



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Estructuras

**CONSIDERACIONES ESENCIALES DE DISEÑO ESTRUCTURAL PARA UN EDIFICIO
HOSPITALARIO AISLADO SÍSMICAMENTE**

Ing. Edgar Emanuel López Cano

Asesorado por el Mtro. Ing. Oscar Andrés García Valdés

Guatemala, octubre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSIDERACIONES ESENCIALES DE DISEÑO ESTRUCTURAL PARA UN EDIFICIO
HOSPITALARIO AISLADO SÍSMICAMENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. EDGAR EMANUEL LÓPEZ CANO

ASESORADO POR EL MTRO. ING. OSCAR ANDRÉS GARCÍA VALDÉS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Ing. José Estuardo Galindo Escobar
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CONSIDERACIONES ESENCIALES DE DISEÑO ESTRUCTURAL PARA UN EDIFICIO HOSPITALARIO AISLADO SÍSMICAMENTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 8 de agosto 2020.

Ing. Edgar Emanuel López Cano

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.668.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **CONSIDERACIONES ESENCIALES DE DISEÑO ESTRUCTURAL PARA UN EDIFICIO HOSPITALARIO AISLADO SÍSMICAMENTE**, presentado por: **Edgar Emanuel López Cano**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, octubre de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, octubre de 2022

LNG.EEP.OI.668.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“CONSIDERACIONES ESENCIALES DE DISEÑO ESTRUCTURAL PARA UN EDIFICIO HOSPITALARIO AISLADO SÍSMICAMENTE”

presentado por **Edgar Emanuel López Cano** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**





Guatemala, 18 de noviembre de 2021

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN titulada: "CONSIDERACIONES ESENCIALES DE DISEÑO ESTRUCTURAL PARA UN EDIFICIO HOSPITALARIO AISLADO SÍSMICAMENTE" del estudiante Edgar Emanuel López Cano, quien se identifica con numero de carné 200312916, del programa de Maestría en Estructuras.

Con base en la evaluación realizada, se hace constar que se ha evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.

Por lo anterior, se entrega con la presente, la hoja de evaluación aprobada por el docente del curso y toda la documentación administrativa de respaldo, para su aprobación correspondiente por parte de la Escuela de Estudios de Postgrado.

Sin otro particular

Vo.Bo. Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 18 de noviembre del 2021

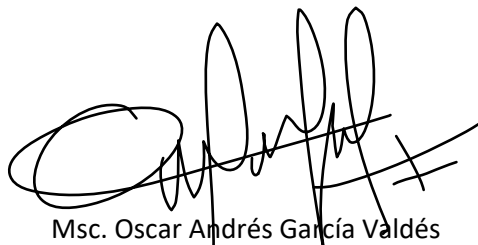
MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** del (la) alumno (a):

Carné:	200312916
Alumno:	Edgar Emanuel López Cano
Maestría:	Estructuras
Título de la Investigación:	CONSIDERACIONES ESENCIALES DE DISEÑO ESTRUCTURAL PARA UN EDIFICIO HOSPITALARIO AISLADO SÍSMICAMENTE

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sin otro particular



Msc. Oscar Andrés García Valdés
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	¡A Él sea la honra y la gloria por siempre!
Mis padres	Edgar López y Aura Cano (q. d. e. p.), por su amor, dedicación y guiarme por este camino.
Mi amada	Por su amor y apoyo incondicional en todo este proceso.
Mis hijos	Emanuel y Andreé López, por ser la felicidad de mi corazón.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser el centro de enseñanza y aprendizaje
donde adopte los conocimientos de mi carrera.

Mi asesor

Mtro. Ing. Andrés García, por su valiosa
asesoría en el presente trabajo de graduación.

SDIM

Por su colaboración en el desarrollo de este
trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. CONSIDERACIONES ESENCIALES	1
1.1. Clasificación de hospitales.....	1
1.1.1. Categoría IV: obras esenciales	1
1.2. Cargas muertas	3
1.3. Cargas muertas superpuestas	4
1.3.1. Pisos.....	4
1.3.2. Tabiques y particiones	4
1.3.3. Fachadas y cerramientos perimetrales	5
1.4. Cargas especiales	6
1.4.1. Información del proyecto.....	6
1.4.2. Equipos pesados y cargas especiales	6
1.4.3. Equipos fijos	7
1.4.4. Cargas móviles	7
1.4.5. Fluidos	7
1.5. Cargas vivas.....	7
1.5.1. Cargas uniformemente distribuidas.....	8
1.5.2. Cargas concentradas	9
1.5.3. Cargas concentradas en estacionamientos.....	9

1.5.4.	Escaleras.....	10
1.5.5.	Cargas vivas para cubiertas pesadas, con o sin acceso	10
1.6.	Empuje en pasamanos y barandas	11
1.7.	Impacto	12
1.8.	Reducción de carga viva	12
1.9.	Descripción arquitectónica hospitalaria	14
2.	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	17
2.1.	Descripción de la estructura	17
2.2.	Modelado de la estructura	18
2.3.	Sistemas estructurales	21
2.3.1.	Tipologías AD	21
2.3.2.	Tipologías DI	21
2.3.3.	Tipologías BD	22
2.4.	Definición de materiales	22
2.5.	Cargas sísmicas.....	24
2.5.1.	Aspectos sísmicos.....	24
2.5.2.	Índice de sismicidad	24
2.5.3.	Nivel mínimo de protección	24
2.5.4.	Parámetros espectrales.....	25
2.5.5.	Ajuste por clase de sitio.....	26
2.5.6.	Ajuste por intensidades sísmicas especiales	28
2.5.7.	Clasificación de sitio	30
2.5.7.1.	Perfil de suelo de los sitios clase A, B....	31
2.5.7.2.	Perfil de suelo de los sitios clase F	31
2.5.7.3.	Perfil de suelo en los sitios clase C, D o E	31
2.5.8.	Periodo de transición	31

2.5.9.	Probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño	32
3.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL SISTEMA AISLADO	35
3.1.	Aisladores con núcleo de plomo	35
3.2.	Rigidez efectiva de un aislador	36
3.3.	Amortiguación efectiva	37
3.4.	Rigidez efectiva máxima y mínima.....	38
3.5.	Módulo de corte	39
3.6.	Compresión de los aisladores.....	39
3.7.	Periodo efectivo en el desplazamiento de diseño	40
3.8.	Periodo efectivo en el desplazamiento máximo	40
3.9.	Desplazamiento máximo.....	41
3.10.	Desplazamiento de diseño.....	42
3.11.	Desplazamiento máximo total	44
3.12.	Carga axial última	45
3.13.	Área de aisladores.....	45
3.14.	Deslizadores friccionantes	46
4.	ANÁLISIS DINÁMICO	49
4.1.	Análisis modal espectral	49
4.2.	Determinación del cortante de diseño.....	49
4.3.	Control de derivas.....	51
4.4.	Desplazamiento total	51
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
5.1.	Modelamiento estructural del edificio en base fija	53
5.1.1.	Definición de columnas y vigas	54
5.1.2.	Definición de losas	54

5.1.3.	Definición de diafragmas rígidos.....	54
5.1.4.	Definición de los casos de carga	54
5.1.5.	Definición de cargas	55
5.1.6.	Definición de fuentes de masa sísmica.....	55
5.1.7.	Definición de modos y periodos fundamentales.....	56
5.1.8.	Determinación del peso sísmico	57
5.2.	Análisis estático equivalente del edificio con base aislada	58
5.2.1.	Periodo fundamental con base aislada	60
5.2.2.	Amortiguamiento efectivo	61
5.2.3.	Rigidez lateral de la superestructura.....	62
5.2.4.	Rigidez lateral del sistema aislado.....	63
5.2.5.	Comparación entre rigidez lateral aislada y de la superestructura	64
5.2.6.	Rigidez efectiva del aislador	65
5.2.7.	Definir parámetros sísmicos	66
5.2.8.	Cálculo del desplazamiento máximo.....	68
5.2.9.	Cálculo del desplazamiento total máximo	68
5.2.10.	Cálculo de la junta sísmica perimetral	69
5.2.11.	Definir parámetros para el análisis modal espectral.....	70
5.2.12.	Cálculo del cortante de diseño.....	71
5.2.13.	Cálculo de la fuerza cortante no reducida.....	72
5.3.	Modelado estructural del edificio con base aislada.....	73
5.3.1.	Combinaciones de carga para sistemas de aislamiento	78
5.3.1.1.	Carga vertical promedio	78
5.3.1.2.	Carga vertical máxima	79
5.3.1.3.	Carga vertical mínima	79
5.3.2.	Chequeo de tracciones en la base	80

5.3.3.	Cálculo del peso sísmico	80
5.3.4.	Predimensionamiento de los dispositivos de aislamiento.....	80
5.3.5.	Balance torsional	83
5.3.6.	Diseño del aislador LRB.....	84
5.3.7.	Diseño del deslizador	90
5.3.8.	Rigidez del sistema de aislamiento	91
5.3.9.	Periodo fundamental de la estructura aislada	92
5.3.10.	Energía disipada en un ciclo	93
5.3.11.	Fuerza de restauración del sistema de aislamiento.....	93
5.4.	Análisis tiempo historia	93
5.4.1.	Registros sísmicos	94
5.4.2.	Resultados obtenidos.....	98
5.4.2.1.	Deformación de los aisladores	98
5.4.2.2.	Cálculo de deriva de piso	103
5.4.2.3.	Nivel de desempeño sísmico.....	104
CONCLUSIONES		105
RECOMENDACIONES.....		107
REFERENCIAS		109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa de ubicación de la estructura de estudio	17
2.	Área por utilizar	18
3.	Vista 3D del modelo estructural hospitalario	20
4.	Vista frontal 3D del modelo estructural hospitalario	20
5.	Mapa de zonificación sísmica de la República de Guatemala	26
6.	Comportamiento de una estructura aislada sísmicamente	35
7.	Partes de un aislador de corazón de plomo	36
8.	Comportamiento histerético de un aislador sísmico	37
9.	Diagrama de desplazamientos	42
10.	Capacidad del sistema aislado y demanda sísmica	44
11.	Partes de un deslizador friccionante	47
12.	Histéresis de un deslizador	47
13.	Grilla estructural del modelo	53
14.	Periodos de vibración	56
15.	Partes edificio en base aislada	58
16.	Amortiguamiento objetivo	62
17.	Junta sísmica perimetral	70
18.	Propiedades lineales equivalentes	71
19.	Fuerzas cortantes del sistema aislado	73
20.	Modelo estructural con base aislada	74
21.	Propiedades lineales de un aislador LRB	75
22.	Propiedades lineales en el eje Z	76
23.	Propiedades lineales para el eje X y Y	76

24.	Distribución de aisladores y deslizadores	82
25.	Balance torsional	83
26.	Registros sísmicos utilizados	95
27.	Espectros de aceleración	96
28.	Función definida tiempo historia	97
29.	Curvas de histéresis	98

TABLAS

I.	Categoría de las edificaciones y factor U	2
II.	Carga muerta de entrepiso	5
III.	Carga muerta de techo	5
IV.	Barandas y parapetos	12
V.	Dimensión de columnas	19
VI.	Dimensión de vigas	19
VII.	Propiedades del concreto $f'c$ 210 kg/cm ²	23
VIII.	Propiedades del concreto $f'c$ 280 kg/cm ²	23
IX.	Propiedades del acero	23
X.	Nivel mínimo de protección sísmica y probabilidad de sismo de diseño	25
XI.	Coeficiente de sitio F_a	27
XII.	Coeficiente de sitio F_v	28
XIII.	Tipo de fuente sísmica	29
XIV.	Factor N_a para periodos cortos de vibración	30
XV.	Factor N_v para periodos largos de vibración	30
XVI.	Factores K_d de acuerdo con el nivel de sismo	32
XVII.	Coeficiente de amortiguamiento, B_d o B_m	43
XVIII.	Aisladores elastoméricos considerados	46
XIX.	Casos de carga	54
XX.	Fuentes de masa sísmica	55

XXI.	Modos y periodos fundamentales en base fija.....	56
XXII.	Masa del edificio en base fija	57
XXIII.	Masa del edificio aislado	59
XXIV.	Modos y periodos fundamentales en base fija.....	60
XXV.	Espectro de diseño.....	66
XXVI.	Modos y periodos fundamentales en base aislada con un tipo de aislador LRB	77
XXVII.	Modos y periodos fundamentales en base aislada con un tipo de aislador LRB	78
XXVIII.	Tipos de dispositivos	81
XXIX.	Cálculo de centro de masa y rigidez.....	84
XXX.	Diseño del aislador LRB 1	85
XXXI.	Diseño del aislador LRB 3	87
XXXII.	Diseño del deslizador plano	90
XXXIII.	Rigidez del sistema de aislamiento	91
XXXIV.	Energía disipada del sistema de aislamiento.....	93
XXXV.	Registros sísmicos	94
XXXVI.	Deriva de piso sismo IWATE EO.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Scs	Aceleración espectral con factor de ajuste de sitio para periodos cortos
S1s	Aceleración espectral con factor de ajuste de sitio para periodos de 1 s
Scd	Aceleración espectral de diseño para periodos cortos
S1d	Aceleración espectral de diseño para periodos de 1 s
Scr	Aceleración espectral en roca para periodos cortos
S1r	Aceleración espectral en roca para periodos de 1 s
Ash	Área de refuerzo horizontal
Avh	Área de refuerzo vertical
As	Área del acero de refuerzo
Ce	Coeficiente de exposición
Dp	Desplazamiento lateral del piso
Fvs	Esfuerzos admisibles a corte en el acero
Kd	Factor de escala para reducir el sismo
Ip	Factor de importancia en sismo
Fa	Factor de modificación por tipo de suelo para periodos cortos
Fv	Factor de modificación por tipo de suelo para periodos mayores de 1 s
Na	Factor de proximidad de amenazas especiales para períodos cortos

Nv	Factor de proximidad de amenazas especiales para periodos largos
I_o	Índice de sismicidad
F_y	Límite de fluencia en el acero
E_s	Módulo de elasticidad del acero
T_s	Periodo de transición del espectro de diseño
T	Periodos de vibración

GLOSARIO

AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
ASCE	Asociación Norteamericana de Ingenieros Civiles (<i>American Society of Civil Engineers</i>).
Carga de servicio	Combinación que incluye todas las cargas sin modificarlas.
Carga muerta	Carga permanente presente en el elemento de diseño.
Carga viva	Carga de ocupación presente en el elemento de diseño.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No existen parámetros normados técnicamente para edificaciones hospitalarias clasificadas como esenciales, donde describan las características y el comportamiento de la estructura aislada sísmicamente.

En Guatemala, existe una red hospitalaria con diversidad de edificaciones, donde uno de los más antiguos y con mayor, tamaño y extensión, es el Hospital Roosevelt, el cual fue diseñado alrededor de la década de 1940 con una estructura de marcos rígidos de concreto reforzado para doscientas camas, pero debido a la demanda ha incrementado su capacidad hasta 1,115 camas.

Debido a la cantidad de personas que ingresan diariamente a las consultas externas de dicho hospital, el actual edificio alcanzó su capacidad máxima porque ya no tiene espacio físico para la cantidad de personas que necesitan atención médica, por lo que es necesario la construcción de una nueva ala del edificio de la consulta externa, proyecto que está solicitado por las autoridades de dicha institución, para brindar un servicio óptimo a los pacientes.

Por lo cual es necesario describir una metodología de diseño estructural para un edificio hospitalario que proporcione todas las disposiciones esenciales, para que su funcionamiento sea el óptimo en el momento de una emergencia a causa de un evento sísmico severo. Para ello se debe analizar el conjunto de criterios de estructuración, predimensionamiento, sistema de aislamiento, consideraciones de diseño en concreto armado, elementos estructurales y no estructurales.

Adicionalmente, la aislación sísmica de edificaciones consiste en colocar en la base una interfaz flexible entre el suelo y la estructura de manera que se reduzcan considerablemente las acciones generadas por las ondas sísmicas actuando lateralmente. Así, se puede optar por un diseño estructural con un factor de reducción de fuerzas sísmicas menor y se puede obtener como resultado una edificación resiliente que no sufrirá daños y permanecerá completamente operativa durante y después de un evento sísmico. La reducción de las aceleraciones también protege a los elementos no estructurales como los equipos médicos, medicamentos y personal operativo.

En tal sentido es importante cuestionar lo siguiente:

- Pregunta general

¿Cuáles son las consideraciones esenciales de diseño estructural para un edificio hospitalario aislado sísmicamente?

- Preguntas específicas
 - ¿Existen otros tipos de recomendaciones técnicas para el diseño de hospitales de otros países, que sean aplicables a Guatemala?
 - ¿Cuál es el nivel de desempeño sísmico que los hospitales deben tener bajo la normativa nacional y si esta es congruente con las internacionales existentes?
 - ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de utilizar un sistema de aislación de base?

OBJETIVOS

- General

Describir las consideraciones esenciales de diseño estructural para un edificio hospitalario aislado sísmicamente.

- Específicos

- Indicar las recomendaciones actuales para el diseño de hospitales seguros en países desarrollados para implementarlas en el país.
- Determinar el nivel de desempeño sísmico que los hospitales deben tener bajo la normativa nacional y comparar la congruencia con las internacionales existentes.
- Mencionar las ventajas y desventajas de utilizar un sistema aislado sísmicamente para edificios hospitalarios.

INTRODUCCIÓN

Las consideraciones esenciales de diseño estructural para edificaciones hospitalarias, describen todas las características generales y específicas del conjunto de elementos que se tomarán en cuenta para establecer el mayor nivel de seguridad estructural a un edificio clasificado como esencial. La condición sísmica de Guatemala, es altamente vulnerable a movimientos tectónicos frecuentes, por ello los hospitales se clasifican como obras esenciales y deben cumplir con diferentes características para garantizar su seguridad hacia las personas al momento de un evento sísmico severo.

Por lo tanto, este estudio describe las características de diseño estructural para este tipo de edificaciones, las cuales se basan en normativas nacionales e internacionales de ingeniería estructural. Aquí se desarrolló el diseño estructural del edificio hospitalario de consultas externas, el cual aportará todas las especificaciones estructurales para su construcción, el cual busca brindar un espacio adecuado para las personas que visitarán el Hospital Roosevelt.

La investigación realizó el análisis estructural de obras reales, iniciando por las características generales hasta llegar a las específicas necesarias para un edificio hospitalario aislado sísmicamente, donde se consideró las normativas nacionales e internacionales de ingeniería estructural. A través de este proceso, se analizó la historia y generalidades del Hospital Roosevelt, conteniendo aspectos geográficos, sociopolíticos, culturales, legales, ambientales, económicos y además los condicionantes climáticos, aspectos de mercado y la demanda a atender. En la actualidad el diseño estructural para edificios

hospitalarios aislados sísmicamente requiere un diseño específico acorde al comportamiento estructural de los elementos que lo conforman.

En el capítulo 1, se estudia, analiza y comprende todas las consideraciones esenciales relacionadas con la descripción de las normativas de diseño estructural que pueden afectar e influir en el diseño arquitectónico y estructural del edificio, así como la descripción arquitectónica del hospital.

El capítulo 2, trata el análisis y diseño del sistema estructural, enfocado en la distribución de la estructura según el diseño arquitectónico, sistema constructivo y material a utilizar, así como también el modelado de la estructura digital con el software ETABS, definición de materiales a utilizar para su estructura, según resistencia y propiedades de los elementos, cálculo e integración de cargas tales como vivas, muertas, sobrecargas y cargas de equipos especiales, determinación del peligro sísmico, respuesta de diseño elástico e inelástico, determinación del espectro de diseño, según las condiciones del sitio, tipo de suelo y localización de las fallas tectónicas.

En el capítulo 3, se aborda el diseño del sistema de aislamiento sísmico; compresión de los aisladores, definiendo diámetros iniciales, descarga estática y tensión admisible de compresión para cargas a largo plazo, definición del periodo aislado, obteniendo el periodo objetivo que deberá llegar al sistema aislado, se determinan las propiedades lineales equivalentes de los aisladores a emplearse, se implementan consideraciones sísmicas y factores de seguridad de los aisladores, utilizando aisladores elastoméricos, definiendo cargas axiales, torsionales y rotacionales.

El capítulo 4, aborda el análisis dinámico, tomando en cuenta el análisis modal espectral (AME) mejorando la distribución de la contribución modal y evitando la generación de torsiones en la estructura, se consideran las fuerzas laterales mínimas según la norma ASCE 7-16 para determinación del cortante de diseño, se considera los límites establecidos en la norma peruana E030, para el control de derivas, se aplica la norma ASCE 7-16 para el desplazamiento total de diseño y desplazamiento total máximo del sistema aislado, consideración de la máxima a tensión generada en los aisladores y se realiza la verificación de mínima fuerza de restauración lateral.

Finalmente, en el capítulo 5, se analizan los resultados de todas las consideraciones anteriores y se enumeran las consideraciones necesarias para el diseño estructural de un edificio hospitalario, según los criterios y normas empleados en el estudio, para concluir en el desarrollo del diseño estructural del edificio de las consultas externas para el Hospital Roosevelt.

1. CONSIDERACIONES ESENCIALES

1.1. Clasificación de hospitales

Toda obra nueva o existente se clasifica en una de cuatro categorías ocupacionales según las consecuencias legales que puedan implicar la falla o cese de funciones de la obra. El propietario podrá requerir al diseñador que clasifique su obra en una categoría más alta que la especificada en esta norma. (AGIES, NSE 1, 2020, p. 17)

Para el caso de hospitales se clasifica en la siguiente categoría:

1.1.1. Categoría IV: obras esenciales

- Son las que deben permanecer en operación continua durante y después de un siniestro.
 - Se incluyen en esta categoría las obras estatales o privadas especificadas a continuación, aunque no están limitadas a ellas: instalaciones de salud con servicios de emergencia, de cuidado intensivo, salas de neonatología o quirófanos; los hospitales de día pueden exceptuarse.

Según Norma Peruana E.030 (2016), “Cada estructura debe ser clasificada de acuerdo con las categorías indicadas en la tabla I” (p. 12). El factor de uso o importancia (*U*), definido en la tabla I, se usará según la clasificación que se haga.

Para edificios que contengan aislamiento sísmico en la base se podrá considerar $U = 1$.

Tabla I. **Categoría de las edificaciones y factor U**

Categoría	Descripción	Factor U
	A1: establecimientos de salud del sector salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud.	Ver nota 1
Edificaciones esenciales	A2: edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después de que ocurra un sismo severo tales como: - Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. - Puertos, aeropuertos, locales municipales, centrales de comunicaciones. Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua. Todas aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre, tales como: instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. Se incluyen edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como: grandes hornos, fábricas y depósitos de materiales inflamables o tóxicos. Edificios que almacenen archivos e información esencial del estado.	1.5

Nota 1: las nuevas edificaciones de categoría A1 tendrán aislamiento sísmico en la base cuando se encuentren en las zonas sísmicas 4 y 3. En las zonas sísmicas 1 y 2, la entidad responsable podrá decidir si usa o no aislamiento sísmico. Si no se utiliza aislamiento sísmico en las zonas sísmicas 1 y 2, el valor de U será como mínimo 1.5.

Fuente: Norma Peruana E.030. (2016). *Diseño Sismorresistente*.

La Norma Chilena, NCh (1996), menciona que las obras que se clasifican en la categoría A son los edificios gubernamentales, municipales, de servicios públicos o de utilidad pública como: cuarteles de policía, centrales eléctricas y telefónicas, correo y telégrafos, radioemisoras, canales de televisión, plantas de agua potable y de bombeo, entre otros y aquellos cuyo uso es de especial importancia en caso de catástrofe como: hospitales, postas de primeros auxilios, cuarteles de bomberos, garajes para vehículos de emergencia, estaciones terminales, entre otros. (p. 25)

1.2. Cargas muertas

“Las cargas muertas comprenden todas las cargas de elementos permanentes de la construcción. Incluyen, pero no necesariamente están limitadas al peso propio de la estructura, pisos, rellenos, cielos, vidrieras, tabiques fijos y equipo permanente rígidamente anclado a la estructura” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 19).

Según la Norma Peruana E.020 (2016), indica que “Es el peso de los materiales, dispositivos de servicio, equipos, tabiques y otros elementos soportados por la edificación, incluyendo su peso propio, que se propone sean permanentes o con una variación en su magnitud, pequeña en el tiempo” (p. 1).

El factor de carga muerta mayorado es igual a 1.2 y se puede aumentar si existe demasiada incertidumbre en la integración de cargas.

1.3. Cargas muertas superpuestas

“Se incluirán en el análisis todas las cargas debidas al contenido permanente de la edificación que puedan clasificarse como cargas muertas” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 19).

“Se considerará el peso real de los materiales que conforman y de los que deberán soportar la edificación calculados en base a los pesos unitarios, pudiéndose usar pesos unitarios menores cuando se justifique debidamente” (Norma Peruana E.020, 2016, p. 1).

1.3.1. Pisos

Según AGIES, NSE 2 (2020), menciona que “En ambientes o áreas donde esté previsto recubrir la superficie estructural con acabados de piso se aplicará el peso propio del piso más el peso de los rellenos de nivelación necesarios para generar un substrato plano adecuado” (p. 19).

Se debe considerar rellenos de nivelación de menos de 25 kg/cm².

1.3.2. Tabiques y particiones

De igual manera, AGIES, NSE 2 (2020) menciona que:

Se debe considerar el peso de los tabiques y las particiones en el interior que no formen parte de la estructura del edificio. Se podrán interpretar como cargas uniformemente distribuidas sobre la superficie del nivel, tomando en cuenta su peso unitario y la densidad de los materiales. Todas estas

consideraciones deberán quedar representadas en el informe estructural.
(p. 20)

“Se considerará el peso de todos los tabiques, usando los pesos reales en las ubicaciones que indican los planos” (Norma Peruana E.020, 2016, p. 2).

1.3.3. Fachadas y cerramientos perimetrales

Las paredes perimetrales para cerramiento, ventanas, sillares, muros cortina, barandas y otros se representan como cargas lineales uniformemente distribuidas sobre el perímetro del entrepiso.

Tabla II. **Carga muerta de entrepiso**

Carga muerta	Carga vertical (kg/m²)
Peso propio de losa	290
Peso de piso	40
Peso de tabiques	80
Peso de instalaciones de servicios	120
Cielo falso suspendido	5
TOTAL	535

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Carga muerta de techo**

Carga muerta	Carga vertical (kg/m²)
Peso propio de losa	290

Continuación tabla III.

Peso de pañuelos	75
Impermeabilización	60
Peso de instalaciones	30
Cielo falso suspendido	5
TOTAL	460

Fuente: elaboración propia.

1.4. Cargas especiales

Son las cargas que se toman en consideración debido a la magnitud o la forma que se distribuyen.

1.4.1. Información del proyecto

El diseñador estructural será debidamente informado sobre las máquinas o equipos que necesiten ser instalados en áreas determinadas para conocer la frecuencia vibratoria de los mismos. El diseñador estructural no será el responsable de investigar las cargas especiales.

1.4.2. Equipos pesados y cargas especiales

Los equipos fijos cuyo peso se excedan en la carga viva concentrada alterna y las cargas especiales, deberán ser tomados en cuenta por el diseñador estructural y este decidirá que clasificación de carga le asignará ya sea muerta o viva.

1.4.3. Equipos fijos

Estos son los equipos que están permanentemente sujetos a la estructura y aportan masa a la edificación, para el caso de hospitales se consideran los equipos médicos como:

- Tomografía
- Arco en C
- Rayos X
- Mamografía
- Lámparas cirúrgicas

1.4.4. Cargas móviles

“Algunas cargas móviles bien definidas, permanentemente instaladas, podrán considerarse cargas muertas, pero deberá establecerse la envolvente de sus efectos sobre la estructura. Los impactos y aceleraciones que generen serán considerados cargas vivas” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 21).

1.4.5. Fluidos

Los fluidos que tienen su peso específico definido podrán considerarse como carga muerta dentro de la estructura.

1.5. Cargas vivas

“Son aquellas producidas por el uso y la ocupación de la edificación. En general su intensidad estará establecida por norma” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 22).

1.5.1. Cargas uniformemente distribuidas

Los entresijos se diseñarán aplicando las cargas uniformemente distribuidas mínimas especificadas para hospitales.

- Para pasillos y rampas 500 kg/m².
- Clínicas y encamamientos 250 kg/m², se le puede aplicar la reducción de carga viva.
- Servicios médicos y laboratorios 350 kg/m², se puede aplicar reducción de carga viva.
- Farmacia 500 kg/m².
- Escaleras 500 kg/m².
- Cafetería y cocina 500 kg/m².

Según Norma Peruana E.020 (2016):

Se usarán como mínimo los siguientes valores para la ocupación o uso, valores que incluyen un margen para condiciones ordinarias de impacto. Las cargas vivas de diseño deberán estar claramente indicadas en los planos del proyecto.

- Para salas de operación, laboratorios, y áreas de servicio 300 kg/m².
- Cuartos con una carga repartida de 200 kg/m².
- Corredores y escaleras con carga de 400 kg/m². (p. 3)

1.5.2. Cargas concentradas

“Se verificarán que los entresijos resistan localmente las cargas concentradas que simulan efectos de equipo y mobiliario pesados. Estas cargas se colocarán en las posiciones más desfavorables en el entresijo sobre un área de 0.75 m por 0.75 m” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 22).

Estas cargas y las cargas uniformemente distribuidas no se aplicarán simultáneamente. Para diseño se utilizan cargas uniformemente distribuidas.

- Para pasillos y rampas 450 kg.
- Para servicios médicos y laboratorios 800 kg.

Por su parte la Norma Peruana E.020 (2016), recomendó lo siguiente:

- Los pisos y techos que soporten cualquier tipo de maquinaria u otras cargas vivas concentradas en exceso de 500 kg, serán diseñados para poder soportar tal peso como una carga concentrada o como un grupo de cargas concentradas.
- Cuando exista una carga viva concentrada, se puede omitir la carga viva repartida en la zona ocupada por la carga concentrada. (p. 4)

1.5.3. Cargas concentradas en estacionamientos

Asimismo, AGIES NSE 2 (2020) indica que la “Circulación de vehículos genera cargas de impacto y cargas dinámicas que deben tomarse en consideración al diseñar estacionamientos. Estas se simulan verificando que los

estacionamientos soporten localmente un par de cargas concentradas separadas 1.5 m" (p. 22).

Cada una será de 40 % del peso del vehículo más pesado que este proyectado a utilizar el área.

- En estacionamientos exclusivos para automóviles las cargas concentradas no serán inferiores a 900 kg cada una.
- Garajes para automóviles de pasajeros 250 kg/m².
- Garajes para automóviles de carga 500 kg/m².
- Rampas vehiculares de uso colectivo 500 kg/m².
- Áreas de circulación vehicular 250 kg/m².
- Áreas de servicio y reparación 500 kg/m².

1.5.4. Escaleras

Los escalones individuales de una escalera se diseñarán para una carga concentrada de 150 kg en la posición menos favorable.

Las escaleras se diseñarán con 500 kg/m².

1.5.5. Cargas vivas para cubiertas pesadas, con o sin acceso

Cuando la cubierta tenga un peso propio que exceda 100 kg/m², se utilizarán las siguientes cargas:

- Azoteas de concreto con acceso 200 kg/m².
- Azoteas sin acceso horizontal o inclinado 100 kg/m².
- Azoteas con inclinación mayor de 20 grados 75 kg/m².

- Azoteas usadas para jardín o para reuniones 500 kg/m².
- Techos de láminas, tejas, cubiertas plásticas, lonas, entre otros. Solo aplica a la estructura que soporta la cubierta final 50 kg/m².

Según Norma Peruana E.020 (2016), recomienda que:

- Para los techos con una inclinación hasta de 3 grados con respecto a la horizontal 100 kg/m².
- Para techos con inclinación hasta de 3 grados con respecto a la horizontal 100 kg/m², reducida en 5 kg/m², por cada grado de pendiente por encima de 3 grados hasta un mínimo de 59 kg/m².
- Para techos curvos 50 kg/m².
- Para techos con coberturas livianas de planchas onduladas o plegadas, calaminas, fibrocemento, material plástico, entre otros, cualquiera sea su pendiente, 30 kg/m². (p. 4)

1.6. Empuje en pasamanos y barandas

“Las barandas y pasamanos de escaleras, pasillos y balcones se diseñarán para resistir una fuerza horizontal de 250 kg/m aplicada a una altura de los pasamanos” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 23).

Según la Norma Peruana E.020 (2016), indica que:

Las barandas y parapetos serán diseñados para resistir la aplicación simultánea o no de las fuerzas en la siguiente tabla, ambas aplicadas en su parte superior, tomándose la combinación más desfavorable. En ningún caso, la fuerza horizontal y la fuerza vertical total serán menor de 100 kg. (p. 5)

Tabla IV. **Barandas y parapetos**

Barandas y parapetos	Carga horizontal (kg/m)	Carga vertical (kg/m)
Pozo para escaleras, balcones y techos en general	60	60
Viviendas unifamiliares	30	30
Balcones de teatros y lugares de asamblea	75	150

Fuente: Norma Peruana E. 020. (2016). *Cargas*.

1.7. Impacto

De igual manera, AGIES, NSE 2, (2020) define que:

Cuando la estructura quede sometida a una carga viva capaz de generar impacto, la carga viva se incrementará, para efectos de diseño local de la estructura en los porcentajes indicados a continuación: soportes de elevadores y ascensores incremento de 100 % de la carga viva. (p. 25)

1.8. Reducción de carga viva

Las cargas vivas uniformemente distribuidas señaladas como reducibles, podrán reducirse en función del área tributaria por medio de un factor multiplicador K_v . La reducción no aplicará a ningún renglón que no esté definido como reducible. Las cargas vivas que se utilizan en las combinaciones de carga podrán ser las cargas reducidas. (AGIES, NSE 2, 2020, p. 25)

El factor de reducción para cargas uniformemente distribuidas será igual a:

$$K_v = [1 - 0.008(A_T - 15)] \quad \text{Ecuación 1}$$

$$K_v \geq 0.77 - 0.23 \frac{M}{V} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde:

- A_T = es el área de carga viva en metros cuadrados que tributa sobre el elemento a diseñar, no aplica para áreas tributarias menores que 15 m², para columnas y muros se podrán acumular las áreas tributarias de los niveles superiores.
- $\frac{M}{V}$ = representa la relación de carga muerta a carga viva en el área de interés.
- El factor de reducción de la Ecuación 1, no será menor que 0.6 para miembros que reciban carga de un solo piso ni será menor que 0.4 para miembros que reciben cargas de varios pisos.
- Cuando no se especifique la reducción de la carga viva, K_v tendrá un valor de 1.0.

Asimismo, la Norma Peruana E.020 (2016) describe que:

Las cargas vivas mínimas repartidas, podrán reducirse para el diseño, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$L_r = L_o \left(0.25 + \frac{4.6}{\sqrt{A_i}} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

- L_r = Intensidad de la carga viva reducida.
- L_o = Intensidad de la carga viva sin reducir.
- A_i = Área de influencia del elemento estructural en m^2 , que se calculará mediante:

$$A_i = k A_t \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde:

- A_t = Área tributaria del elemento en m^2 .
- k = Factor de carga viva sobre el elemento. (p. 7)

1.9. Descripción arquitectónica hospitalaria

El hospital es uno de los proyectos más complicados de realizar por un profesional de la arquitectura e ingeniería, puesto que se trata de un edificio que contiene en un mismo conjunto gran variedad de edificios: hotel (hospitalización), oficinas (administración), centro sanitario (sector ambulatorio), edificio industrial (zona de instalaciones), parqueos, zona técnica (bloques de quirófanos, rehabilitación, tratamiento o diagnóstico), paisajismo (jardines y patios) e, incluso, áreas comerciales.

En primer lugar, precisa conocer la filosofía del hospital, en cuanto a su programa de preferencias y necesidades, tanto funcionales como económicas,

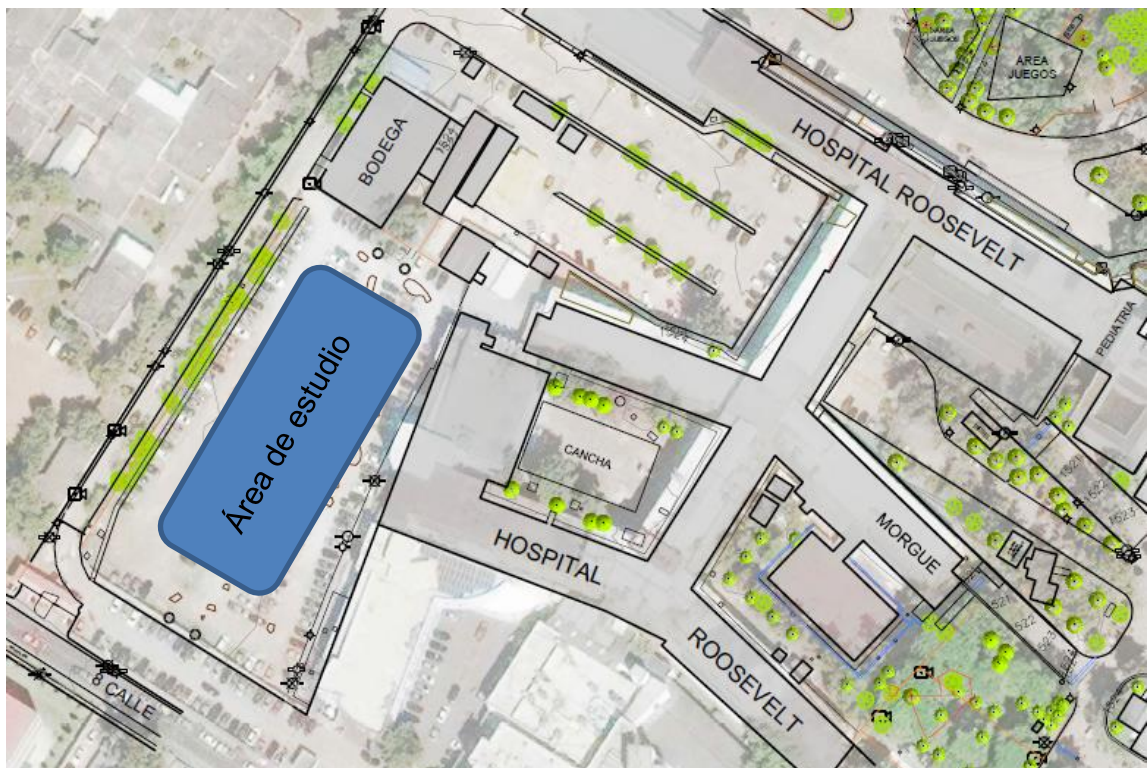
para determinar la manera en que se va a realizar el proyecto y a partir de ese punto, deberá considerar una gran cantidad de factores que, sin lugar a duda, se deben indicar en el diseño, como son: el terreno en el que se desarrollará la construcción del edificio, con su ubicación y superficie, la estructura y los materiales idóneos para la ejecución de la obra a proyectar, las instalaciones necesarias para dotar al edificio del confort y la funcionalidad establecidas o las normas y ordenanzas sobre edificación, materiales, instalaciones, seguridad y energía.

2. DISEÑO ESTRUCTURAL

2.1. Descripción de la estructura

La estructura de estudio es un edificio de concreto armado, diseñada según las necesidades del Hospital Roosevelt, la cual se encuentra ubicada en la zona 11 de la ciudad capital.

Figura 1. Mapa de ubicación de la estructura de estudio

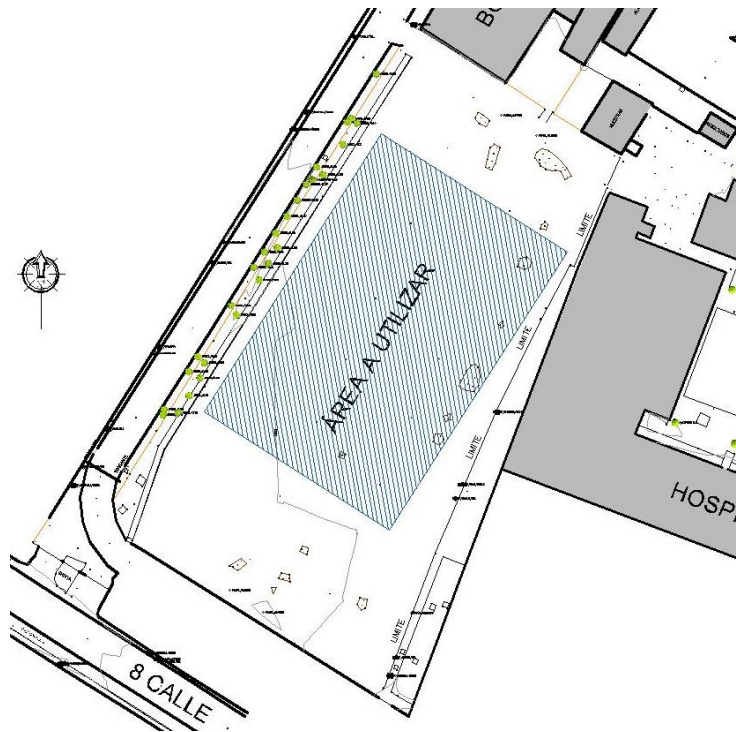


Fuente: elaboración propia, realizado con el programa AutoCAD 2019.

Dicha estructura, consta de una elevación principal de seis niveles, donde la distribución de las áreas a construir por nivel aproximada queda de la siguiente manera:

- Área por utilizar: 2,520 m².
- Área por construir: 15,120 m².

Figura 2. Área por utilizar



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa AutoCAD 2019.

2.2. Modelado de la estructura

El sistema estructural empleado para la estructura es de marcos estructurales resistentes al momento en ambas direcciones, conformados por

columnas y vigas de concreto armado para todos los niveles con una base de aislación. Toda la estructura fue modelada en el programa ETABS versión 18. Se menciona adicionalmente que los elementos estructurales que conforman este edificio se listan en la siguiente tabla:

Tabla V. **Dimensión de columnas**

Elemento	Sección	Dimensión (cm)
C1	Cuadrada	80x80

Fuente: elaboración propia.

Para los elementos de vigas principales y secundarias se emplean las siguientes secciones:

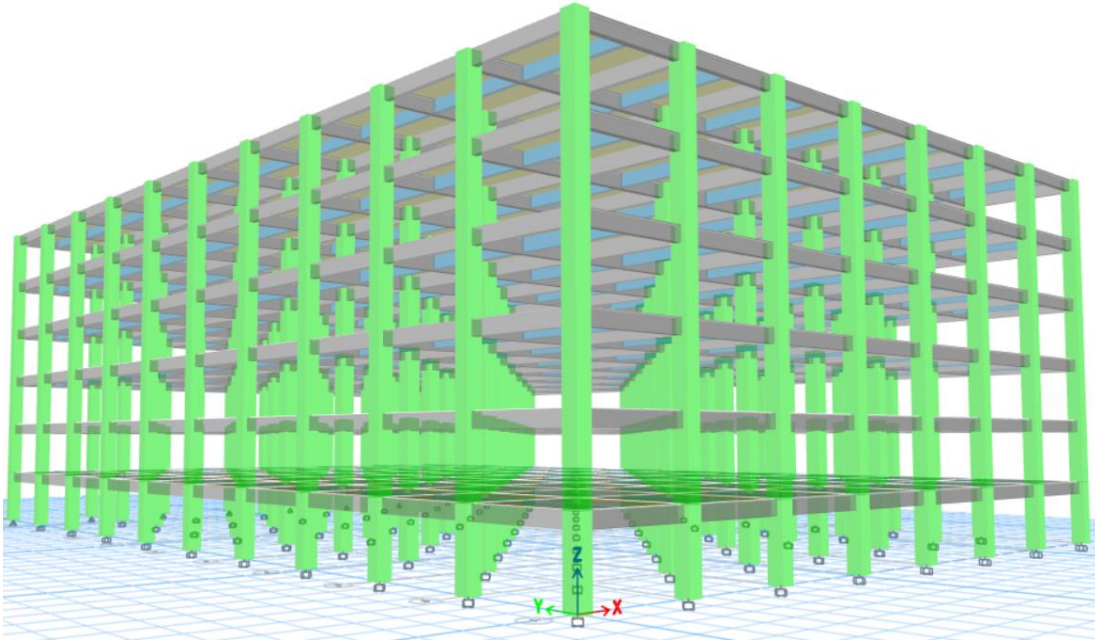
Tabla VI. **Dimensión de vigas**

Elemento	Sección	Dimensión (cm)
V1	Rectangular	40x65
V2	Rectangular	30X60

Fuente: elaboración propia.

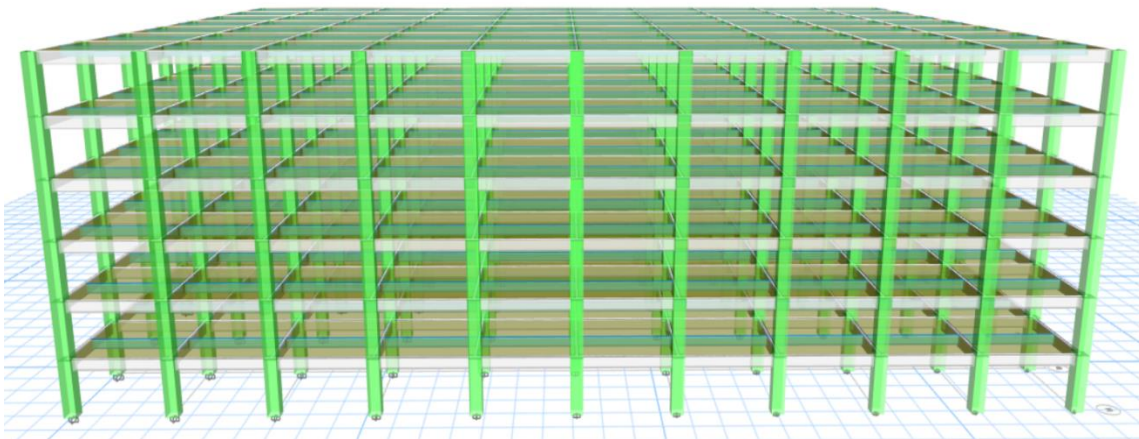
La altura que se considera para todos los niveles es de 3.60 m y las dimensiones de columnas y vigas se utilizarán para obtener el periodo fundamental de la estructura en base fija. Se deberán chequear y diseñar los elementos estructurales de la superestructura para investigaciones posteriores o construcción del mismo.

Figura 3. **Vista 3D del modelo estructural hospitalario**



Fuente: elaboración propia, realizado en el programa ETABS 18.

Figura 4. **Vista frontal 3D del modelo estructural hospitalario**



Fuente: elaboración propia, realizado en el programa ETABS 18.

2.3. Sistemas estructurales

Son los diferentes tipos de estructuras según sus características y usos.

2.3.1. Tipologías AD

“Son niveles de diseño y detallado para poder ser utilizadas requieren desarrollar alta capacidad post-elásticas (alta ductilidad); estas tipologías están calificadas como especiales en los documentos de referencia” (AGIES, NSE 7.1, 2020, p. 12).

Se permite en cualquier categoría de diseño sísmico y deben satisfacer las secciones 21.5 a 21.8 del ACI 318-11. La sección 21.5 del ACI 318-11 se aplica solo a miembros a flexión en marcos especiales para momento (McCormac y Brown, 2011).

Los requisitos de detallado en 18.9.2.1 y 18.9.2.2 tiene como objetivo la producción de pórticos que respondan a los desplazamientos de diseño esencialmente igual a pórticos monolíticos especiales resistentes a momento (ACI 318-19, 2019).

2.3.2. Tipologías DI

“Son niveles de diseño y detallado que únicamente desarrollan capacidad post-elástica intermedia (ductilidad intermedia); estas tipologías están calificadas como intermedias en los documentos de referencia” (AGIES, NSE 7.1, 2020, p. 12).

“Son parte del sistema resistente a las fuerzas sísmicas se permiten solamente en las categorías SDC B y C y deben satisfacer los requisitos más exigentes de la sección 21.3 del ACI 318-11” (Mccormac y Brown, 2011, p. 639).

“El objetivo de los requisitos de 18.4.2.3 y 18.4.3.1 es reducir el riesgo de falla por cortante en vigas y columnas durante un sismo. Se dan dos opciones para determinar la fuerza cortante mayorada” (ACI 318-19 , 2019, p. 302).

2.3.3. Tipologías BD

“Son niveles de diseño y detallado que únicamente son capaces de desarrollar capacidades post-elásticas muy limitadas (Baja Ductilidad); estas tipologías están calificadas como ordinarias en los documentos de referencia” (AGIES, NSE 7.1, 2020, p. 12).

Son parte de un sistema resistente a las fuerzas sísmicas se permite solamente en SDC B, y deben cumplir con los requisitos de diseño sísmico y de detallado para vigas y columnas como se prescribe en el capítulo 21 del ACI 318-11 (Mccormac y Brown, 2011).

“Los requisitos para el refuerzo de vigas tratan de mejorar la continuidad en los miembros del pórtico, y de esta forma mejoran la resistencia ante fuerzas laterales y la integridad estructural” (AGIES, NSE 7.1, 2020, p. 302).

2.4. Definición de materiales

Se enlistan las siguientes características de los materiales comúnmente usados en el diseño de marcos estructurales resistentes a momento.

Tabla VII. **Propiedades del concreto f'c 210 kg/cm²**

Elemento	Sección
f'c	210 kg/cm ²
Módulo de elasticidad (E)	2173707 ton/m ²
Coeficiente de Poisson (U)	0.2
Módulo de corte (G)	905711.25 ton/m ²
Peso específico	2.4026 ton/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Propiedades del concreto f'c 280 kg/cm²**

Elemento	Sección
f'c	280 kg/cm ²
Módulo de elasticidad (E)	2509980 ton/m ²
Coeficiente de Poisson (U)	0.2
Módulo de corte (G)	1045825 ton/m ²
Peso específico	2.4026 ton/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Propiedades del acero**

Elemento	Sección
Fy	42184.18 ton/m ²
Fu	63276.27 ton/m ²
Módulo de elasticidad (E)	1045825 ton/m ²
Peso específico	2.4026 ton/m ²

Fuente: elaboración propia.

2.5. Cargas sísmicas

Las cargas sísmicas se originan el movimiento de las placas tectónicas en la corteza terrestre, Guatemala es altamente sísmica debido a que se encuentra sobre fallas geológicas importantes.

2.5.1. Aspectos sísmicos

Para integrar la carga de sismo que afectan a los edificios hospitalarios es necesario establecer un nivel de protección sísmica que se requiere según las condiciones sísmicas específicas del lugar y la clasificación de la obra.

2.5.2. Índice de sismicidad

El índice de sismicidad (I_0) es un valor que hace referencia a la clasificación de la zona que por las condiciones geológicas se pueden generar amenazas sísmicas; en Guatemala, existen zonas con índices de sismicidad $I_0=2$ a $I_0=4$, siendo esta última la de mayor severidad.

“Para calcular el espectro de diseño sísmico se deben obtener los valores específicos del índice de sismicidad” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 88).

Con el valor característico del índice de sismicidad (I_0), se determina qué nivel de protección mínimo que debe poseer la estructura y con qué valores de parámetros para sismo extremo debe calcularse el espectro de diseño.

2.5.3. Nivel mínimo de protección

El nivel mínimo de protección sísmica se establece en la tabla X:

Tabla X. **Nivel mínimo de protección sísmica y probabilidad de sismo de diseño**

Índice de sismicidad	Clase de obra			
	Esencial	Importante	Ordinaria	Utilitaria
Io = 4	E	D	D	C
Io = 3	D	C	C	B
Io = 2	C	B	B	A
Probabilidad de exceder un sismo de diseño	5 % en 50 años	5 % en 50 años	10 % en 50 años	No aplica

Fuente: AGIES, NSE 2. (2020). *Demandas estructurales y condiciones del sitio.*

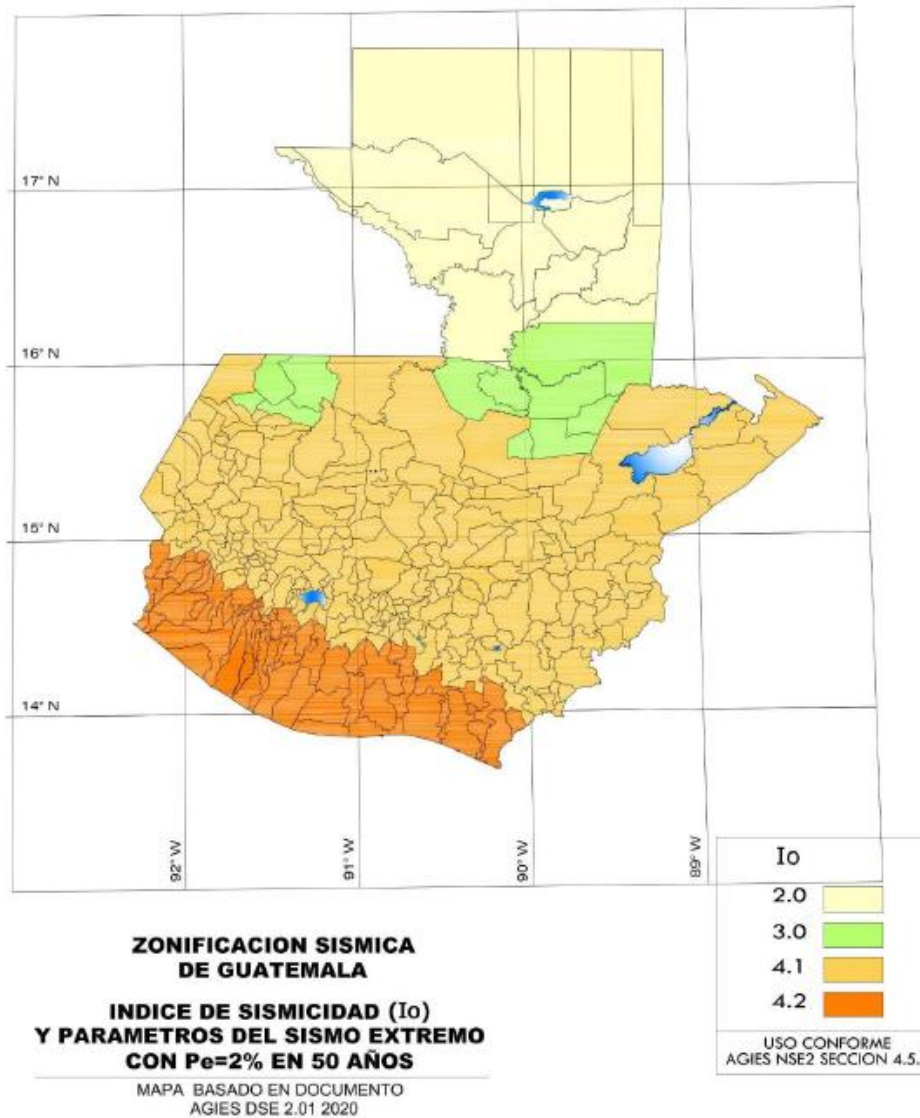
2.5.4. Parámetros espectrales

Los parámetros espectrales iniciales S_{cr} y S_{1r} , representan la ordenada espectral de período corto y la ordenada espectral con período de 1 segundo respectivamente para el sismo extremo.

Estos valores pueden obtenerse en la siguiente gráfica del mapa de zonificación sísmica de la República de Guatemala.

Dichos parámetros se pueden obtener del “Listado de amenaza sísmica y velocidad básica del viento por municipio para la República de Guatemala” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 88).

Figura 5. **Mapa de zonificación sísmica de la República de Guatemala**



Fuente: AGIES, NSE 2. (2020). *Demandas estructurales y condiciones del sitio.*

2.5.5. Ajuste por clase de sitio

Los valores espectrales deberán ser modificados tomando en cuenta la clasificación del suelo en dicho lugar. Los valores S_{cr} y S_{1r} se multiplicarán por

factores adimensionales que dependen del tipo de suelo y el índice de sismicidad, para ello se utilizaran las siguientes fórmulas:

- Coeficiente espectral S_{cs}

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a \quad \text{Ecuación 5}$$

- Coeficiente espectral S_{1s}

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde:

- S_{cr} = ordenada espectral del sismo extremo para períodos cortos, en g.
- F_a = coeficiente de sitio para períodos cortos.
- S_{cs} = ordenada espectral del sismo extremo ajustada a la clase de sitio para períodos cortos, en g.
- S_{1r} = ordenada espectral sismo extremo para períodos de 1 segundo, en g.
- F_v = coeficiente de sitio para periodos largos.
- S_{1s} = ordenada espectral del sismo extremo ajustada a la clase de sitio para períodos largos, en g.

Los coeficientes de sitio F_a y F_v se listan en las tablas XI y XII:

Tabla XI. **Coeficiente de sitio F_a**

Clase de sitio	Índice de sismicidad			
	2	3	4.1	4.2

Continuación tabla XI.

AB	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0
D	1.0	1.0	1.0	1.0
E	1.0	1.0	1.0	1.0
F	Se requiere evaluación específica			

Fuente: AGIES, NSE 2. (2020). Demandas estructurales y condiciones de sitio.

Tabla XII. **Coeficiente de sitio Fv**

Clase de sitio	Índice de sismicidad			
	2	3	4.1	4.2
AB	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0
D	1.0	1.0	1.0	1.0
E	1.0	1.0	1.0	1.0
F	Se requiere evaluación específica			

Fuente: AGIES, NSE 2. (2020). Demandas estructurales y condiciones de sitio.

2.5.6. Ajuste por intensidades sísmicas especiales

En algunos casos donde el estudio geotécnico lo solicite se ajustarán los valores de S_{cr} y S_{1r} de la siguiente manera:

- Coeficiente espectral S_{cs}

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a \quad \text{Ecuación 7}$$

- Coeficiente espectral S1s

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde:

- Na = factor de proximidad de amenazas especiales para períodos cortos.
- Nv = factor de proximidad de amenazas especiales para periodos largos.
- Scs, S1s, Scr, S1r, Fa y Fv se describen en las ecuaciones 5 y 6.
- Los coeficientes Na y Nv se listan en las tablas XIII, XIV y XV.

Tabla XIII. **Tipo de fuente sísmica**

Tipo de fuente	Descripción	Máxima magnitud-momento	Tasa de crecimiento (mm por año)
A	Fallas geológicas capaces de generar eventos de gran magnitud y con alta tasa de sismicidad	$M \geq 7.0$	$TC \geq 5$
B	Fallas geológicas que no son A o C	$M_o \geq 7.0$	$TC < 5$
		$M_o < 7.0$	$TC > 2$
		$M_o \geq 6.5$	$TC < 2$
C	Fallas geológicas incapaces de generar eventos de gran magnitud y que tienen baja tasa de sismicidad	$M_o < 6.5$	$TC \leq 2$

Fuente: AGIES, NSE 2. (2020). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

Tabla XIV. **Factor Na para periodos cortos de vibración**

Tipo de fuente	Distancia horizontal más cercana a fuente sísmica		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	1.0	1.0	1.0
B	1.0	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

Fuente: AGIES, NSE 2. (2020). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

Tabla XV. **Factor Nv para periodos largos de vibración**

Tipo de fuente	Distancia horizontal más cercana a fuente sísmica			
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km	≥ 15 km
A	1.0	1.0	1.0	1.0
B	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

Fuente: AGIES, NSE 2. (2020). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

2.5.7. Clasificación de sitio

La clasificación de sitio se establece a partir del perfil del suelo, según AGIES, NSE 2, (2020) existen las siguientes categorías: A, B, C, D, E o F.

2.5.7.1. Perfil de suelo de los sitios clase A, B

Este sitio con tipo de suelo rocoso y denso se puede clasificar como tipo B para la región de Guatemala, ya que no se ha logrado hacer comparación entre sí y se utilizan los parámetros correspondientes al tipo B.

2.5.7.2. Perfil de suelo de los sitios clase F

En esta clasificación se encuentran los suelos que por sus características físicas nos son estables, suelos difíciles y cuando ocurre un evento sísmico pueden fallar o colapsar, asentarse excesivamente, por eso requieren de un tratamiento especial. Este tipo de suelo además de presentar muchas limitantes al proyecto, los factores que se deben usar para integrar el espectro de diseño son mayores, dando como resultado una carga sísmica de diseño de mayor magnitud.

2.5.7.3. Perfil de suelo en los sitios clase C, D o E

“Los suelos más comunes en Guatemala son los que no se clasifican ni como clase A, B ni como clase F” (AGIES, NSE 2, 2020, p. 31).

2.5.8. Periodo de transición

Se conoce como periodo de transición al periodo donde cambian de los periodos cortos a los periodos largos:

- Periodo de vibración de transición

$$T_s = \frac{S_{1s}}{S_{cs}} \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde:

- T_s = periodo de transición, en s.
- S_{1s} , S_{cs} se describen en las ecuaciones 7 y 8.

2.5.9. Probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño

Asimismo, AGIES, NSE 2 (2020), “Se determinará la probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño, según el Nivel de Protección Sísmica que se requiera, mediante uno de los factores K_d ” (p. 17).

Tabla XVI. Factores K_d de acuerdo con el nivel de sismo

Nivel de sismo	Factor K_d
Sismo ordinario - 10 % probabilidad de ser excedido en 50 años	0.66
Sismo severo - 5 % probabilidad de ser excedido en 50 años	0.80
Sismo extremo - 2 % probabilidad de ser excedido en 50 años	1.00
Sismo mínimo - condición de excepción	0.55

Fuente: AGIES, NSE 2. (2020). *Demandas estructurales y condiciones de sitio*.

- Se podrá utilizar un valor K_d mayor al requerido, haciéndolo del conocimiento del coordinador del proyecto.

De tal manera, AGIES, NSE 1 (2020) concluyó que, en obras que sean consideradas vitales, el diseñador podrá utilizar un factor $K_d = 1.00$.

Consideración espectral de diseño:

- Parámetro espectral Scd

$$Scd = K_d * Scs \quad \text{Ecuación 10}$$

- Parámetro espectral $S1d$

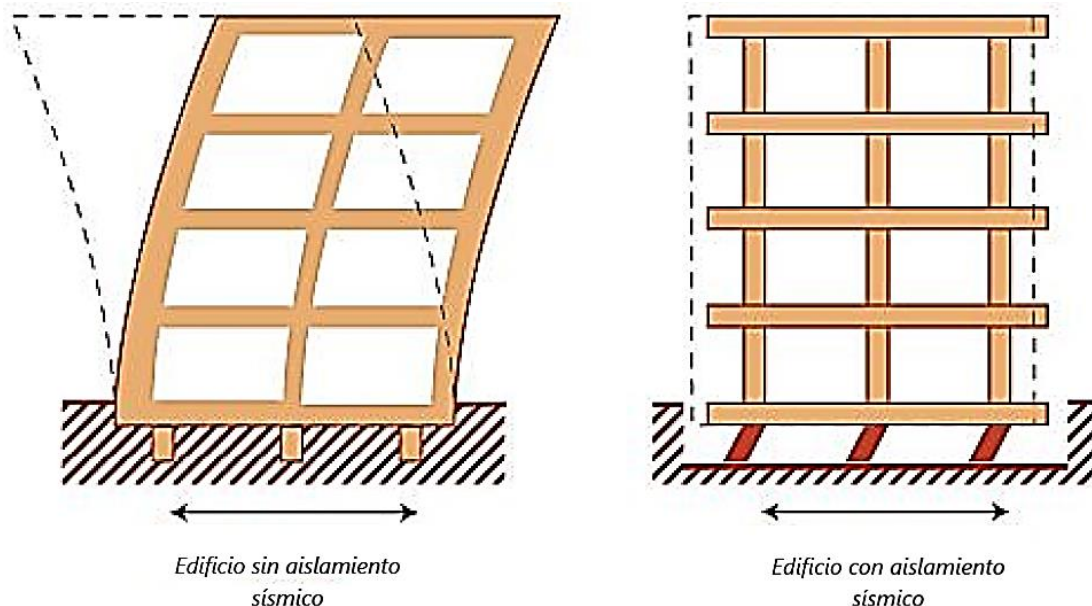
$$S1d = K_d * S1s \quad \text{Ecuación 11}$$

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL SISTEMA AISLADO

3.1. Aisladores con núcleo de plomo

“Los aisladores con núcleo de plomo (LRB) se construyen en general de goma de bajo amortiguamiento y se les deja un orificio central cilíndrico en el que se introduce el núcleo de plomo bajo presión” (NCh 2745, 2013, p. 29).

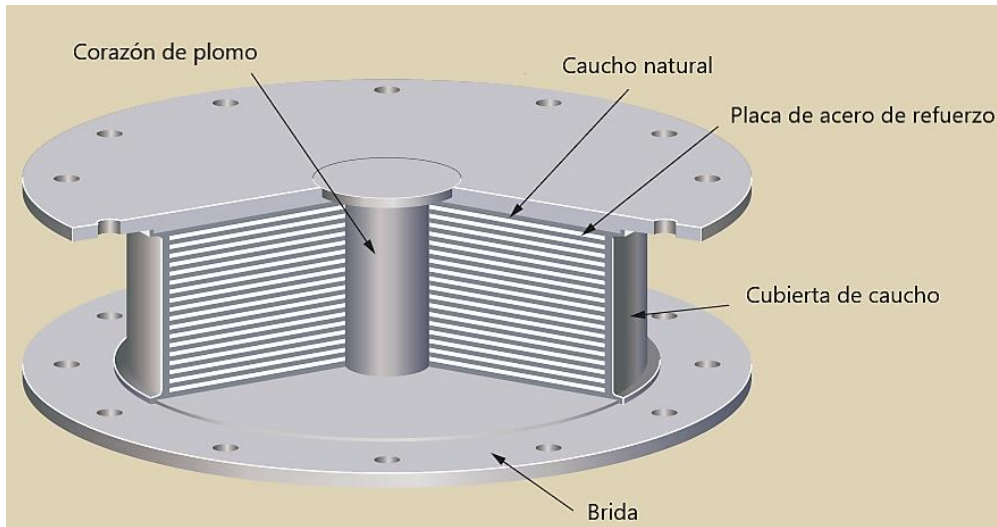
Figura 6. **Comportamiento de una estructura aislada sísmicamente**



Fuente: Sísmica. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*.

Para la estructura en estudio, se consideró emplear tres tipos de configuraciones de aisladores elastómeros, todos ellos son compuestos, considerando las características de corte en la siguiente ecuación.

Figura 7. Partes de un aislador de corazón de plomo



Fuente: BRIDGESTONE. (2015). *Seismic Isolation Bearing*.

3.2. Rigidez efectiva de un aislador

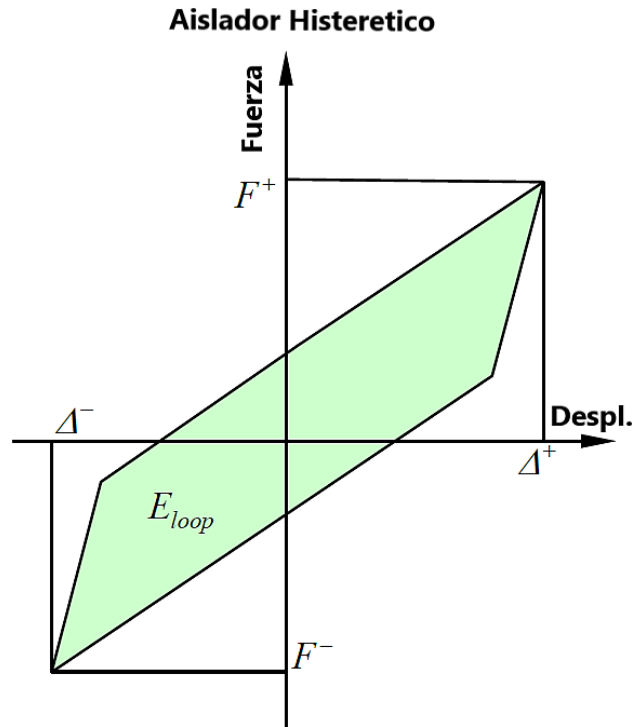
Rigidez efectiva mínima lateral del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo de la dirección horizontal considerada.

$$K_{eff} = \frac{F^+ - F^-}{\Delta^+ - \Delta^-} \quad \text{Ecuación 12}$$

En donde:

- F^+ , F^- = fuerzas horizontales positivas y negativas.
- Δ^+ , Δ^- = ciclo de amplitud en el eje positivo y negativo.

Figura 8. Comportamiento histerético de un aislador sísmico



Fuente: FEMA P-58-7. (2018). *Building the performance you need*.

3.3. Amortiguación efectiva

“El valor de viscosidad equivalente amortiguación correspondiente a la energía disipada durante la respuesta cíclica del sistema de aislamiento” (ASCE/SEI 7-16, 2016, p. 167).

“Valor de la amortiguación viscosa efectiva que corresponde a la energía disipada por el sistema de aislamiento durante la respuesta cíclica en el desplazamiento de diseño” (EUROCODE 8 EN-1998-1, 2004, p. 204).

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{E_{loop}}{k_{eff}(|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2}$$

Ecuación 13

En donde:

- E_{loop} = energía disipada por ciclo de carga.
- K_{eff} = rigidez efectiva o secante del aislador.
- Δ^+ = ciclo de amplitud en el eje positivo.
- Δ^- = ciclo de amplitud en el eje negativo.

3.4. Rigidez efectiva máxima y mínima

Representa la rigidez efectiva máxima y mínima del sistema de aislamiento que se basan en las pruebas cíclicas y calculadas por las siguientes formulas:

$$k_{Dmax} = \frac{\sum |F_D^+|_{max} + \sum |F_D^-|_{max}}{2D_D}$$

Ecuación 14

$$k_{Dmin} = \frac{\sum |F_D^+|_{min} + \sum |F_D^-|_{min}}{2D_D}$$

Ecuación 15

En el desplazamiento máximo, la rigidez máxima y mínima se calcula con las siguientes expresiones:

$$k_{Mmax} = \frac{\sum |F_M^+|_{max} + \sum |F_M^-|_{max}}{2D_M}$$

Ecuación 16

$$k_{Mmin} = \frac{\sum |F_M^+|_{min} + \sum |F_M^-|_{min}}{2D_M}$$

Ecuación 17

En donde:

- K_M = rigidez efectiva del sistema de aislamiento en el desplazamiento D_M .
- DM = desplazamiento máximo en el centro de rigidez del sistema de aislamiento en la dirección considerada.
- $\sum |F_M^+|$ = sumatoria del valor absoluto de la fuerza en el desplazamiento positivo igual a DM , para todas las unidades de aislamiento.
- $\sum |F_M^-|$ = sumatoria del valor absoluto de la fuerza en el desplazamiento negativo igual a DM , para todas las unidades de aislamiento.

3.5. Módulo de corte

Según AASHTO LRFD (2017), “El valor del módulo de corte G , será utilizado como base para el diseño, el elastómero debe tener un módulo de corte especificado de 50 tonf/m²” (p. 1594).

3.6. Compresión de los aisladores

Para poder definir los diámetros mínimos iniciales para cada aislador propuesto, se tendrá en cuenta la descarga estática del edificio propuesto y la tensión admisible a compresión para cargas a largo plazo (P_{LP}), ya que se empleará el aislador compuesto y se fijó la tensión admisible para cargas a largo plazo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\sigma_{LP} = \frac{P_{LP}}{A} \leq 120 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{Ecuación 18}$$

En donde:

- P_{LP} = tensión admisible a compresión para cargas a largo plazo.

- A = área del aislador.

Para este caso de estudio, se asume una compresión de 800 tonf/m², equivalente a 80 kg/cm² que está dentro del rango de lo admisible, según la ecuación 18.

3.7. Periodo efectivo en el desplazamiento de diseño

“El periodo efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento de diseño se determinará utilizando las características de deformación del sistema aislado de acuerdo con la siguiente expresión” (Uniform Building Code, 1997, p. 408).

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin}g}} \quad \text{Ecuación 19}$$

En donde:

- W = peso sísmico de la estructura.
- K_{Dmin}= rigidez lateral mínima del sistema de aislación.
- g = aceleración de la gravedad.

3.8. Periodo efectivo en el desplazamiento máximo

“El periodo efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento máximo se determinará utilizando las características de deformación del sistema de aislamiento de acuerdo con la siguiente expresión” (UBC, 1997, p. 408).

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Mmin}g}}$$

Ecuación 20

En donde:

- W = peso sísmico de la estructura.
- k_{Mmin} = rigidez lateral del sistema de aislación.
- g = aceleración de la gravedad.

3.9. Desplazamiento máximo

“Desplazamiento lateral provocado por el sismo máximo posible, excluyendo el desplazamiento adicional debido a la torsión natural y accidental, requerido para el diseño del sistema de aislación” (NCh 2745, 2013, p. 3).

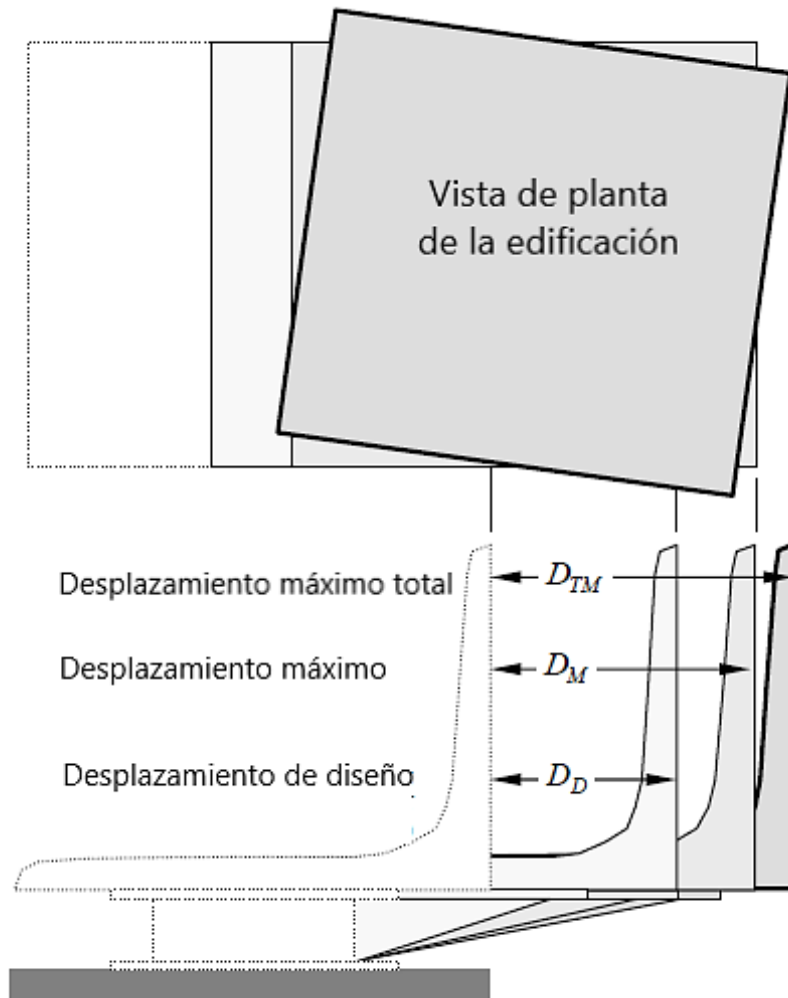
$$D_M = \frac{gS_{M1}T_M^2}{4\pi^2B_M}$$

Ecuación 21

En donde:

- g = aceleración causada por la gravedad.
- S_{M1} = aceleración máxima espectral para T=1 s y 5 % amortiguamiento.
- T_M = periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada en la dirección considerada.
- B_M = coeficiente numérico para el amortiguamiento eficaz del sistema aislado en el desplazamiento máximo.

Figura 9. Diagrama de desplazamientos



Fuente: FEMA P-58-7. (2018). *Building the performance you need*.

3.10. Desplazamiento de diseño

El desplazamiento del sistema de aislamiento para un sismo de diseño se determina mediante la siguiente expresión:

$$D_D = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{1d} T_d}{B_D} \quad \text{Ecuación 22}$$

En donde:

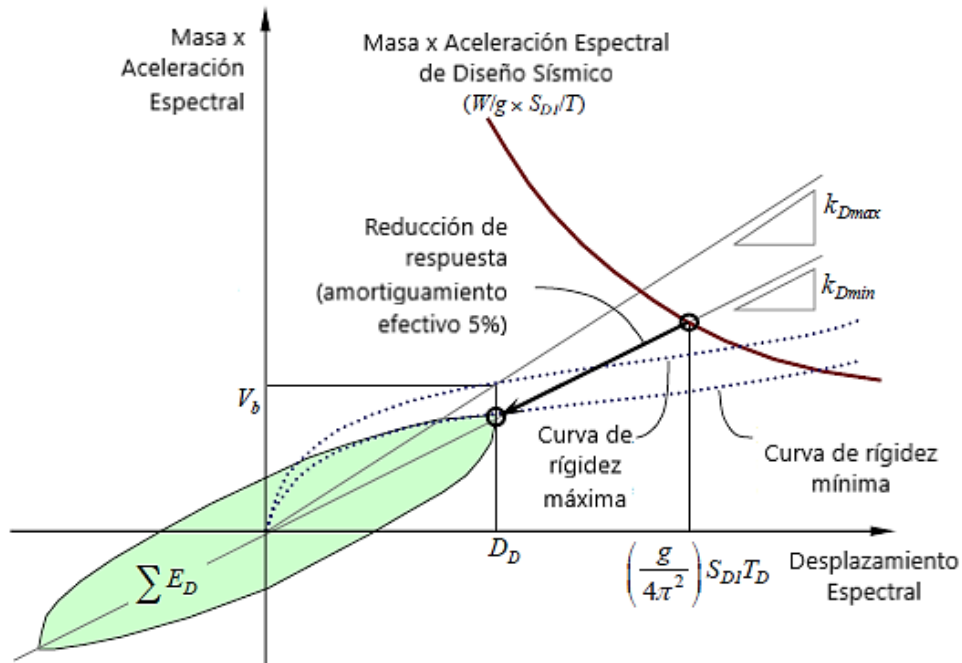
- g = aceleración causada por la gravedad.
- S_{1d} = corresponde al 5 % de respuesta espectral amortiguada en un periodo de 1 segundo.
- T_d = periodo efectivo de la estructura.
- B_D = coeficiente numérico para el amortiguamiento eficaz del sistema aislado en el desplazamiento de diseño, es 1 cuando el amortiguamiento efectivo es 5 %.

Tabla XVII. **Coeficiente de amortiguamiento, B_D o B_M**

Amortiguamiento efectivo, β_D o β_D (porcentaje de crítico)	Factor B_D o B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

Fuente: ASCE/SEI 7-16. (2016). *Site specific ground motion procedures for Seismic Design*.

Figura 10. Capacidad del sistema aislado y demanda sísmica



Fuente: FEMA P-751. (2012). *NEHRP Recommended seismic provisions*.

3.11. Desplazamiento máximo total

Desplazamiento lateral máximo provocado por el sismo máximo posible incluyendo desplazamientos adicionales debidos a la torsión natural y accidental, requerido para la verificación de la estabilidad del sistema de aislación, o elementos de él, para el diseño de las separaciones entre edificios, y para los ensayos bajo carga vertical de los prototipos de los aisladores (NCh 2745, 2013).

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \geq 1.15 * D_M \quad \text{Ecuación 23}$$

En donde:

- y = distancia entre el centro de rigidez del sistema de aisladores y el elemento de interés (el más lejano) medido perpendicularmente a la dirección del sismo considerado.
- b = dimensión corta en planta de la estructura.
- d = dimensión larga en planta de la estructura.
- e = excentricidad actual más accidental.
- DM = desplazamiento máximo lateral con Ecuación 21.
- PT = relación del periodo de traslación efectivo del sistema de aislación y el periodo de torsión efectivo del aislamiento, el cual no será menor de 1.

3.12. Carga axial última

“Representa la carga axial promedio de peso propio, sobrecarga y el promedio de las cargas axiales máximas de compresión producto del sismo horizontal del diseño” (NCh 2745, 2013, p. 65).

$$P_{CP} = 1.2D + L + E \quad \text{Ecuación 24}$$

En donde:

- D = carga gravitacional por peso propio.
- L = sobrecarga reducida.
- E = carga de sismo.

3.13. Área de aisladores

Se emplearán aisladores elastoméricos circulares cuya área está calculada por:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2)$$

Ecuación 25

En donde:

- D_{ext} = diámetro exterior.
- D_{int} = diámetro interior.

De acuerdo a esta consideración, ya determinadas las cargas a largo plazo para cada aislador no deberán tener una tensión admisible mayor a la establecida y se fijará el área mínima requerida para cumplir dichas condiciones.

Se plantea trabajar con 2 configuraciones de aisladores elastoméricos con diámetros externos de 55 y 65 cm con plomo, dicha configuración se describe en la siguiente tabla:

Tabla XVIII. **Aisladores elastoméricos considerados**

Tipo	Clase	D_{ext} (cm)	D_{int} (cm)	Plomo
1	LRB 1	55	9.50	Si
2	LRB 3	65	11.00	Si

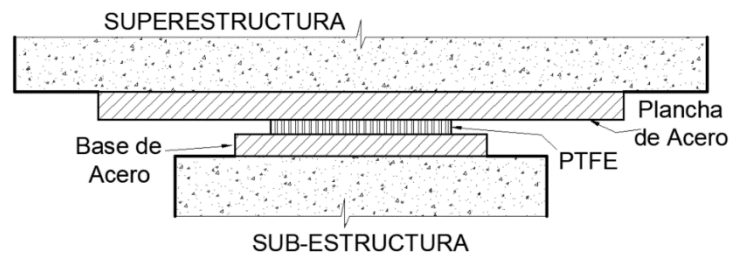
Fuente: elaboración propia.

3.14. Deslizadores friccionantes

Los deslizadores simples están conformados por dos partes, una plancha de acero liso y un teflón de PTFE (politetrafluoroetileno), estos no aportan rigidez lateral al sistema y tienen un alto amortiguamiento aproximadamente el 60 %. No

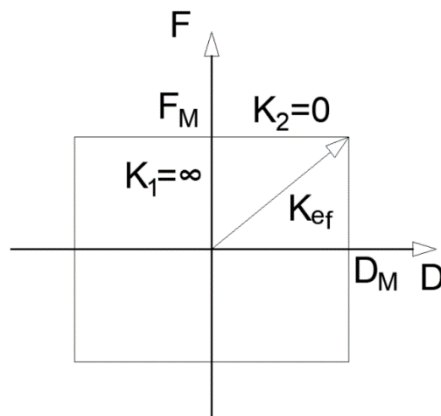
cuentan con fuerza de restitución, presentan levantamiento y tienen baja capacidad a carga axial.

Figura 11. **Partes de un deslizador friccionante**



Fuente: elaboración propia, realizada en el programa AutoCAD 19.

Figura 12. **Histéresis de un deslizador**



Fuente: elaboración propia, realizada en el programa AutoCAD 19.

4. ANÁLISIS DINÁMICO

Para el análisis dinámico de la estructura con sistema de aislamiento, se considera el análisis modal espectral que permite evaluar la respuesta de la estructura para ambas consideraciones y poder entender de mejor manera el comportamiento de la misma. También se verificó que este análisis cumpla con las condiciones requeridas por las normativas descritas.

4.1. Análisis modal espectral

Definidas las consideraciones para los aisladores, se procede a incorporarlas en la estructura del edificio, para esto se emplearon aisladores LRB cuyas propiedades fueron definidas anteriormente. La distribución escogida debe permitir la mejor contribución modal y evitar la generación de torsiones en la estructura.

4.2. Determinación del cortante de diseño

Se mencionan las consideraciones esenciales según lo indica ASCE/SEI 7-16 (2016), para fuerzas laterales mínimas.

- Sistema de aislamiento y elementos estructurales debajo del sistema de aislamiento

$$V_b = K_M D_M$$

Ecuación 26

- Elementos estructurales sobre el sistema de aislamiento

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I} \quad \text{Ecuación 27}$$

En donde:

- V_{st} = fuerza total de diseño sísmico lateral no reducido.
- R_I = coeficiente numérico relacionado con el tipo de fuerza sísmica que resiste el sistema por encima del sistema aislado.

Calculando para V_{st} :

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-2.5\beta_m)} \quad \text{Ecuación 28}$$

En donde:

- V_b = cortante de diseño calculado con la Ecuación 26.
- W_s = peso sísmico de la estructura sobre la interface de aislación, incluyendo el peso sísmico efectivo de la base.
- W = peso sísmico de la estructura sobre la interfaz de aislación.
- β_m = amortiguación efectiva del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo D_M .

Se considera que el peso sísmico efectivo $W_s = W$ cuando la distancia media desde la parte superior del aislador a la parte inferior del marco del piso del nivel de la base por encima de los aisladores supera los 0.9 m (ASCE/SEI 7-16, 2016).

Según la Norma Peruana E.030 (2016), menciona que:

Para cada una de las direcciones consideradas en el análisis, la fuerza cortante en el primer entrepiso del edificio no podrá ser menor que el 80 % del valor calculado según el numeral 4.5 para estructuras regulares, ni menor que el 90 % para estructuras irregulares.

Si fuera necesario incrementar el cortante para cumplir los mínimos señalados, se deberán escalar proporcionalmente todos los otros resultados obtenidos, excepto los desplazamientos. (p. 25)

4.3. Control de derivas

Para los parámetros de control de derivas de entrepiso en la estructura, se considera aplicar lo establecido en la siguiente ecuación, tomando en cuenta que se trata de edificaciones hospitalarias de concreto reforzado y se clasifican en categoría IV.

$$\Delta_U = 0.015h_p \quad \text{Ecuación 29}$$

En donde:

- h_p = altura del piso para el que se calcula la deriva.

4.4. Desplazamiento total

Según ASCE/SEI 7-16 (2016) menciona que:

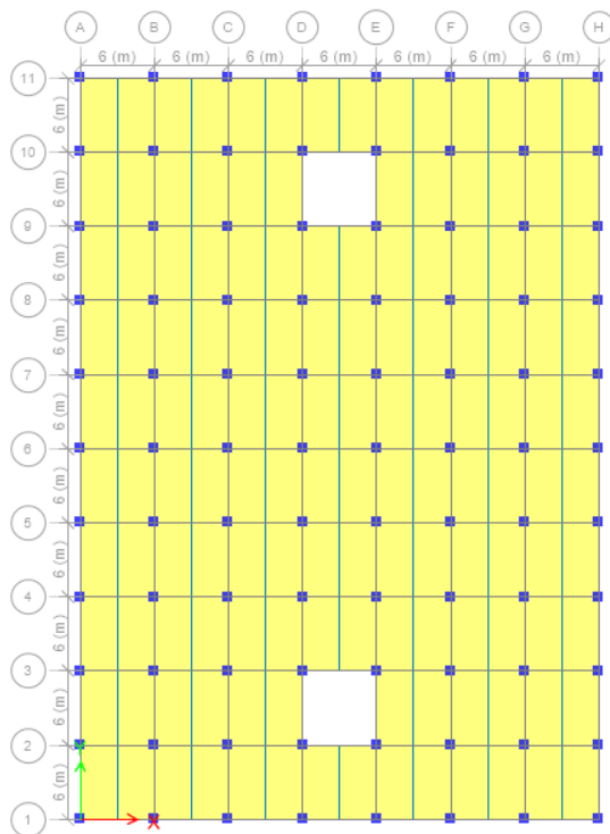
Para determinar el desplazamiento máximo total debe incluir la excitación simultánea del modelo por el 100 % del movimiento del suelo en la dirección crítica y el 30 % del movimiento del suelo en la dirección horizontal perpendicular. El desplazamiento máximo del sistema de aislamiento se calculará como la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales. También indica que el desplazamiento máximo total del sistema de aislamiento no deberá ser menor del 80 % de D_{TM} calculado en la Ecuación 23. (p. 175)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Modelamiento estructural del edificio en base fija

Se realizó el modelamiento en el programa ETABS, con una grilla en de 8 ejes en el sentido longitudinal y 11 ejes en el sentido transversal con separación entre ejes de 6 metros.

Figura 13. Grilla estructural del modelo



Fuente: elaboración propia, desarrollado con el programa ETABS.

5.1.1. Definición de columnas y vigas

Se procedió a modelar las columnas y vigas según las dimensiones descritas en la tabla V y VI.

5.1.2. Definición de losas

Se realizó el predimensionamiento de las losas macizas en dos direcciones colocando un espesor propuesto de 20 cm. Las propiedades del concreto armado son las descritas en la tabla VII.

5.1.3. Definición de diafragmas rígidos

Se asignaron diafragmas rígidos a las losas de entrepiso, debido a que es un edificio simétrico, coinciden al centro de masa del elemento.

5.1.4. Definición de los casos de carga

Se ingresaron al modelo los casos de carga según la siguiente tabla:

Tabla XIX. **Casos de carga**

Tipo de carga	Nombre	Factor de escala
D	PP	1.00
	CM	1.00
L	CV	1.00
	CVT	1.00

Fuente: elaboración propia.

En donde:

- PP = peso propio de la estructura.
- CM= carga muerta.
- CV= carga viva.
- CVT= carga viva de techo.

5.1.5. Definición de cargas

Se seleccionaron todos los elementos losas de entrepiso y se les aplicó las cargas descritas en el capítulo 1.

5.1.6. Definición de fuentes de masa sísmica

Se aplicaron los casos de carga que integraran las fuentes de masa para que el modelo integre el peso sísmico, donde adicionó la masa lateral y se incluyó la masa vertical para el modelo, según la siguiente tabla:

Tabla XX. **Fuentes de masa sísmica**

Nombre	Multiplicador de masa
PP	1.00
CM	1.00
CV	0.50
CVT	0.25

Fuente: elaboración propia.

5.1.7. Definición de modos y periodos fundamentales

Se aplicó el tipo de caso modal Eigen, que se calcula matricialmente con los valores y vectores propios, seleccionando 12 modos aplicados a la masa sísmica. Se corrió el análisis del modelo y los periodos fundamentales del edificio en base fija.

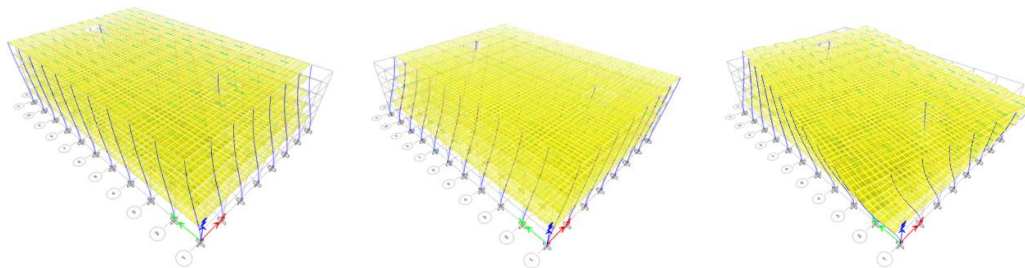
Tabla XXI. **Modos y periodos fundamentales en base fija**

Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ	Sentido
1	1.034	0.00	0.92	0.00	Traslacional
2	1.032	0.92	0.00	0.00	Traslacional
3	0.982	0.00	0.00	0.909	Rotacional

Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de participación de la masa en los diferentes modos de participación alcanzo más del 90 % y los periodos fundamentales de vibración son similares, esto significa que el comportamiento de la estructura es adecuado.

Figura 14. **Periodos de vibración**



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa ETABS.

5.1.8. Determinación del peso sísmico

Se estima el 100 % del peso propio y carga muerta, el 50 % de las cargas vivas y el 25 % de cargas vivas de techo según lo establecido en la tabla XX. Siendo los valores siguientes:

Tabla XXII. Masa del edificio en base fija

Nivel	Masa (ton-s ² /m)	Peso (Tonf)
5	284.96	2795.46
4	342.73	3362.22
3	342.73	3362.22
2	342.73	3362.22
1	345.49	3389.27
Σ 1,658.64		

Fuente: elaboración propia.

La masa del edificio en base fija se define por la sumatoria de masas de todos los niveles y el comportamiento se asumió como un sólido rígido.

$$m_s = 1,658.54 \frac{\text{ton} - \text{s}^2}{\text{m}}$$

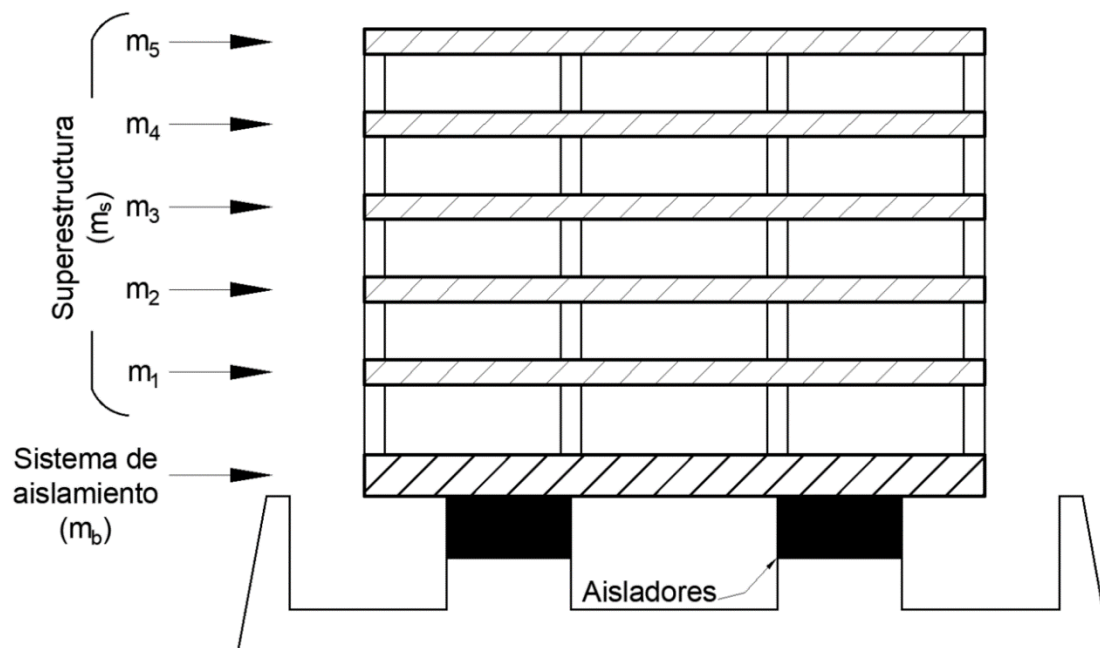
5.2. Análisis estático equivalente del edificio con base aislada

Describe que la sumatoria de todos los niveles del edificio forma parte de la superestructura (m_s), y que el sistema de aislamiento está formado por los aisladores sísmicos y la losa rígida de aislamiento.

$$m_s = \sum_{i=1}^{i=5} m_i$$

Se asumió que el edificio se va a comportar como un sólido rígido que se apoya sobre el sistema aislado, para optimizar el funcionamiento del sistema de aislamiento.

Figura 15. Partes edificio en base aislada



Fuente: elaboración propia, desarrollada en el programa AutoCAD 19.

El valor del sistema de aislamiento (m_b) se asumió que es igual a la masa del primer nivel, para después verificarlo.

$$m_b = m_1$$

Con base en la tabla XXII, se incorpora m_b para calcular el peso total de la estructura.

Tabla XXIII. **Masa del edificio aislado**

Nivel	Masa (ton-s ² /m)	Peso (Tonf)
5	284.96	2795.46
4	342.73	3362.22
3	342.73	3362.22
2	342.73	3362.22
1	345.49	3389.27
m_b	345.49	3389.27
Σ 2,004.13		

Fuente: elaboración propia.

La masa total del edificio aislado sísmicamente es:

$$M = m_s + m_b$$

$$m_s = 1,658.54 \frac{\text{ton} - s^2}{m}$$

$$m_b = 345.49 \frac{\text{ton} - s^2}{m}$$

$$M = 2,004.13 \frac{\text{ton} - s^2}{m}$$

5.2.1. Periodo fundamental con base aislada

Para que exista un adecuado contraste de rigideces entre la superestructura y la base aislada, reduciendo de esta manera los desplazamientos en el nivel máximo superior se consideró según la ecuación 20:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_b}} \geq 3 * T_f \leq 5 \text{seg}$$

En donde:

- T_b = periodo fundamental con base aislada.
- M = masa total de la estructura.
- K_b = rigidez del sistema aislado.
- T_f = periodo fundamental con base fija.

Se alarga el periodo en base fija según la ecuación anterior, con los datos obtenidos en la tabla XXI:

Tabla XXIV. **Modos y periodos fundamentales en base fija**

Modo	Periodo base fija (s)	Periodo base aislada (s)	Dirección
1	1.034	3.10	Y

Continuación tabla XXIV.

2	1.032	3.10	X
---	-------	------	---

Fuente: elaboración propia.

Según los datos calculados en la tabla XXIII, se propuso un valor para ambas direcciones del periodo aislado de:

$$T_b = 3.5 \text{ s}$$

5.2.2. Amortiguamiento efectivo

Este sirve para calcular el desplazamiento máximo, según la norma indica que como máximo se puede utilizar un 30 %, para este caso se propuso un 20 %, según la tabla XVII.

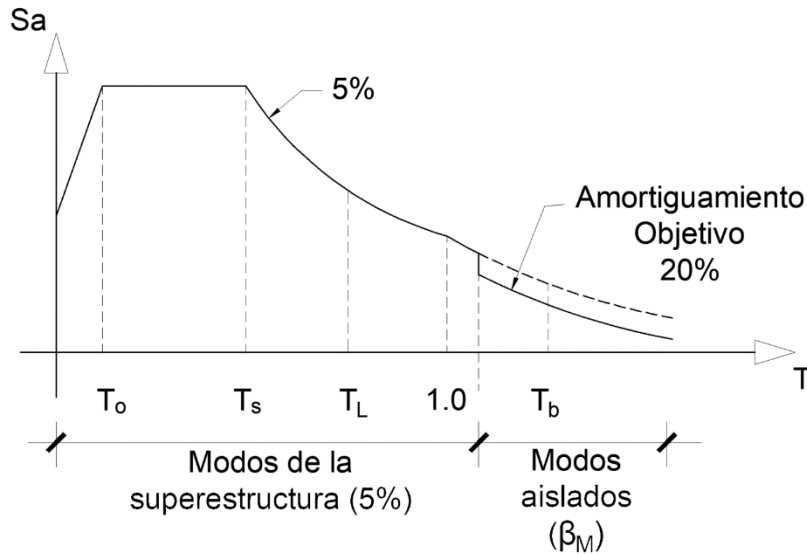
$$\beta_D = 20 \%$$

La reducción por amortiguamiento será de:

$$B_M = 1.5$$

El amortiguamiento objetivo se da únicamente en la zona aislada.

Figura 16. **Amortiguamiento objetivo**



Fuente: elaboración propia, desarrollada en el programa AutoCAD 19.

5.2.3. Rigidez lateral de la superestructura

Se utilizaron los periodos fundamentales en base fija en las dos direcciones para calcular la rigidez y obtener la magnitud. Se despeja K_s de la ecuación 20, obteniendo la siguiente expresión:

$$K_{sx} = \left(\frac{2\pi}{T_x} \right)^2 * M_s \quad \text{Ecuación 30}$$

$$K_{sy} = \left(\frac{2\pi}{T_y} \right)^2 * M_s \quad \text{Ecuación 31}$$

En donde:

$$M_s = 1,658.54 \frac{\text{ton} - s^2}{m}$$

$$T_x = 1.032 \text{ s}$$

$$T_y = 1.034 \text{ s}$$

Resolviendo para la ecuación 30 y 31:

$$K_{sx} = \left(\frac{2\pi}{1.032 \text{ s}} \right)^2 * 1,658.54 \frac{\text{ton} - s^2}{m} = 61,483.14 \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$K_{sy} = \left(\frac{2\pi}{1.034 \text{ s}} \right)^2 * 1,658.54 \frac{\text{ton} - s^2}{m} = 61,245.53 \frac{\text{tonf}}{m}$$

5.2.4. Rigidez lateral del sistema aislado

Se conoce la masa y el periodo del sistema aislado, se procede a calcular la rigidez, despejando K_b de la ecuación 30, dando como resultado la siguiente expresión:

$$K_b = \left(\frac{2\pi}{T_b} \right)^2 * M \quad \text{Ecuación 32}$$

En donde:

$$T_b = 3.5 \text{ s}$$

$$M = 2,004.13 \frac{\text{ton} - s^2}{m}$$

Resolviendo para la ecuación 32:

$$K_b = \left(\frac{2\pi}{3.5 s} \right)^2 * 2,004.03 \frac{\text{ton} - s^2}{m} = 6,458.81 \frac{\text{tonf}}{m}$$

5.2.5. Comparación entre rigidez lateral aislada y de la superestructura

Esta es una comparación para analizar qué tan flexible es el sistema de amortiguamiento en relación con la rigidez de la superestructura, se calcula con la siguiente expresión:

Para el sentido en X:

$$\text{Relación de Rigideces} = \frac{K_b}{K_{sx}} = \frac{6,458.81 \frac{\text{tonf}}{m}}{61,483.14 \frac{\text{tonf}}{m}} = 10.55 \%$$

Para el sentido en Y:

$$\text{Relación de Rigideces} = \frac{K_b}{K_{sy}} = \frac{6,458.81 \frac{\text{tonf}}{m}}{61,245.53 \frac{\text{tonf}}{m}} = 10.55 \%$$

Según la relación anterior se observó que el $K_b = 11 \% K_b$, esto significa que el sistema de aislamiento tiene una rigidez muy baja.

5.2.6. Rigidez efectiva del aislador

Se considera que por cada columna de la estructura, el modelo lleva un aislador en la base, por lo tanto se asume la siguiente igualdad:

$$\# \text{ Columnas} = \# \text{ aisladores}$$

En donde:

$$\# \text{ Columnas} = 88 \text{ unidades}$$

$$\# \text{ aisladores} = 88 \text{ unidades}$$

Para calcular la rigidez efectiva de cada aislador se calcula:

$$K_b = K_{eff1} + K_{eff2} + K_{eff3} + \dots + K_{eff_n}$$

$$K_b = \sum_{i=1}^{i=88} K_{effi}$$

$$\bar{K}_{eff} = \frac{K_b}{\# \text{ aisladores}}$$

Ecuación 33

En donde:

$$K_b = 6,458.81 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Resolviendo para la ecuación 33:

$$\bar{K}_{eff} = \frac{6,458.81 \frac{tonf}{m}}{88 unidades} = 73.40 \frac{tonf}{m}$$

5.2.7. Definir parámetros sísmicos

Se calculó el espectro de diseño para la ubicación en estudio según la normativa de AGIES y descrita en capítulos anteriores, se utilizaron los parámetros de diseño de la siguiente tabla:

Tabla XXV. **Espectro de diseño**

<i>Municipio:</i>		Guatemala
<i>Departamento:</i>		Guatemala
<i>País:</i>		Guatemala
<i>Suelo tipo:</i>		C
<i>Índice de sismicidad</i>	<i>Io =</i>	4.1
<i>Ordenada espectral de periodo corto del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés</i>	<i>Scr =</i>	1.53 g
<i>Ordenada espectral de periodo 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés</i>	<i>S1r =</i>	0.68 g
<i>T_L=</i>		2.69 s
<i>Clase de obra</i>	Esencial	
<i>Nivel de protección</i>	E	
<i>Sismo de diseño</i>	5 % en 50 años	
<i>Clase de sitio</i>	D	
<i>Coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos</i>	<i>Fa =</i>	1.00
<i>Coeficiente de sitio para periodos largos</i>	<i>Fv =</i>	1.00

Tabla X

Dato ingresado

Tabla XI

Tabla XII

Continuación tabla XXV.

<i>Tipo de fuente</i>	<i>C</i>		<i>Tabla XIII</i>
<i>Distancia horizontal más cercana a la fuente sísmica</i>	≥ 15 km		
<i>Coefficiente por proximidad de las amenazas especiales para periodos de vibración cortos</i>	<i>Na =</i>	1.00	<i>Tabla XIV</i>
<i>Coefficiente de proximidad de las amenazas especiales para periodos de vibración largos</i>	<i>Nv =</i>	1.00	<i>Tabla XV</i>
<i>Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodos de vibración cortos</i>	<i>Scs =</i>	1.53 g	<i>Ecuación 7</i>
<i>Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración de 1 segundo</i>	<i>S1s =</i>	0.68 g	<i>Ecuación 8</i>
<i>Periodo de transición que separa los periodos cortos de los largos</i>	<i>Ts =</i>	0.4444 seg	<i>Ecuación 9</i>
<i>Periodo que define el inicio de la meseta de periodos cortos del espectro</i>	<i>To =</i>	0.0889 seg	
<i>Tipo de sismo</i>	<i>Extremo</i>		<i>Dato ingresado</i>
<i>Periodo de retorno</i>	2500 años		
<i>Factor de determinación de los niveles de diseño</i>	<i>Kd =</i>	1.00	<i>Tabla XVI</i>
	<i>Scd =</i>	1.53 g	<i>Ecuación 10</i>
	<i>S1d =</i>	0.68 g	<i>Ecuación 11</i>
<i>Aceleración máxima del suelo</i>	<i>AMSd=</i>	0.612 g	
<i>Componente vertical del sismo de diseño</i>	<i>Svd =</i>	0.306 g	

Fuente: elaboración propia.

5.2.8. Cálculo del desplazamiento máximo

Se calculó considerando únicamente efectos traslacionales con la ecuación 22:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M^2}{4\pi^2 B_M}$$

En donde:

$$g = 980 \frac{cm}{s^2}$$

$$S_{M1} = S_{1d} = 0.68 g$$

$$T_M = T_b = 3.5 s$$

$$B_M = 1.5$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 22:

$$D_M = \frac{980 \frac{cm}{s^2} * 0.68 * (3.5 s)^2}{4\pi^2 * 1.5} = 30.27 cm$$

5.2.9. Cálculo del desplazamiento total máximo

Este desplazamiento se da en la esquina del sistema de aislamiento, significa que tiene efectos torsionales, torsión y es debido a la excentricidad natural como accidental.

Se asume el valor de $1.5 * D_M$

$$D_{TM} = 1.15 * D_M$$

Donde:

$$D_M = 30.27 \text{ cm}$$

Sustituyendo valores en:

$$D_{TM} = 1.15 * D_M$$

$$D_{TM} = 1.15 * 30.27 \text{ cm}$$

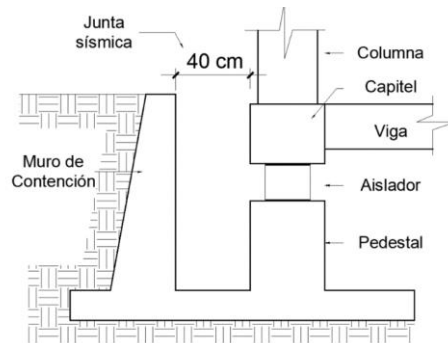
$$D_{TM} = 34.81 \text{ cm}$$

Se debe verificar con la ecuación 23, cuando se obtengan datos del balance torsional del modelo aislado sísmicamente.

5.2.10. Cálculo de la junta sísmica perimetral

Se asumió una separación medida desde el muro de contención de 40 cm.

Figura 17. **Junta sísmica perimetral**



Fuente: elaboración propia, realizada con el programa AutoCad 2019.

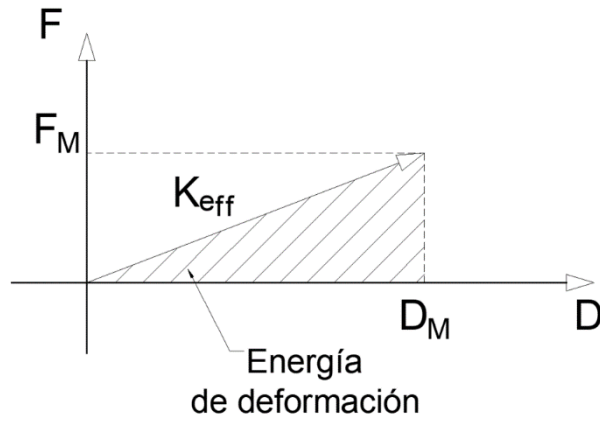
5.2.11. Definir parámetros para el análisis modal espectral

El análisis modal espectral es lineal por lo que aún no es de mucha relevancia las propiedades del tipo de aislador por utilizar.

$$\bar{K}_{eff} = 73.40 \frac{tonf}{m}$$

$$\beta_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{energía\ disipada}{energía\ de\ deformación}$$

Figura 18. **Propiedades lineales equivalentes**



Fuente: elaboración propia, realizada con el programa AutoCAD 2019.

5.2.12. **Cálculo del cortante de diseño**

Se calculó con la ecuación 26, que se describe a continuación:

$$V_b = K_M D_M$$

En donde:

$$K_M = K_b = 6,458.81 \frac{tonf}{m}$$

$$D_M = 30.27 \text{ cm}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$V_b = 6,458.81 \frac{tonf}{m} * \frac{30.27 \text{ cm}}{100} = 1,955.19 \text{ tonf}$$

5.2.13. Cálculo de la fuerza cortante no reducida

Es la fuerza cortante de la superestructura no reducida, lo indica la ecuación 28, con la siguiente expresión:

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-2.5\beta_m)}$$

En donde:

$$V_b = 1,955.19 \text{ tonf}$$

$$W_s = 16,254.81 \text{ tonf}$$

$$W = 19,640.62 \text{ tonf}$$

$$\beta_m = 0.20$$

Sustituyendo en la ecuación anterior, se obtiene:

$$V_{st} = 1,955.19 \text{ tonf} \left(\frac{16,254.81 \text{ tonf}}{19,640.62 \text{ tonf}} \right)^{(1-2.5(0.20))}$$

$$V_{st} = 1,778.70 \text{ tonf}$$

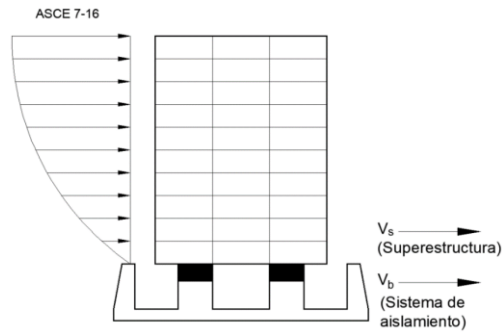
Se procedió a calcular V_s , con la ecuación 27

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I}$$

Se asumió el valor para $R_I = 2$, para este caso de estudio, se sustituye en la ecuación anterior:

$$V_s = \frac{1,778.70 \text{ tonf}}{2} = 889.35 \text{ tonf}$$

Figura 19. **Fuerzas cortantes del sistema aislado**

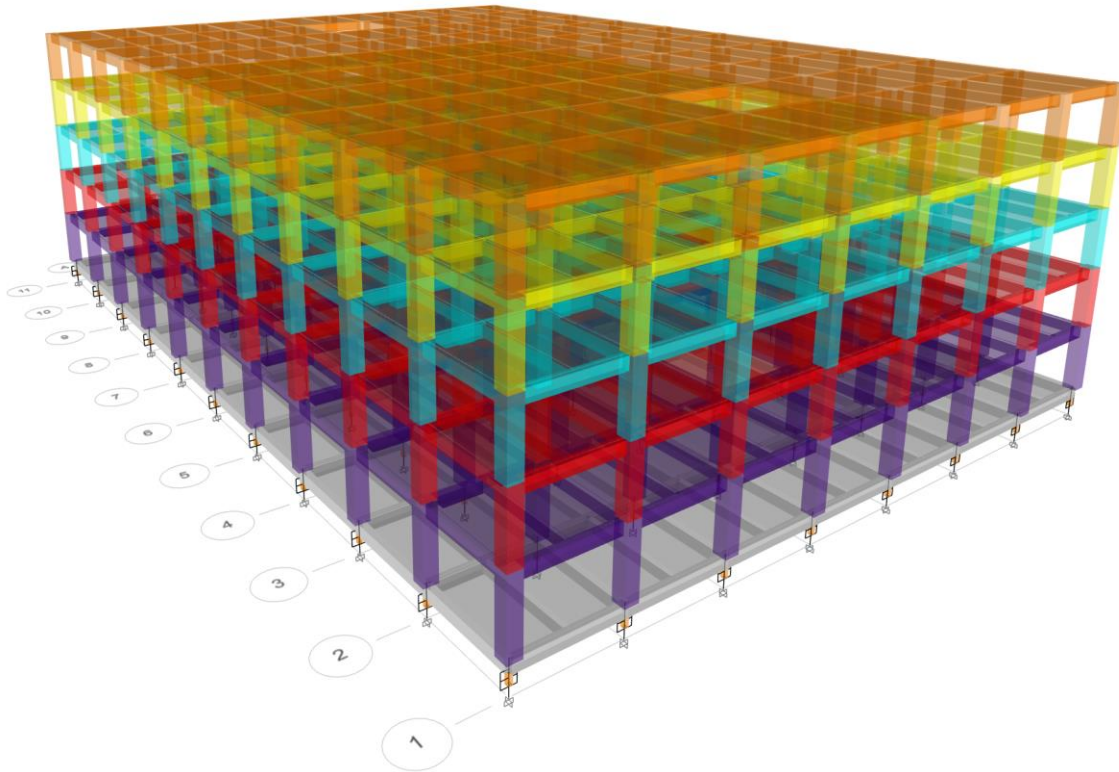


Fuente: elaboración propia, realizada con el programa AutoCAD 2019.

5.3. Modelado estructural del edificio con base aislada

Se modificó el modelo estructural en base fija y se le agregó un nuevo piso de servicio, al cual se designa como nivel de aislamiento, tiene una altura de 1.80 m, se colocó losa maciza en ambos sentidos para que trabaje como un diafragma rígido.

Figura 20. **Modelo estructural con base aislada**



Fuente: elaboración propia, realizada con el programa ETABS 19.

En cada una de las columnas se le asignó un aislador, con las características lineales iniciales, se asumió que todos los aisladores son de una sola propiedad, a continuación, se muestra la configuración utilizada en el aislador LRB. El procedimiento fue de múltiples iteraciones debido a que la rigidez que debe presentar el sistema de aislamiento no debe ser mayor que la rigidez total necesaria por la edificación.

Figura 21. Propiedades lineales de un aislador LRB

ET Link Property Data ×

General

Link Property Name: P-Delta Parameters:

Link Type: Acceptance Criteria:

Link Property Notes: None specified

Total Mass and Weight

Mass: tonf-s²/m Rotational Inertia 1: tonf-m-s²

Weight: tonf Rotational Inertia 2: tonf-m-s²

Rotational Inertia 3: tonf-m-s²

Factors for Line and Area Springs

Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property: m

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property: m²

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	NonLinear	Properties
☒ U1	☐	☐	Modify/Show for U1...	☐ R1	☐	☐	Modify/Show for R1...
☒ U2	☐	☐	Modify/Show for U2...	☐ R2	☐	☐	Modify/Show for R2...
☒ U3	☐	☐	Modify/Show for U3...	☐ R3	☐	☐	Modify/Show for R3...

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

Fuente: elaboración propia, realizada con el programa ETABS 19.

Figura 22. **Propiedades lineales en el eje Z**

ET Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: LRB

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Linear Properties

Effective Stiffness: 73400 tonf/m

Effective Damping: 0 tonf-s/m

OK Cancel

Fuente: elaboración propia, realizada con el programa ETABS 19.

Figura 23. **Propiedades lineales para el eje X y Y**

ET Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: LRB

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Linear Properties

Effective Stiffness: 73.4 tonf/m

Effective Damping: 0 tonf-s/m

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0 m

OK Cancel

Fuente: elaboración propia, realizada con el programa ETABS 19.

La rigidez en la dirección del eje Z, no se consideró en este estudio, por lo que se le asignaron valores altos para idealizar que es muy rígido en esa dirección.

La rigidez en la dirección de los ejes X, Y; se les ingreso el valor calculado con la ecuación 33.

$$\bar{K}_{eff} = 73.40 \frac{tonf}{m}$$

Se realizó el corrimiento del programa ETABS, con el modelo estructural con base aislada, para corroborar el periodo fundamental de la estructura, a lo cual los resultados dieron cerca al periodo aislado asumido en los procesos anteriores.

Tabla XXVI. **Modos y periodos fundamentales en base aislada con un tipo de aislador LRB**

Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ	Sentido
1	3.647	0.997	0.00	0.00	Traslacional
2	3.643	0.00	0.998	0.00	Traslacional
3	3.373	0.00	0.00	0.974	Rotacional

Fuente: elaboración propia.

Esto indicó que la estructura se comportó de una manera adecuada con el sistema aislado ya que alcanzó el 99 % de participación de masa. Se realizó la corrección del periodo por el amortiguamiento, para este caso la modificación es por un factor de 0.9798.

Tabla XXVII. **Modos y periodos fundamentales en base aislada con un tipo de aislador LRB**

Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ	Sentido
1	3.573	0.997	0.00	0.00	Traslacional
2	3.579	0.00	0.998	0.00	Traslacional
3	3.305	0.00	0.00	0.974	Rotacional

Fuente: elaboración propia.

Con estos resultados, la estructura aislada se mantiene cerca del periodo fundamental asumido, que era de 3.5 s.

5.3.1. Combinaciones de carga para sistemas de aislamiento

Estas combinaciones se utilizaron para verificar los aisladores, no para diseño, según lo indica la norma (ASCE/SEI 7-16, 2016).

5.3.1.1. Carga vertical promedio

Esta carga se utiliza para el análisis sísmico, es para calcular la masa sísmica.

$$D + 0.5L$$

En donde:

$$D = \text{Carga muerta}$$

$$L = \text{Carga viva}$$

5.3.1.2. Carga vertical máxima

Esta carga es para diseñar el sistema de aislamiento, es para verificar la carga de pandeo o la estabilidad del aislador.

$$1.25(D + L) + (EH + EV)$$

En donde:

$$EH = \text{Sismo horizontal}$$

$$EV = \text{Sismo vertical} = E_v = 0.3375 * D$$

Sustituyendo EV en:

$$1.25(D + L) + (EH + EV)$$

$$1.25(D + L) + (EH + 0.3375 * D)$$

$$1.59D + 1.25L + EH$$

5.3.1.3. Carga vertical mínima

Esta carga es para verificar que no existan tracciones en la base de la estructura.

$$0.9D - (EH - EV)$$

En donde:

$$E_V = 0.3375 * D$$

Sustituyendo E_V en:

$$0.9D - (EH - EV)$$

$$0.9D - EH + 0.3375D$$

$$0.56D - EH$$

5.3.2. Chequeo de tracciones en la base

Se verificaron las reacciones en la base para la combinación de carga vertical mínima, dando como resultado un valor mínimo de 18.27 Tonf, ya que el valor es positivo significa que no existen tracciones y el sistema se comporta adecuadamente. Los datos de las reacciones se adjuntan en los anexos.

5.3.3. Cálculo del peso sísmico

Este se calculó con la combinación con la carga vertical promedio, la cual contiene el 100 % de carga muerta y el 50 % de carga viva, el resultado fue de 19,605.09 toneladas.

5.3.4. Predimensionamiento de los dispositivos de aislamiento

Se propusieron dos tipos de aisladores LRB de diferentes diámetros según la tabla XVIII y se propuso un tipo de deslizador con un coeficiente de fricción del

5 % para el sistema de aislamiento. Se formaron grupos, tomando en cuenta el promedio de carga de diseño, que está dada por la combinación de carga vertical máxima.

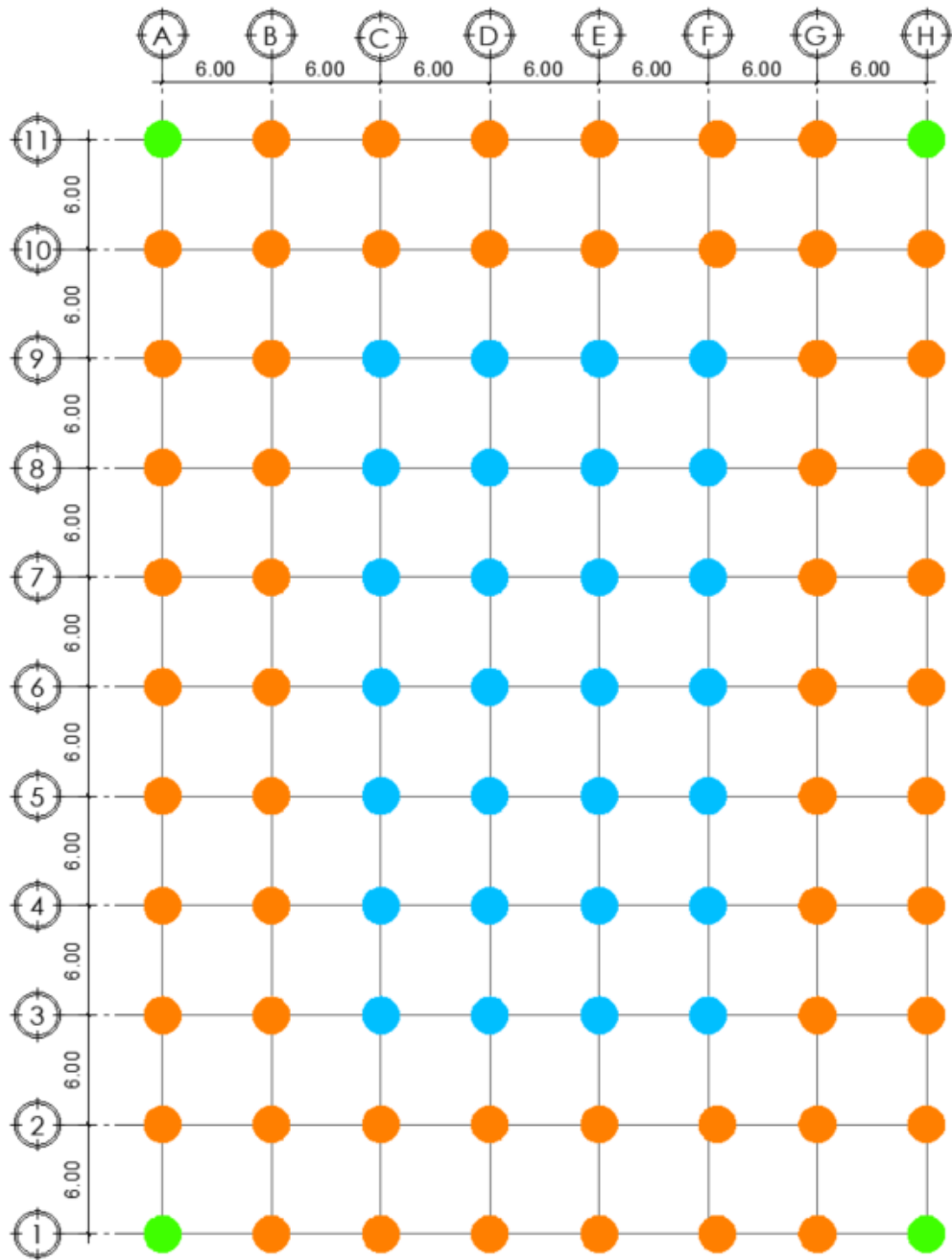
Tabla XXVIII. **Tipos de dispositivos**

Tipo de dispositivos	ID	Color	Ubicación	Cantidad
1	LRB 1	Verde	Esquina	4
2	SL	Naranja	Borde	56
3	LRB 3	Celeste	Centro	28

Fuente: elaboración propia.

Se realizó la distribución de todos los dispositivos de aislamiento, para este caso se utilizaron 2 aisladores de diámetro diferente y 1 deslizador friccionante.

Figura 24. **Distribución de aisladores y deslizadores**

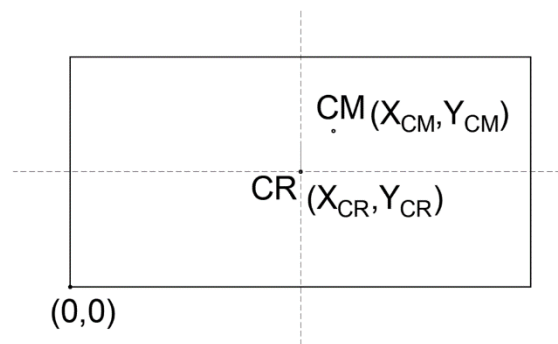


Fuente: elaboración propia, realizada con el programa AutoCAD 2019.

5.3.5. Balance torsional

Se calculó para que coincidiera el centro de masas con el centro de rigideces.

Figura 25. Balance torsional



Fuente: elaboración propia, realizada con el programa AutoCAD 2019.

Se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$X_{CM} = \frac{\sum P_i X_i}{W}$$

Ecuación 34

$$Y_{CM} = \frac{\sum P_i Y_i}{W}$$

Ecuación 35

$$X_{CR} = \frac{\sum K_{effi} X_i}{K_b}$$

Ecuación 36

$$Y_{CR} = \frac{\sum K_{effi} Y_i}{K_b}$$

Ecuación 37

En donde:

- P_i = carga de servicio, en tonf.
- X_i = coordenada en X, en m.
- Y_i = coordenada en Y, en m.
- W = peso sísmico, en tonf.
- K_{eff} = rigidez efectiva del dispositivo, en tonf/m.
- K_b = rigidez total del sistema, en tonf/m.

Según los cálculos realizados se resume los siguientes datos:

Tabla XXIX. **Cálculo de centro de masa y rigidez**

Descripción	X	Y
CM	21.00	30.00
CR	21.00	30.00
$e_{natural}$	0.00	0.00

Fuente: elaboración propia.

El centro de masa y el centro de rigidez coinciden, porque es un edificio regular.

5.3.6. Diseño del aislador LRB

Con base en la distribución de los aisladores en la planta del edificio se procedió a diseñar los aisladores LRB 1 y LRB 3 de diferente diámetro, para

cumplir con las condiciones de la normativa y optimizar el diseño del sistema aislado. El procedimiento se resume a continuación:

Tabla XXX. **Diseño del aislador LRB 1**

Propiedad	Valor	Unidades	Descripción	Fórmula
$\tau_{py} =$	800.00	tonf/m ²	Esfuerzo de fluencia del plomo.	Dato de fabricante
$G =$	50.00	tonf/m ²	Módulo de corte de la goma.	Dato del fabricante
$\sigma_{adm} =$	1000.00	tonf/m ²	Esfuerzo axial permisible del aislador.	Dato del fabricante
$P_{serv} =$	95.83	tonf	Carga promedio de servicio.	Combinación D+0.5L
$P_{s_m\acute{a}x} =$	167.95	tonf	Carga máxima.	$1.59D+1.25L+Ex$
$A_{min} =$	2682.2	cm ²	Área mínima del aislador.	$\frac{P_{serv}}{\sigma_{adm}}$
$D_{0_min} =$	34.93	cm	Diámetro mínimo del aislador.	$\sqrt{\frac{4A_{min}}{\pi}}$
$D_{0_min} =$	52.22	cm	Diámetro mínimo del aislador.	$1.5D_{TM}$
$D_0 =$	55.00	cm	Diámetro del aislador propuesto.	
$D_{i_min} =$	9.17	cm	Diámetro mínimo del núcleo de plomo.	$\frac{D_0}{6}$
$D_{i_max} =$	18.33	cm	Diámetro máximo del núcleo de plomo.	$\frac{D_0}{3}$
$D_i =$	9.50	cm	Diámetro del núcleo de plomo propuesto.	

Continuación tabla XXX.

$C_s =$	1.00	cm	Recubrimiento del aislador según el fabricante.	
$D_e =$	53.00	cm	Diámetro neto.	$D_e = D_0 - 2C_s$
$A =$	0.238	m ²	Área del aislador considerando el recubrimiento.	$\frac{\pi D_0^2}{4}$
$A_e =$	0.221	m ²	Área efectiva con el diámetro neto.	$\frac{\pi D_e^2}{4}$
$A_p =$	0.007	m ²	Área del núcleo de plomo.	$\frac{\pi D_i^2}{4}$
$A_n =$	0.214	m ²	Área neta de la goma.	$A_e - A_p$
$A_g =$	0.230	m ²	Área de la goma.	$A - A_p$
$t_r =$	0.80	cm	Espesor de una lámina de la goma.	Asumido
$S =$	16.03	-	Factor de forma.	$\frac{A_g}{\pi * D_e * t_r}$
$K_2 =$	82.91	tonf/m		$\frac{A_g * G}{T_r}$
$Q_d =$	5.67	Tonf	Fuerza característica.	$A_g * \tau_{py}$
$\alpha =$	10.00		Relación entre K ₂ y K ₁ .	Asumido
$K_1 =$	829.12	tonf/m		αK_2
$F_y =$	6.30	tonf	Fuerza de fluencia	$\frac{Q_d K_1}{K_1 - K_2}$
$D_y =$	0.76	cm	Desplazamiento de fluencia.	$\frac{F_y}{K_1}$
$K_{eff} =$	101.64	tonf/m	Rigidez efectiva del aislador.	$\frac{Q_d}{D_M} + K_2$

Continuación tabla XXX.

$EDC =$	6.69	tonf-m	Energía disipada en un ciclo.	$4 * Q_d * (D_M - D_y)$
$FR =$	12.55	tonf	Fuerza restauradora.	$0.5 * K_2 * D_M$
$A_r =$	0.0543	m ²	Área reducida de la goma.	Ir a anexos
$\frac{A_r}{A} =$	23.00	%	Relación entre área reducida y total.	-
$P_{cr} =$	184.27	tonf	Carga crítica.	$\frac{\pi}{\sqrt{8}} * G * S * \frac{D_e}{N * t_r} * A_r$
$FS =$	1.10	≥ 1.0	Factor de seguridad.	$\frac{P_{s,max}}{P_{cr}}$

Fuente: elaboración propia.

Con la carga que se diseñó este aislador aporta rigidez al sistema de aislamiento, disipará la energía y cumplirá con el factor de seguridad con valor de 10 %, además presentó fuerza restitutiva y se cumplieron con los diámetros mínimos de diámetro interior y diámetro exterior, el aislador presenta una reducción del 23 % con respecto a el área inicial. Este aislador cumple con los requerimientos de carga que necesita el sistema para disipar la energía y restaurarse después de la que actúa la fuerza.

Tabla XXXI. **Diseño del aislador LRB 3**

Propiedad	Valor	Unidades	Descripción	Fórmula
$\tau_{py} =$	800.00	tonf/m ²	Esfuerzo de fluencia del plomo.	Dato de fabricante

Continuación tabla XXXI.

$G =$	50.00	tonf/m ²	Módulo de corte de la goma.	Dato del fabricante
$\sigma_{adm} =$	1000.00	tonf/m ²	Esfuerzo axial permisible del aislador.	Dato del fabricante
$P_{serv} =$	268.22	tonf	Carga promedio de servicio.	Combinación D+0.5L
$P_{s_m\acute{a}x} =$	480.92	tonf	Carga máxima.	1.59D+1.25L+Ex
$A_{min} =$	2682.2	cm ²	Área mínima del aislador.	$\frac{P_{serv}}{\sigma_{adm}}$
$D_{0_min} =$	58.44	cm	Diámetro mínimo del aislador.	$\sqrt{\frac{4A_{min}}{\pi}}$
$D_{0_min} =$	52.22	cm	Diámetro mínimo del aislador.	$1.5D_{TM}$
$D_0 =$	65.00	cm	Diámetro del aislador propuesto.	
$D_{i_min} =$	10.83	cm	Diámetro mínimo del núcleo de plomo.	$\frac{D_0}{6}$
$D_{i_max} =$	21.67	cm	Diámetro máximo del núcleo de plomo.	$\frac{D_0}{3}$
$D_i =$	11.00	cm	Diámetro del núcleo de plomo propuesto.	
$C_s =$	1.00	cm	Recubrimiento del aislador según el fabricante.	
$D_e =$	63.00	cm	Diámetro neto.	$D_e = D_0 - 2C_s$
$A =$	0.332	m ²	Área del aislador considerando el recubrimiento.	$\frac{\pi D_0^2}{4}$
$A_e =$	0.312	m ²	Área efectiva con el diámetro neto.	$\frac{\pi D_e^2}{4}$
$A_p =$	0.01	m ²	Área del núcleo de plomo.	$\frac{\pi D_i^2}{4}$

Continuación tabla XXXI.

$A_n =$	0.302	m ²	Área neta de la goma.	$A_e - A_p$
$A_g =$	0.322	m ²	Área de la goma.	$A - A_p$
$t_r =$	0.80	cm	Espesor de una lámina de la goma.	Asumido
$S =$	19.09	-	Factor de forma.	$\frac{A_g}{\pi * D_e * t_r}$
$K_2 =$	115.95	tonf/m		$\frac{A_g * G}{T_r}$
$Q_d =$	7.60	tonf	Fuerza característica.	$A_g * \tau_{py}$
$\alpha =$	10.00	-	Relación entre K_2 y K_1 .	Asumido
$K_1 =$	1159.45	tonf/m		αK_2
$F_y =$	8.45	tonf	Fuerza de fluencia.	$\frac{Q_d K_1}{K_1 - K_2}$
$D_y =$	0.73	cm	Desplazamiento de fluencia.	$\frac{F_y}{K_1}$
$K_{eff} =$	141.06	tonf/m	Rigidez efectiva del aislador.	$\frac{Q_d}{D_M} + K_2$
$EDC =$	8.98	tonf-m	Energía disipada en un ciclo.	$4 * Q_d * (D_M - D_y)$
$FR =$	17.55	tonf	Fuerza restauradora.	$0.5 * K_2 * D_M$
$A_r =$	0.1109	m ²	Área reducida de la goma.	Ir a anexos
$\frac{A_r}{A} =$	33.00	%	Relación entre área reducida y total.	-
$P_{cr} =$	532.63	tonf	Carga crítica	$\frac{\pi}{\sqrt{8}} * G * S * \frac{D_e}{N * t_r} * A_r$

Continuación tabla XXXI.

$FS =$	1.11	≥ 1.0	Factor de seguridad.	$\frac{P_{s_max}}{P_{cr}}$
--------	------	------------	----------------------	-----------------------------

Fuente: elaboración propia.

Para el aislador LRB 3 se presentó una carga promedio superior al aislador LRB 1, debido a que aumentó la carga. Las necesidades son superiores para este aislador, lo que se aumentó fue el diámetro exterior y el diámetro del núcleo de plomo, aportando rigidez efectiva al sistema de aislamiento, energía disipada en cada ciclo, fuerza restitutiva y un 33 % de reducción de la goma. Cumpliendo con un factor de seguridad de 11 % como lo especifica la norma.

5.3.7. Diseño del deslizador

Estos tienen comportamiento elastoplástico completamente perfecto, son dispositivos completamente planos, no tienen capacidad de restitución, pero disipan mucha energía.

Tabla XXXII. **Diseño del deslizador plano**

Propiedad	Valor	Unidades	Descripción	Formula
$\mu =$	5	%	Coeficiente de fricción.	Dato asumido
$P_{serv} =$	209.14	tonf	Carga Promedio de servicio.	Combinación D+0.5L
$P_{s_m\acute{a}x} =$	478.07	tonf	Carga máxima.	$1.59D+1.25L+Ex$
$Q_d =$	10.45	tonf	Fuerza característica.	$P_{serv} * \mu$
$F_y =$	10.45	tonf	Fuerza de fluencia.	Q_d

Continuación tabla XXXII.

$K_{eff} =$	34.54	tonf/m	Rigidez efectiva del deslizador.	$\frac{F_y}{D_M}$
$EDC =$	12.66	tonf/m	Energía disipada en un ciclo.	$4 * Q_d * D_M$
$FR =$	0.00	tonf	Fuerza restauradora.	-

Fuente: elaboración propia.

El deslizador plano se diseñó con un coeficiente de fricción del 5 %, este dispositivo agrega rigidez al sistema de aislamiento y tiene disipación de energía bastante alta, pero debe de trabajar conjuntamente con los aisladores porque los deslizadores carecen de fuerza de restitución.

5.3.8. Rigidez del sistema de aislamiento

La sumatoria de la rigidez de todos los dispositivos nos indicó la nueva rigidez del sistema de aislamiento, por lo que se calcula con los siguientes datos:

Tabla XXXIII. Rigidez del sistema de aislamiento

Tipo de dispositivos	ID	K_{effi} (tonf/m)	Cantidad	K_{eff} total (tonf/m)
1	LRB 1	101.64	4	406.58
2	SL	34.54	56	1934.43
3	LRB 3	141.06	28	3949.68
$\Sigma =$				6290.68

Fuente: elaboración propia.

Con la distribución presentada en planta y la rigidez que aportan los dispositivos, se tiene una rigidez del sistema de aislamiento de $6290.68 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$ que en relación al valor asumido inicialmente existe una diferencia del 1 %.

5.3.9. Periodo fundamental de la estructura aislada

Según la ecuación 20 se determinará el periodo fundamental de la estructura aislada con los siguientes datos:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_b}} \geq 3 * T_f \leq 5 \text{seg}$$

En donde:

- T_b = Periodo fundamental con base aislada.
- $M = 2,004.14 \text{ tonf-s}^2/\text{m}$.
- $K_b = 6290.68 \text{ tonf/m}$.

Sustituyendo datos

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{2,004.14 \frac{\text{tonf-s}^2}{\text{m}}}{6,290.68 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}}} = 3.55 \text{ s}$$

Se obtuvo un valor similar al periodo objetivo calculado inicialmente, con una diferencia del 1 % entre ambos, esto significa que el periodo de la estructura es el adecuado y cumple con la condición de triplicar el periodo en base fija.

5.3.10. Energía disipada en un ciclo

Para todo el conjunto de dispositivos que conformar el sistema de aislamiento, se calculó la energía que se disipa con todos los grupos que se formaron en la base de la edificación, se detalla a continuación en la siguiente tabla.

Tabla XXXIV. **Energía disipada del sistema de aislamiento**

Tipo de dispositivos	ID	EDC (tonf-m)	Cantidad	EDC total (tonf-m)
1	LRB 1	6.69	4	26.78
2	SL	12.66	56	709.06
3	LRB 3	8.98	28	251.56
			$\Sigma=$	987.40

Fuente: elaboración propia.

5.3.11. Fuerza de restauración del sistema de aislamiento

Se verificó que el sistema de aislamiento garantice que el edificio no se quede a un lado deformado y que tenga capacidad de restitución.

5.4. Análisis tiempo historia

Se calcularon las consideraciones necesarias para análisis no lineal tiempo historia al sistema de aislamiento tomando como referencia la norma peruana E030 y la norma América ASCE 7-16.

5.4.1. Registros sísmicos

Se utilizaron 3 registros sísmicos que fueran compatibles con las condiciones del proyecto y las características del suelo. Los registros sísmicos se tabulan en la siguiente tabla:

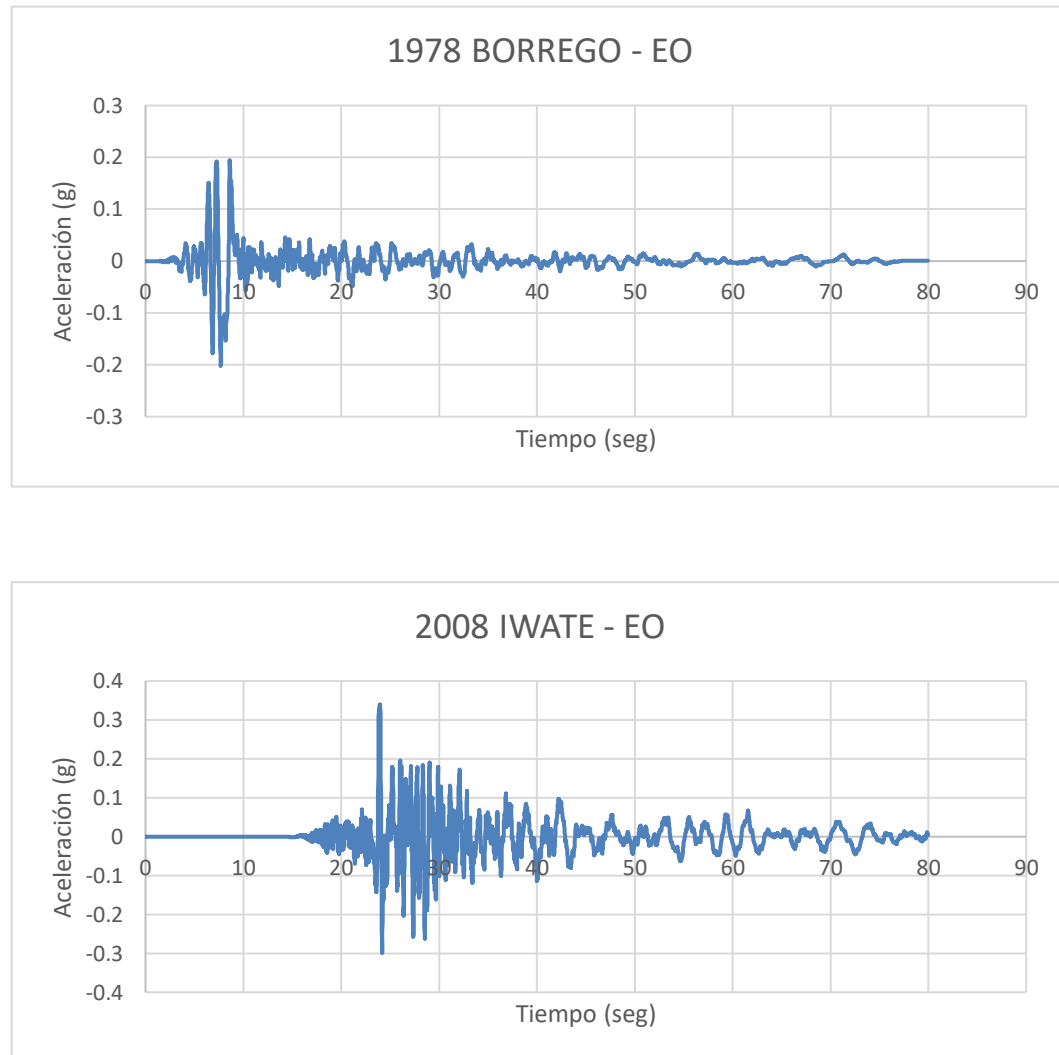
Tabla XXXV. **Registros sísmicos**

Sismo	Año	Magnitud	Intervalo de muestreo (s)	Número de muestras	Duración (s)
Iwate-Japón	2008	6.90	0.01	11,998	119.98
Tottori-Japón	2000	6.61	0.01	13,226	132.26
Borrego	1968	6.63	0.01	7,997	79.97

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan gráficamente los registros sísmicos utilizados para el desarrollo del análisis tiempo historia.

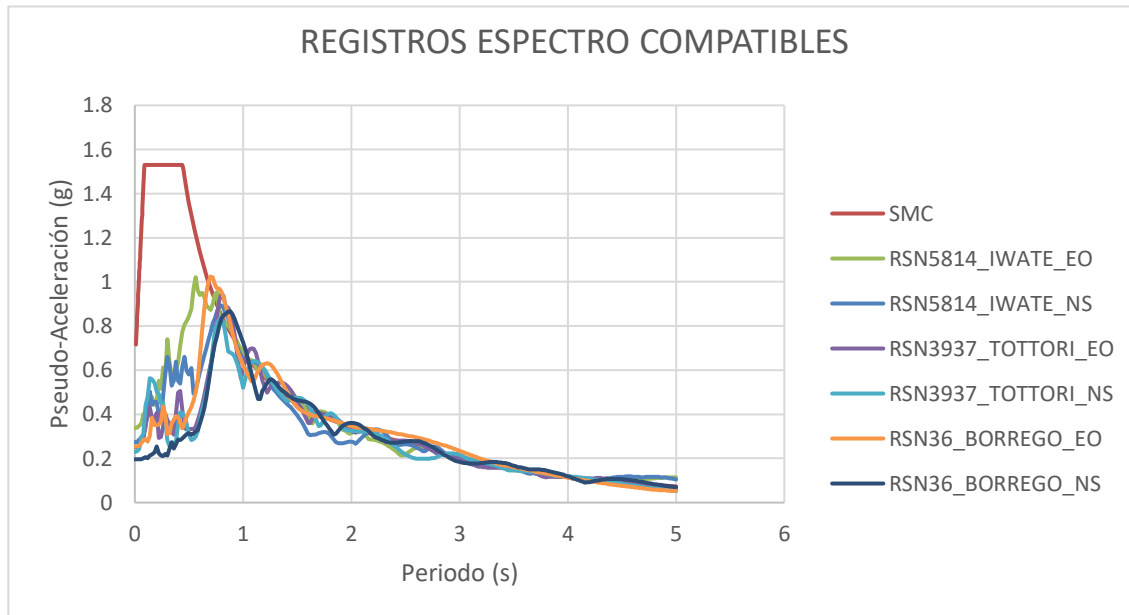
Figura 26. **Registros sísmicos utilizados**



Fuente: elaboración propia, realizada con el programa Excel.

Luego se integraron los espectros de aceleración sin ajustar de los 3 registros sísmicos y el utilizado para el análisis que fue el sismo máximo considerado.

Figura 27. **Espectros de aceleración**

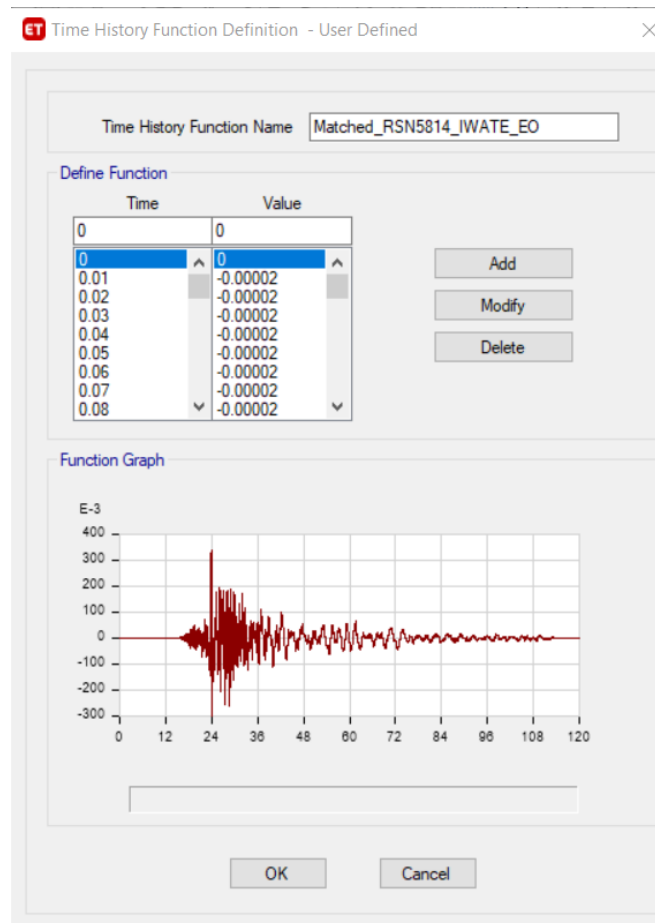


Fuente: elaboración propia, realizada con el programa Excel.

Luego se ajustaron con el programa *seismo match* para que coincidan en el rango de escalamiento que indica la norma que es del 20 % al 125 % del periodo aislado con el espectro objetivo. Para este caso se utilizó de 0.714 a 4.463 segundos.

Posteriormente, se ingresó cada una de las componentes EO y NS del sismo en las funciones de tiempo historia, al modelo de ETABS para asignar las condiciones de carga.

Figura 28. **Función definida tiempo historia**



Fuente: elaboración propia, realizada con el programa ETABS 18.

Se realizó el mismo procedimiento con los demás registros sísmicos, dependiendo la dirección. Con esto quedaron definidos los casos de carga con que se analizaron los modelos.

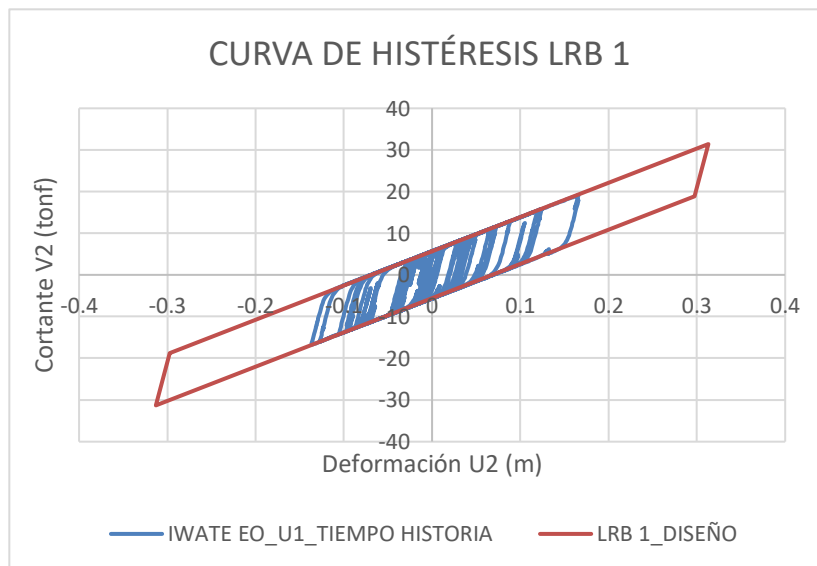
5.4.2. Resultados obtenidos

Son los resultados de los diferentes procedimientos efectuados con el programa ETABS para alcanzar los objetivos de esta investigación, los cuales se describen a continuación:

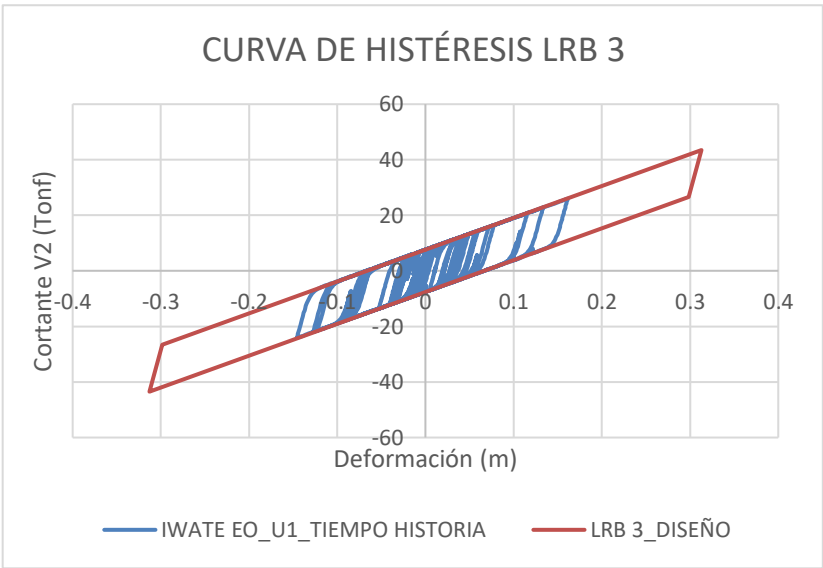
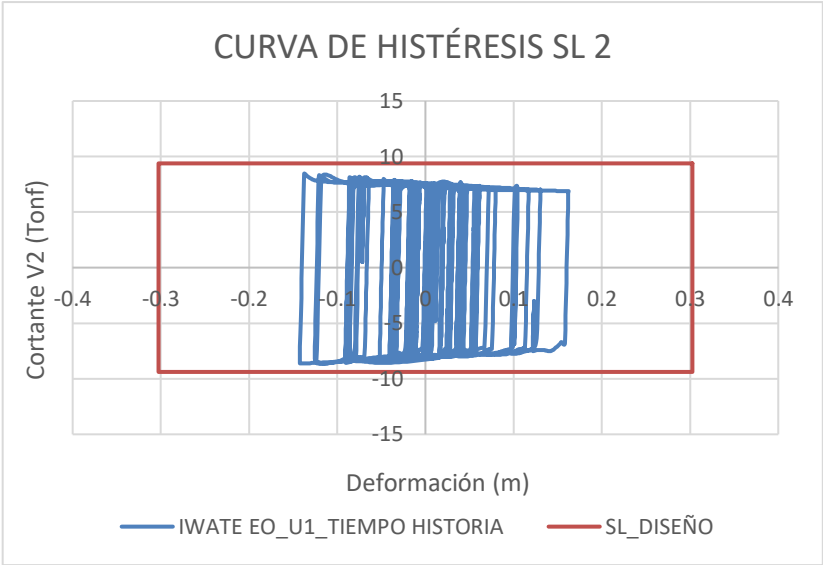
5.4.2.1. Deformación de los aisladores

Se muestra la curva de histéresis de los dispositivos LRB1, SL y LRB 3, que describe el comportamiento de los aisladores elastoméricos y deslizadores planos, cuando se incorporó el análisis no lineal tiempo historia y el comportamiento del análisis estático equivalente.

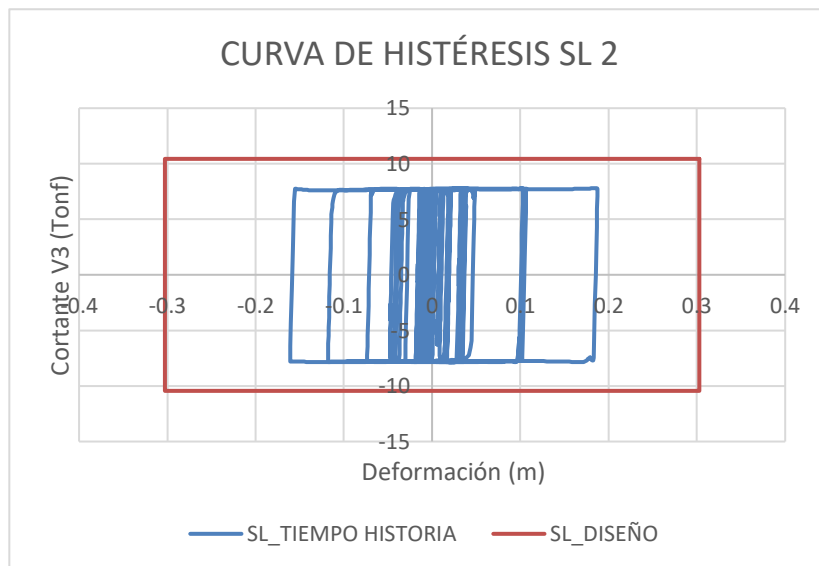
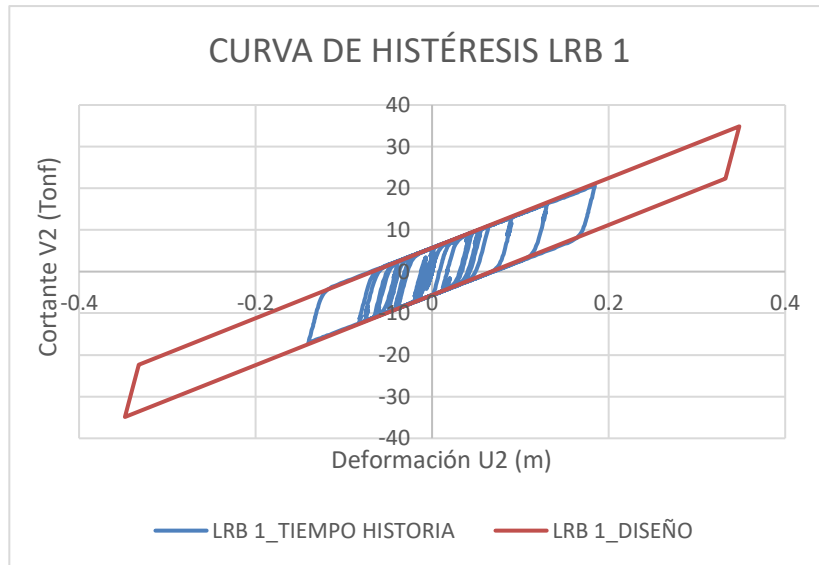
Figura 29. **Curvas de histéresis**



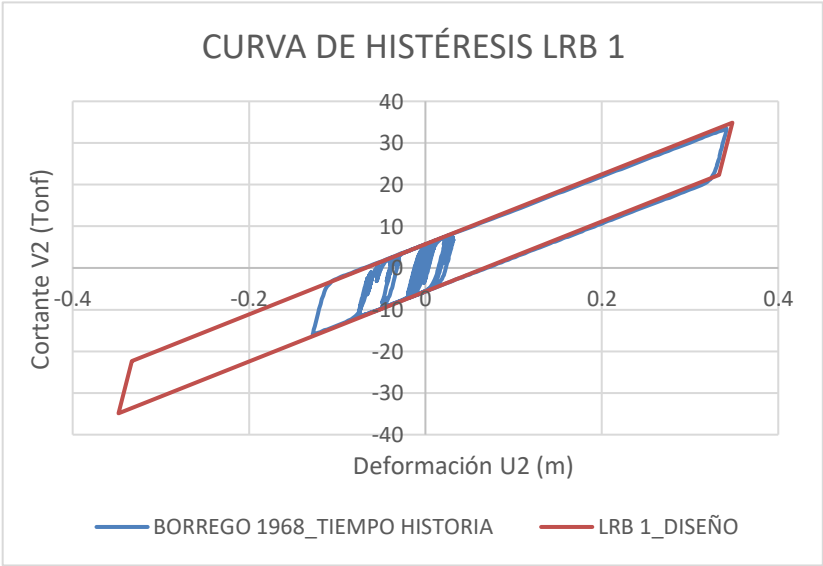
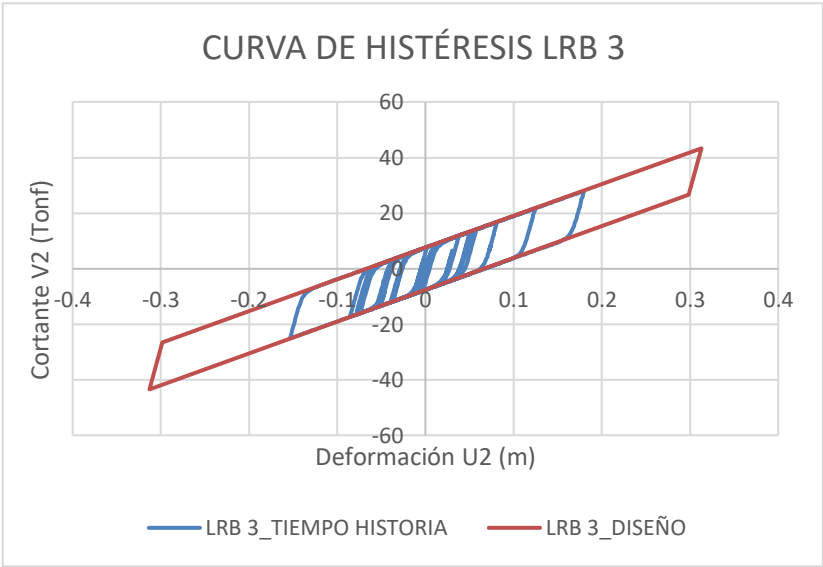
Continuación figura 29.



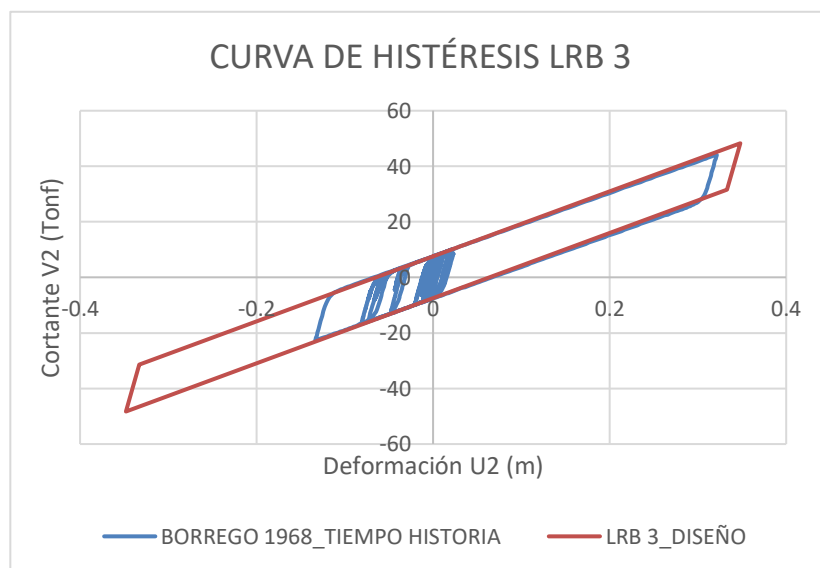
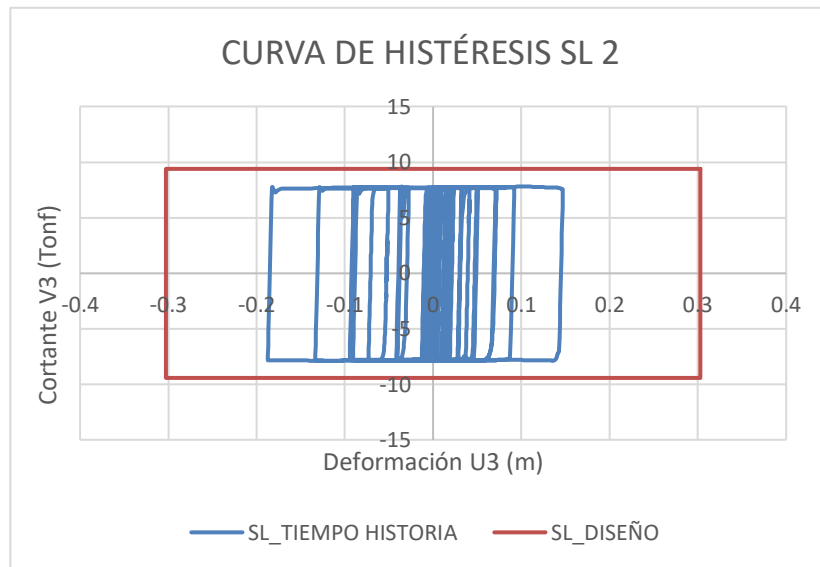
Continuación figura 29.



Continuación figura 30.



Continuación figura 31.



Fuente: elaboración propia, realizada con el programa ETABS 18.

Se observa que en las gráficas coinciden, esto significa que los valores calculados en el análisis no lineal y lineal son correctos.

Asimismo, se observa que la gráfica del aislador elastomérico y el deslizador plano se encuentran dentro de la gráfica que representa el análisis inicial, por lo que se comprueba que los cálculos son los correctos.

Para el registro sísmico según la tabla XXXV, presentó el siguiente comportamiento:

5.4.2.2. Cálculo de deriva de piso

Los resultados de las derivas de piso con el espectro de sismo máximo considerado y el análisis tiempo historia, se describe a continuación:

Tabla XXXVI. Deriva de piso sismo IWATE EO

DESPLAZAMIENTOS		IWATE EO_U1	3.00 cm	
NIVEL	Límite	Ux	Δ	δ
		m	cm	/1000
Nivel 5	Máx.	0.19	0.29	0.97
Nivel 4	Máx.	0.19	0.42	1.40
Nivel 3	Máx.	0.19	0.58	1.92
Nivel 2	Máx.	0.18	0.73	2.45
Nivel 1	Máx.	0.17	0.97	3.25
AISLAMIENTO	Máx.	0.16	0.00	0.00
Base	Máx.	0.00	-	0.00

Fuente: elaboración propia.

Se observó que la deriva máxima se encuentra en el nivel 1 igual a 3.25/1000, por lo tanto, cumplió con los requerimientos de la norma. Se calculó

el desplazamiento del techo respecto a la base, lo cual genero un resultado de 3 cm.

5.4.2.3. Nivel de desempeño sísmico

Se determinó según, FEMA P-58-7 (2018) que para edificaciones que requirieran permanecer totalmente operativas, sometidas a un evento sísmico extremo que tiene un 2 % de probabilidad ser excedido en 50 años, las consecuencias de riesgo de accidentes deben ser nulas, los tiempos de inactivada de 72 horas como máximo, el costo de reparación menor a 2.5 % del costo inicial del edificio y no tener impacto de carbono en las reparaciones mínimas.

CONCLUSIONES

1. El hospital se clasifica en la categoría IV con un $K_d=1$, un factor de reducción de respuesta sísmica $R=2$, se analiza como un sistema de 2 grados de libertad, el periodo aislado es mayor a 3 veces el periodo de base fija, se incrementa el amortiguamiento y así reducir la demanda en la estructura según ASCE 7-16.
2. Para salvaguardar los elementos estructurales, no estructurales y de contenido se utiliza aislamiento sísmico para garantizar una funcionalidad continua en hospitales seguros.
3. Los hospitales diseñados con normas AGIES aceptan daño ante un sismo extremo, lo que significa que el desempeño sísmico estaría en prevención del colapso con un daño del 99 %, comparado con una edificación aislada sísmicamente con un desempeño sísmico totalmente operativo con 0 % de daño y costos mínimos de reparación después del evento sísmico según FEMA P-58-7.
4. El sistema de aislación reduce las aceleraciones, los desplazamientos y las fuerzas sísmicas de entrepiso, pero se tienen que evitar las fuerzas de tracción en la base y la rigidez excesiva en el sistema aislado, esto para lograr un mejor desempeño del edificio y el sistema de aislación se active al momento del sismo según ASCE 7-16.

RECOMENDACIONES

1. Controlar el periodo de la estructura fija, si el periodo es largo, se rigidiza, aumentando las dimensiones de los elementos estructurales, evitando que el periodo con base aislada sea mayor a 5 segundos.
2. Se sugiere que AGIES adopte la norma ASCE 7-16 para la incorporación de nuevas tecnologías en aislación sísmica, con el fin de mejorar el comportamiento de las estructuras.
3. Reducir la vulnerabilidad incorporando aislación sísmica para disminuir el riesgo de daño, con esto contribuir a que el hospital sea operativo después del terremoto.
4. Combinar los aisladores LRB con deslizadores de fricción para decrementar la rigidez del sistema de aislamiento, así también proteger los aisladores contra el fuego.

REFERENCIAS

1. AASHTO LRFD. (2017). *American Association of State Highway and Transportation Officials*. Texas, USA: AASHTO.
2. ACI 318-19. (2019). *Requisitos de reglamento para concreto estructural*. Michigan,USA: American Concrete Institute.
3. AGIES, NSE 1. (2020). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica*. Guatemala, Guatemala: AGIES.
4. AGIES, NSE 2. (2020). *Demandas estructurales y condiciones de sitio*. Guatemala, Guatemala: AGIES.
5. AGIES, NSE 3. (2020). *Diseño estructural de edificaciones*. Guatemala, Guatemala: AGIES.
6. AGIES, NSE 7.1. (2020). *Diseño de concreto reforzado*. Guatemala, Guatemala: AGIES.
7. ASCE/SEI 7-16. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and Other Structures*. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.
8. ASCE/SEI 7-16. (2016). *Seismic design requirements for nonstructural components, Minimum Design Loads and Associated Criteria for*

Buildings and Other Structures. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.

9. ASCE/SEI 7-16. (2016). *Seismic design requirements for seismically isolated structures, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.
10. ASCE/SEI 7-16. (2016). *Site specific ground motion procedures for seismic design, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.
11. BRIDGESTONE. (2015). *Seismic Isolation Bearing Product Line-up*. Tokyo, Japón: Bridgestone Corporation.
12. EUROCODE 8 EN-1998-1. (2004). *General rules, seismic actions and rules for buildings*. Berlín, Alemania: European Committee for Standardization.
13. FEMA P-58-7. (2018). *Building the Performance You Need*. Washington, USA: FEMA.
14. FEMA P-751. (2012). *NEHRP Recommended seismic provisions*. Washington, USA: FEMA.
15. McCormac , J. C., y Brown, R. H. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. México: Alfaomega Grupo Editor.

16. NCh 2745. (2013). *Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*. Santiago de Chile, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
17. Norma Chilena, NCh . (1996). *Diseño Sísmico de edificios*. Santiago de Chile, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
18. Norma Peruana E.020. (2016). *Cargas*. Lima. Perú: ININVI.
19. Norma Peruana E.030 . (2016). *Diseño Sismorresistente*. Lima, Perú: ININVI.
20. Sísmica, I. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. América Latina: Banco de desarrollo de América Latina.
21. UBC. (1997). *Division IV Earthquake regulations for seismic isolated structures*. California, USA: ICBO.