2031

Al analizar las respuestas de los desplazamientos en los pórticos, se puede observar que presentan una deformación residual y no cumplen con lo establecido en la

Norma Ecuatoriana de la Construcción, que limita las derivas a valores menores al 2%.

2.10.2 Análisis con un período de retorno de 2500 años

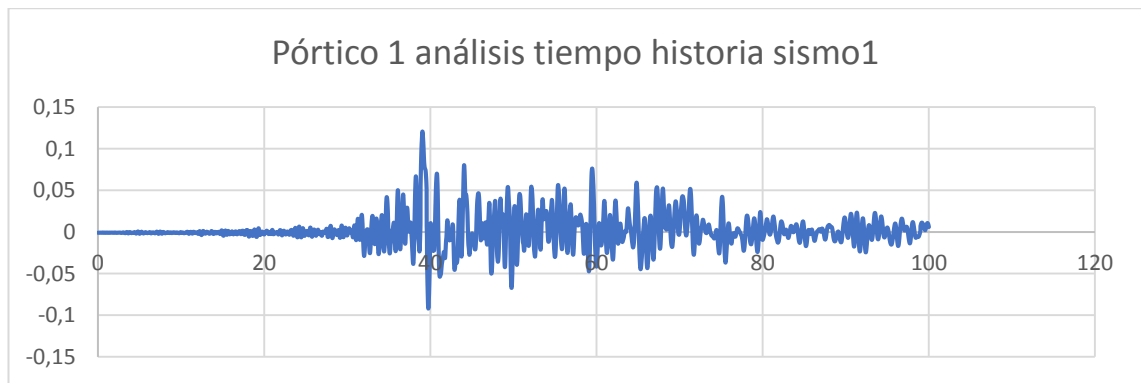


Figura 2.28: Análisis tiempo historia sismo1 2500 años



Figura 2.29: Análisis tiempo historia sismo2 2500 años

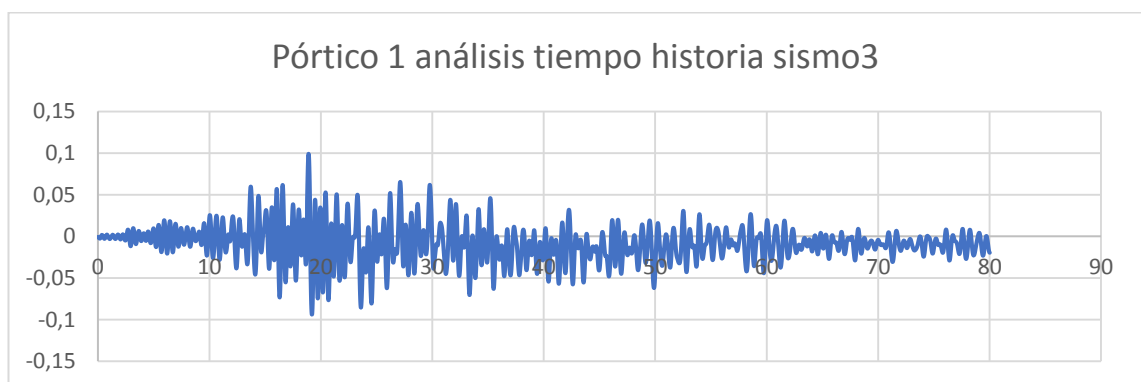


Figura 2.30: Análisis tiempo historia Sismo3 2500 años

Tabla 2.12: Análisis tiempo historia 2500 años

Espectro de diseño (2500 años)		
PÓRTICO 1	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.120743	3.8331
Sismo 2	0.131099	4.1619
Sismo 3	0.099039	3.1441
PÓRTICO 2	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.128835	4.0900
Sismo 2	0.134769	4.2784
Sismo 3	0.122259	3.8812

2.11 Análisis estático no lineal (Pushover)

Determina la curva de capacidad resistente de la estructura al utilizar una combinación de fuerzas laterales con los efectos P-Delta; curva que relaciona el cortante V con el desplazamiento lateral máximo en el tope de la estructura, aplicando una fuerza lateral en forma progresiva hasta obtener los desplazamientos o se produzca el colapso de la estructura.

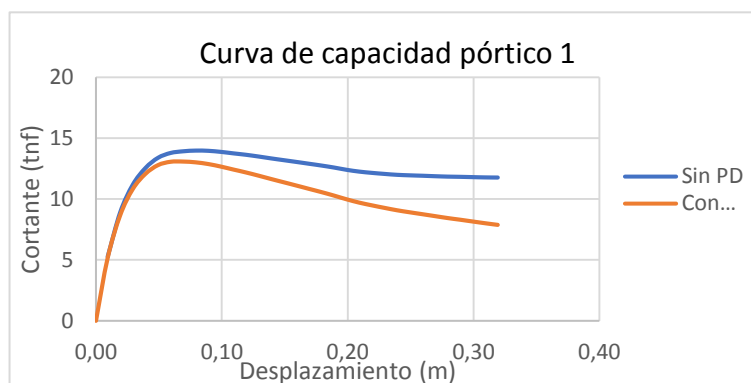


Figura 2.31: Curva de capacidad pòrtico 1

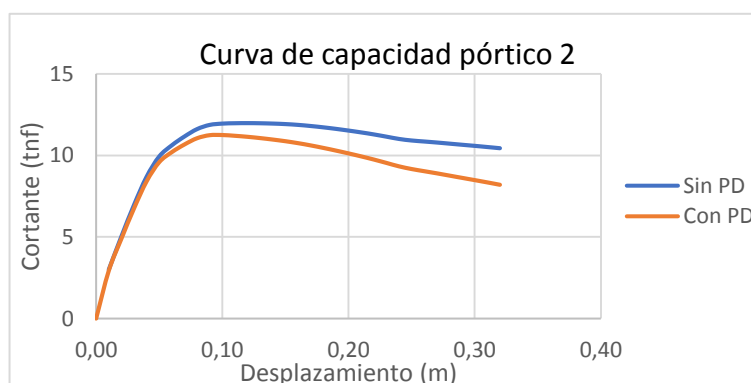


Figura 2.32: Curva de capacidad pòrtico 2

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC - Peligro Sísmico, 2014) especifica los parámetros necesarios para calcular el cortante basal de cada pórtico, y comparamos con la curva de capacidad de su respectivo pórtico.

Tabla 2.13: Cortante basal

Pórtico	Cortante basal (tnf)	Curva de capacidad (tnf)	CC/CB
1	6.94	13.08	1.88
2	4.47	11.28	2.52

Los pórticos construidos se encuentran al doble de su capacidad de diseño.

2.11.1 Análisis de vibración libre

Determinamos el amortiguamiento propio de la estructura, realizando un análisis de vibración libre en OpenSees con interface en Matlab, teniendo un amortiguamiento del 3% en cada pórtico.

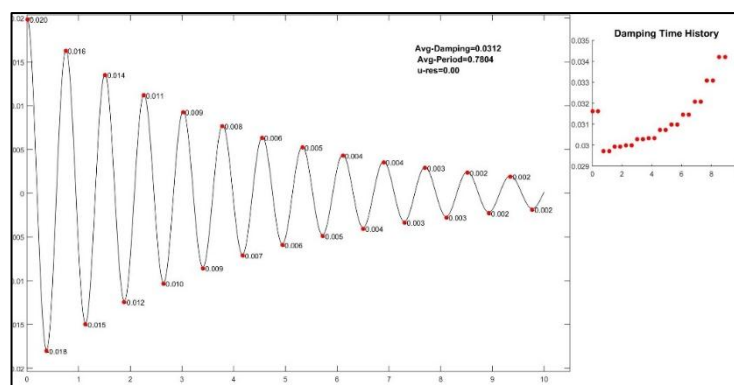


Figura 2.33: Vibración libre pórtico 1 Matlab

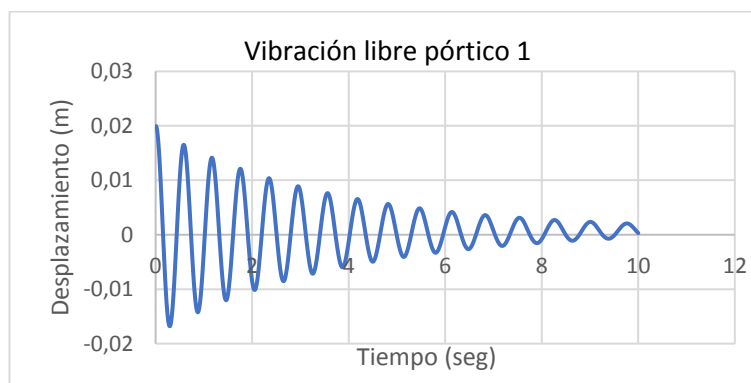


Figura 2.34: Vibración libre pórtico 1 OpenSees

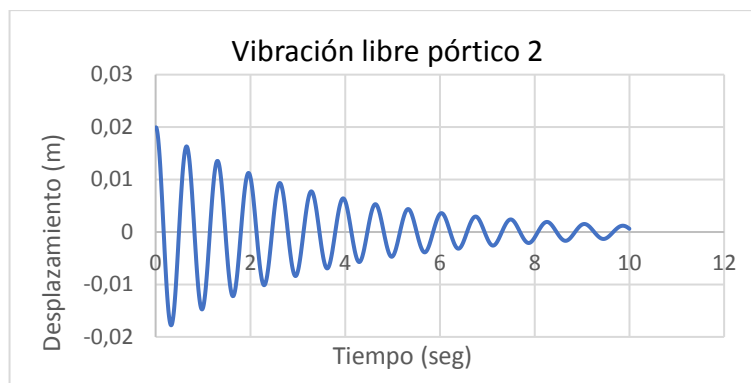


Figura 2.35: Vibración libre pódico 2 OpenSees

2.12 Curva de histéresis

Nos determina la energía de disipación de cada pódico.

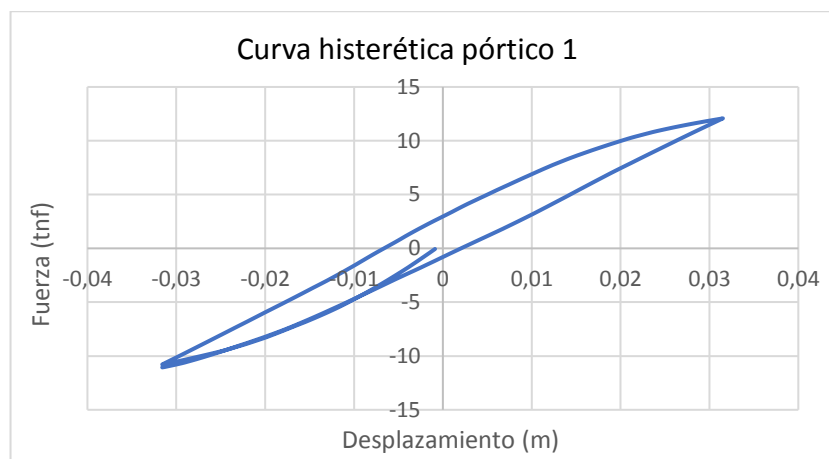


Figura 2.36: Curva histérica pódico 1



Figura 2.37: Curva histérica pódico 2

CAPÍTULO III

3 MEDIDAS DE MITIGACIÓN

En el presente capítulo se propone como medida de mitigación el aislamiento basal sísmico, realizando un análisis sísmico de la estructura dentro del rango no lineal, con el objetivo de que en el análisis disminuyan las derivas. La medida de mitigación propuesta con aislamiento basal tiene como alcance el pre-dimensionamiento de un aislador sísmico LBR, basado en el modelo bilineal.

3.1 Aislamiento basal sísmico

El aislamiento basal sísmico consiste en la instalación de un sistema para desacoplar la estructura de la cimentación con el fin de reducir el daño potencial que pueden ocasionar los movimientos sísmicos, alcanzando el objetivo mediante el incremento de la flexibilidad del sistema con un apropiado amortiguamiento, aunque esta tecnología se denomina nueva dentro del campo constructivo, esta puede encontrarse en diversas estructuras donde han sido implementadas para solucionar una gran variedad de problemas sísmicos de diseño. En algunas ocasiones el aislamiento sísmico se considera como una opción más económica al momento de requerir cierto nivel de resistencia sísmica y brindar seguridad a estructuras, esta reducción en el costo se puede reflejar en la disminución de fuerzas sísmicas, ductilidad requerida, elementos resistentes más simples y deformaciones estructurales menores, puesto que la energía del sismo se concentra en el sistema de aislación. Usualmente la variación en costo de estructuras aisladas varía entre $\pm$ [5-10] % con respecto a estructuras no aisladas. (Tapia & Veletanga, 2017)

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)

Los aisladores elastoméricos 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 recrystaliza. De esta forma el sistema queda listo para un nuevo evento sísmico. (Nitsche, 2012)

3.3 Pre-dimensionamiento del Aislador Sísmico (LBR)

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

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 aisladores sísmicos (LBR)

Pórtico	Desplazamiento(cm)	h(cm)	Dp(cm)	De(cm)
1	27.95	20	2	17
2	25.86	20	1	10

3.5 Modelamiento del Aislador Sísmico (LBR) en OpenSees

El identificador en OpenSees para el aislador sísmico (LBR) es uniaxialMaterial KikuchiAikenLRB, produciendo curvas de histéresis no lineales. (Anexo 7)

Determinado las dimensiones de cada aislador para sus respectivos pórticos, se procede a modelar cada aislador sísmico en OpenSees, obteniendo las curvas de histéresis y comprobando que los modelos sean los correctos.



Figura 3.1: Curva de histéresis aislador pórtico 1



Figura 3.2: Curva de histéresis aislador pórtico 2

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

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

Analizamos los modelos de aisladores sísmicos pre-dimensionados para cada pórtico, verificando que el período fundamental de cada pórtico aumente, con el propósito de alejar a la estructura de los períodos predominantes, disminuyendo así los desplazamientos; realizamos un análisis modal y un análisis tiempo historia.

Tabla 3.2: Análisis modal con aisladores sísmicos

Desplazamiento con aislador (m)				
	Período	Sismo 1	Sismo 2	Sismo 3
Pórtico 1	1.0953	0.698981	0.523675	0.296122
Pórtico 2	1.2305	0.548713	0.465792	0.315689

Tabla 3.3: Análisis tiempo historia con aislador sísmico

Tiempo historia con aislador		
Pórtico 1	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.034284	0.8163
Sismo 2	0.027322	0.6505
Sismo 3	0.016395	0.3904
Pórtico 2	Desplazamiento (m)	Deriva (%)
Sismo 1	0.023030	0.5483
Sismo 2	0.020544	0.4891
Sismo 3	0.015702	0.3739

Con el análisis realizado a cada pórtico con su respectivo aislador sísmico (LBR) en OpenSees, se verificó que el período fundamental de la estructura aumenta significativamente, alejando a la estructura de los períodos predominantes, disminuyendo así sus desplazamientos.

Analizamos como actúa cada pórtico con su respectivo aislador en OpenSees, graficando su curva histéretica.

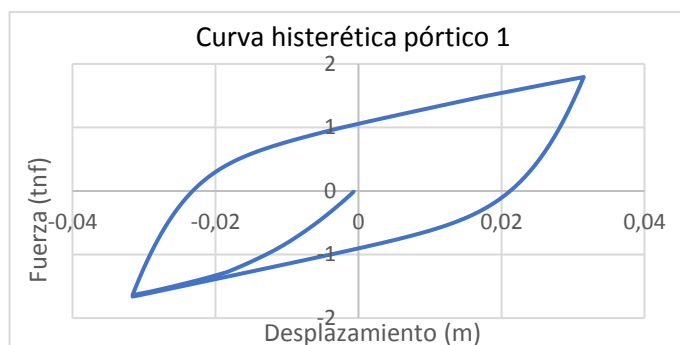


Figura 3.3: Curva histéretica con aislador pórtico 1

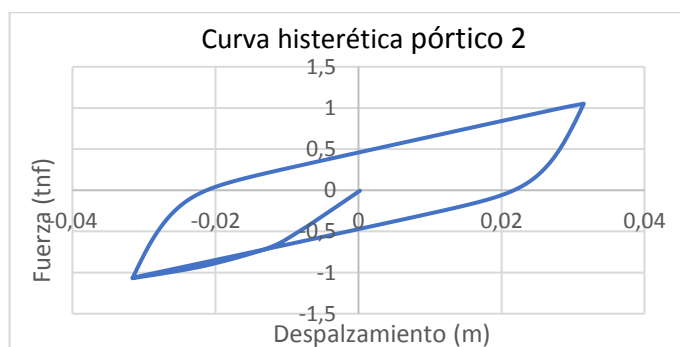


Figura 3.4: Curva histéretica con aislador pórtico 2

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISIS PRESUPUESTARIO

El presente capítulo hace referencia a la parte económica de la entidad hospitalaria San Sebastián del cantón Sígsig, realizando un costo conceptual de la estructura convencional y de la estructura con aisladores sísmicos (LBR); comparar costos, verificando la factibilidad económica de la medida de mitigación propuesta.

4.1 Estimación del costo total de la entidad hospitalaria San Sebastián

Para realizar la estimación del costo por metro cuadrado de la estructura convencional 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 m²

Centro de salud tipo C materno infantil y emergencia ciudad de Cuenca	
Costo total de construcción	\$ 4,161,887.43
Área total de construcción	2719
Costo por m ²	\$ 1,530.67

Tabla 4.2: Estimación del costo hospital San Sebastián

Entidad hospitalaria San Sebastián				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Área de construcción	m ²	2253	\$ 1,530.67	\$ 3,448,595.95

4.2 Elaboración del presupuesto de las medidas propuestas en el Capítulo 3

Calculamos el costo por metro cuadrado de construcción del hospital San Sebastián, tanto estructura convencional como aislada; para el precio unitario del aislador sísmico (LBR), se toma como referencia el trabajo de investigación de la Ing. Leidy Núñez. (Ñuñez, 2014)

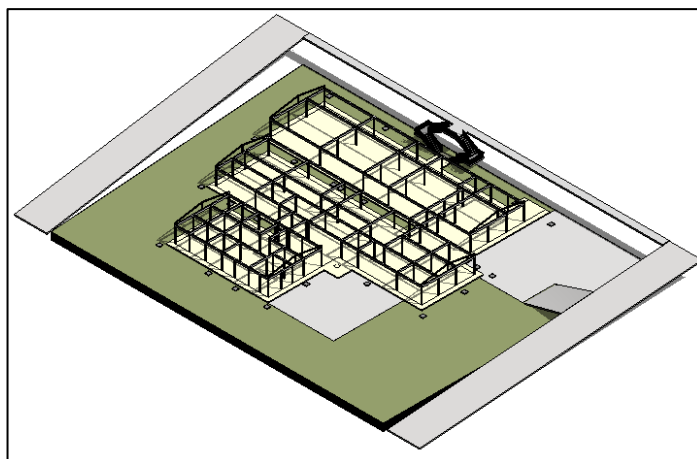


Figura 4.1: Distribución de columnas

Fuente: (Bermeo, 2016)

Tabla 4.3: Estimación del costo de la estructura aislada

Entidad Hospitalaria San Sebastián				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Área de construcción	m ²	2253	\$ 1,530.67	\$ 3,448,595.95
Aislador Sísmico (LBR)	u	98	\$ 1,750.00	\$ 171,500.00
Estructura Aislada				\$ 3,620,095.95

Realizado la estimación observamos que la estructura aislada es mayor en su costo que la estructura convencional, teniendo un aumento en la inversión en un 4.97%, este valor no es significativo, al comparar el comportamiento de la estructura convencional frente a la estructura aislada, ya que el objetivo principal de los dispositivos de aislación sísmica es mejorar la seguridad de las estructuras.

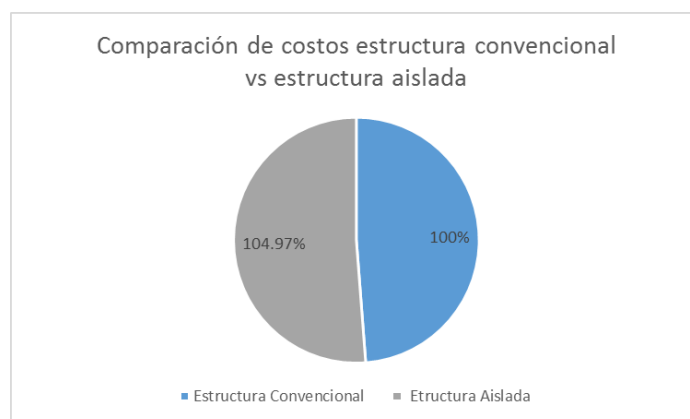


Figura 4.2: Comparación en porcentaje del costo de la estructura convencional vs aislada

CONCLUSIONES

Con el análisis dinámico no lineal de la entidad hospitalaria San Sebastián, debido a su diseño, se mejoró el comportamiento tanto estructural como económico, además de incrementar el nivel de protección de la estructura, proponiendo que las estructuras se puedan mantener operacionales aun después de la ocurrencia del sismo de diseño con un período de retorno de 2500 años; se implementó un sistema de aislación basal, analizando un aislador sísmico (LBR), que demostró bajar la vulnerabilidad de la edificación.

Con los resultados del análisis dinámico no lineal realizado en el softwares OpenSees en la entidad hospitalaria San Sebastián, mediante la aplicación de la NEC-11, con un espectro de respuesta con un período de retorno de 475 años, la entidad hospitalaria convencional no alcanzó buen desempeño estructural, presentó resultados en cuanto a derivas dentro del rango inelástico que fueron mayores al 2%, presentando deformaciones residuales en cada uno de los pórticos; analizándola con un espectro de respuestas con un período de retorno de 2500 años, en cuanto a derivas alcanzaron un 5%, es decir produjo un colapso parcial o total de la estructura convencional.

Para el pre diseño del sistema aislado, se tomó en consideración lo establecido en la norma NEC-11, y la norma ASCE 7-10 que hace referencia al comportamiento dinámico de edificios con aisladores sísmicos, se aplica una análisis dinámico con el espectro de respuesta para un período de retorno de 475 años y 2500 años respectivamente, dado por la norma NEC-11; se considera un período objetivo de 2.0 segundos, pre dimensionando cada dispositivo de aislación sísmica; con el período objetivo se alejó a la estructura de las zonas de mayor energía sísmica, asegurando buenos niveles de respuesta, se utilizará un total de 98 aisladores sísmicos (LBR).

Para la estructura aislada se observa que aumenta el porcentaje de amortiguamiento respecto de la estructura convencional, los desplazamientos disminuyen significativamente llegando a ser menores al 1%, para controlar los desplazamientos

de los sismos elegidos, se aumentó el amortiguamiento de la estructura aislada; el aislamiento representa una alternativa confiable y económica.

Las derivas obtenidas en el análisis de la estructura convencional son mayores en magnitud que las obtenidas después de implementar el análisis con aisladores, esto se presenta al incluir la rigidez de los aisladores dentro del análisis y permitir el movimiento de la base en las direcciones principales, se logró que toda la estructura se desplace. Los desplazamientos relativos de la estructura aislada son mínimos, debido a que la estructura se comporta como un cuerpo rígido; el aislador absorbe toda la energía del suelo sufriendo grandes desplazamientos en la interfaz del aislador.

Obtenidos los análisis económicos de la entidad hospitalaria San Sebastián como una estructura convencional, demanda un ahorro del 4.97%, comparada con la estructura aislada, el ahorro de los aisladores no se mide en el momento de la construcción sino después de un evento sísmico de consideración.

Con los resultados presentados en el presente trabajo se puede evidenciar que es conveniente la mitigación de sistemas de aislación sísmica de base, este tipo de sistema reduce los desplazamientos, aceleraciones y esfuerzos en distintos elementos estructurales; además se concluye que las estructuras con aisladores sísmicos de base son la mejor solución para construir en zonas de peligro, siendo estos sistemas una solución económica viable.

RECOMENDACIONES

Nuestro país se encuentra ubicado en una zona de alto riesgo sísmico, por lo que se recomienda que tomemos en cuenta las ventajas que nos puede ofrecer un sistema de aislamiento sísmico en cualquier tipo de edificación, de esta manera podemos reducir la vulnerabilidad que se pueda presentar en las estructuras, principalmente en las esenciales.

Dentro de la posibilidad de implementar los sistemas de aislación sísmica en la entidad hospitalaria San Sebastián, se debe tener a consideración que el análisis costo benéfico nos representa una solución tanto económica como estructuralmente correcta, se debe considerar que la edificación tiene 40 años de construcción, aunque es probable que el hospital continúe funcionando con el aislamiento sísmico, se recomienda continuar con medidas para mejorar la capacidad de respuesta y seguridad funcional de la misma, incluso analizar el desempeño de la estructura con disipación sísmica.

Es recomendable construir una nueva entidad hospitalaria con aislamiento basal, ya que el costo de los aisladores representa un monto mínimo comparada con el costo de la edificación, verificando que se realice la adecuada conexión entre la cimentación, el aislador y el edificio.

Tratar de promover este tipo de investigaciones en todo el país, incentivando la utilización de aisladores sísmicos y disipadores, ya que son sistemas que se aplica en varios países del mundo por su gran efectividad y permiten 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.
- ASCE 7-10. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*.
- Bermeo, C. (2016). *Evaluación Estructural del "Hospital San Sebastián" del Cantón Sígig - provincia del Azuay, para Cuantificar las Amenazas y Vulnerabilidad de la Edificación Hospitalaria*. Cuenca, Ecuador.
- 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.
- Kelly, J. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*.
- Mendoza, D. (2012). *Sensibilidad a parámetros de modelamiento estructural e incertidumbre*. Loja - Ecuador.
- Ministerio de Salud Pública. (Octubre de 2007). *Política Nacional de Hospitales Seguros*.
- NEC - Cargas no Sísmicas. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción - Cargas no Sísmicas*. Ecuador.
- NEC - Peligro Sísmico. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción - Peligro Sísmico*. Ecuador.

- NEC - Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción - Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras*. 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. (1997). *Lecciones Aprendidas en América Latina de Mitigación de Desastres en Instalaciones de la Salud*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2000). *Fundamentos de la Mitigación de Desastres en Establecimientos de la Salud*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2004). *Guía para la reducción de la vulnerabilidad en el diseño de nuevos establecimientos de salud*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2013). *Hospitales Seguros. Sistematización de experiencias en la República Dominicana*.
- Ortiz, O. (2013). *Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador*. Madrid, España.
- Tapia, C., & Veletanga, L. (2017). *DISEÑO DE AISLADORES SÍSMICOS LRB Y ANALISIS POR DESEMPEÑO DE EDIFICIOS*.
- Ugarte, C. (2010). *Índice de Seguridad Hospitalaria, Retos de la Gestión de Riesgos 1-39*.