



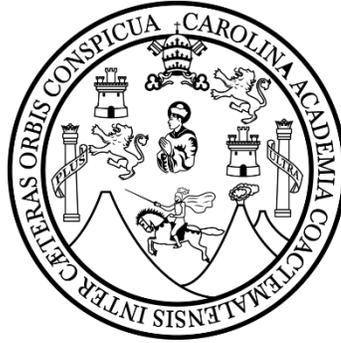
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en ciencias en estructuras

COMPARACIÓN FUNCIONAL Y ECONÓMICA ENTRE EL USO DE DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO Y DISIPADORES DE ENERGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE HOSPITALES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Ing. Antonio André Letona Samayoa
Asesorado por Dr. Héctor Monzón Despang

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN FUNCIONAL Y ECONÓMICA ENTRE EL USO DE DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO Y DISIPADORES DE ENERGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE HOSPITALES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

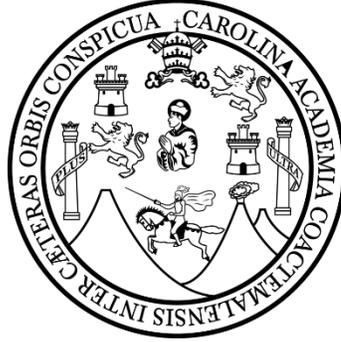
ING. ANTONIO ANDREÉ LETONA SAMAYOA
ASESORADO POR DR. HÉCTOR MONZÓN DESPANG

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Ing. 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. Kevinl Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez.

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Francisco Eduardo Arrecis
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:

COMPARACIÓN FUNCIONAL Y ECONÓMICA ENTRE EL USO DE DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO Y DISIPADORES DE ENERGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE HOSPITALES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 14 de julio de 2020.

Ing. Antonio Andreé Letona Samayoa

LNG.DECANATO.OI.005.2022

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: **COMPARACIÓN FUNCIONAL Y ECONÓMICA ENTRE EL USO DE DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO Y DISIPADORES DE ENERGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE HOSPITALES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por: **Antonio André Letona Samayoa**, 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, enero de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, enero de 2022

LNG.EEP.OI.005.2022

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:

**“COMPARACIÓN FUNCIONAL Y ECONÓMICA ENTRE EL USO DE
DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO Y DISIPADORES DE
ENERGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE HOSPITALES EN LA CIUDAD
DE GUATEMALA”**

presentado por **Antonio André Letona Samayoa** 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, 16 de noviembre del 2020

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

Por este medio informamos a usted, que se ha revisado el informe final en relación a la estructura presentada del siguiente trabajo de graduación titulado: **COMPARACION FUNCIONAL Y ECONOMICA, ENTRE EL USO DE DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SISMICO Y DISIPADORES DE ENERGIA PARA LA REHABILITACION DE HOSPITALES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA** del estudiante **Antonio André Letona Samayoa** quien se identifica con número de carné 2019 90336, del programa de Maestría en ciencias en Estructuras.

Con base en la evaluación realizada, y las cartas que anteceden del revisor 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 Revisor y toda la documentación administrativa de respaldo, para su aprobación correspondiente por parte de la Escuela de Estudios de Postgrado.

Atentamente

Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Infraestructura
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Héctor Monzón Despang
Ingeniero Civil, Ph. D.

Diagonal 6 10-01 Zona 10
Centro Gerencial Las Margaritas Torre 2
Nivel 10 Oficina 1001 A
Ciudad de Guatemala -- GUATEMALA
Tel. PBX (502) 2339 2824

Guatemala octubre de 2020

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 TESIS DE GRADUACIÓN del alumno: ANTONIO ANDREÉ LETONA SAMAYOA

Carné: 201990336
Alumno: ANTONIO ANDREÉ LETONA SAMAYOA
Maestría: ESTRUCTURAS

Título de la Investigación: COMPARACIÓN FUNCIONAL Y ECONÓMICA ENTRE EL USO DE DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO Y DISIPADORES DE ENERGÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE HOSPITALES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA.

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



Héctor Monzón Despang
Ingeniero Civil
Colegiado No. 932

ACTO QUE DEDICO A:

Mi Dios

Porque todas las bendiciones en mi vida proceden de ti, Padre de amor. Reconozco que alejada de ti nada puedo hacer, tú eres mi fuerza, mi ayuda, mi guía, mi mejor amigo. Este y todos los logros en mi vida te los dedico, pues es solo gracias a ti que han sido posibles.

Mis padres

Porque son el instrumento que Dios usa para bendecir mi vida cada día. Esta meta alcanzada es para ustedes. Que el Señor los bendiga siempre, los amo.

Mis hermanas

Porque son una bendición en nuestro hogar. Comparto con ustedes mi alegría por este logro que el Señor me concede.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi Dios

¡Gracias Señor Jesús! Por estar a mi lado cada día, por amarme como soy y llenar mi vida de bendiciones. Gracias porque sólo con tu ayuda he podido lograr esta victoria. ¡Gracias!

Mis padres

Marco Antonio Letona y Brenda Carolina Samayoa. Gracias por todo su amor, su paciencia, su completo apoyo para llegar a esta meta. Son una gran bendición en mi vida. Los amo, muchas gracias.

Mis hermanos

Marco Antonio, María José y José Antonio gracias por animarme para seguir adelante.

Mi asesor

Dr. Héctor Monzón. Por su ayuda para elaborar este trabajo de graduación. Que Dios los bendiga.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XIII
OBJETIVOS	XV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1. Sismología	1
1.1.1. Ondas sísmicas	1
1.1.2. Magnitud e intensidad de los sismos	6
1.1.2.1. Intensidad	6
1.1.2.2. Magnitud	8
1.2. Estructuras sismorresistentes	8
1.2.1. Comportamiento sísmico de las estructuras	9
1.2.2. Períodos de vibración de las edificaciones	11
1.2.3. Efecto del amortiguamiento en la respuesta de las edificaciones	12
1.2.4. Espectros de respuesta y de diseño	13
1.2.5. Desplazamientos y derivas horizontales	14
1.3. Sistemas de protección sísmica	14
1.3.1. Sistemas pasivos	15
1.3.2. Sistemas activos	16
1.3.3. Sistemas híbridos	17

1.3.4.	Sistemas semiactivos	17
1.3.5.	Eficiencia de la aislación sísmica de base	17
1.3.6.	Tipos de aisladores sísmicos de base	18
1.3.7.	Disipadores de energía	19
1.3.8.	Aspectos arquitectónicos y estructurales	20
2.	METODOLOGÍA DE TRABAJO	21
2.1.	Consideraciones de diseño	21
2.1.1.	Diseño de un sistema de aislación sísmica	21
2.1.1.1	Tipos de aisladores sísmicos	21
2.1.2.	Diseño empleando aisladores elastoméricos	24
2.1.3.	Diseño de un sistema de disipación de energía	25
2.1.3.1	Tipos de disipadores de energía	25
2.1.4.	Diseño empleando amortiguadores viscosos	29
2.1.5.	Consideraciones técnicas	30
2.1.5.1	Sistema de aislación sísmica	30
2.1.5.2	Amortiguadores de fluido viscoso	38
2.1.6.	Consideraciones económicas	45
2.1.7.	Selección del método de análisis	49
2.1.8.	Selección de la herramienta de diseño	50
2.2.	Criterios de análisis	51
2.2.1.	Marco de referencia	51
2.2.2.	Clasificación de las estructuras y factores de seguridad	52
2.2.3.	Clasificación del sitio	54
2.2.4.	Clasificación de la sismicidad del lugar	55
2.2.5.	Configuración del espectro de diseño	56

3.	ANÁLISIS Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO	59
3.1.	Especificación de parámetros sísmicos	59
3.2.	Descripción del edificio	60
3.3.	Diseño estructural del edificio	64
3.3.1.	Análisis sismorresistente del edificio existente	65
3.3.2.	Análisis del edificio con aisladores elastoméricos ..	67
3.3.3.	Análisis del edificio con disipadores de energía	73
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
4.1.	Análisis funcional	77
4.2.	Análisis económico	83
	CONCLUSIONES	95
	RECOMENDACIONES	97
	REFERENCIAS	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ejemplo onda sísmica	2
2.	Amplitud ondas sísmicas.....	3
3.	Registro sísmico.....	4
4.	Registro de aceleración.....	5
5.	Tipos de ondas sísmicas.....	5
6.	Periodo de vibración	10
7.	Modos de vibración	12
8.	Desplazamiento relativo.....	13
9.	Sistemas pasivos	16
10.	Comparación edificios con y sin aislamiento.....	18
11.	Comparación edificios con y sin disipadores de energía	19
12.	Tipos de sistema de protección sísmica.....	22
13.	Péndulo de fricción.....	23
14.	Aisladores elastoméricos	24
15.	Tipos de disipadores de energía	26
16.	Disipador sísmico de fricción.....	27
17.	Disipador sísmico de fluido viscoso	28
18.	Respuesta sísmica amortiguada	28
19.	Amortiguadores de base	30
20.	Ubicación de la interfaz de aislamiento	31
21.	Sección esquemática de un aislador.....	32
22.	Nakanoshima Festival Tower	34
23.	Ejemplos de cubiertas resistentes al fuego	35

24.	Torre de edificio aislada en el primer entreciso	36
25.	Torre del edificio totalmente aislada	36
26.	Edificio totalmente aislado	37
27.	Torre del edificio parcialmente aislada.....	37
28.	Configuraciones de arriostramiento	40
29.	Configuraciones de amortiguadores con refuerzo de palanca	41
30.	Arriostramiento diagonal	42
31.	Mega riostras	43
32.	Mapa de zonificación de Guatemala.....	56
33.	Espectro de diseño	60
34.	Planta nivel 1 y nivel 2	61
35.	Planta típica	62
36.	Sección transversal.....	63
37.	Sección de ubicación aisladores.....	68
38.	Planta de ubicación disipadores de energía	73
39.	Modelo 3D con disipadores de energía	74
40.	Cortante basal en dirección X.....	78
41.	Cortante basal en dirección Y	79
42.	Desplazamientos por nivel en dirección X	80
43.	Desplazamientos por nivel en dirección Y	80
44.	Deriva en dirección X.....	82
45.	Deriva en dirección Y.....	82
46.	Costo de inversión	84

TABLAS

I.	Intensidad de Mercalli Modificada (IMM)	7
II.	Nivel de sismo	53
III.	Factores K_d	53
IV.	Clasificación del tipo de suelo	55
V.	Factores F_a y F_v	58
VI.	Factores N_a y N_v	58
VII.	Tabla resumen parámetros espectro de diseño	59
VIII.	Consideraciones de cargas	64
IX.	Derivas últimas tolerables	65
X.	Proporciones de masas de participación modal estructura existente ..	65
XI.	Cortantes de estructura existente.....	66
XII.	Desplazamientos de estructura existente	66
XIII.	Relación de derivas de estructura existente	67
XIV.	Proporciones de masas de participación modal de estructura aislada .	71
XV.	Cortantes de estructura aislada.....	71
XVI.	Desplazamientos de estructura aislada.....	72
XVII.	Relación de derivas de estructura aislada	72
XVIII.	Proporciones de masas de participación modal de estructura aislada .	74
XIX.	Cortantes de estructura con disipadores de energía	75
XX.	Desplazamientos de estructura con disipadores de energía	75
XXI.	Relación de derivas de estructura con disipadores de energía	76
XXII.	Estado de daño - deformación de entrepiso	85
XXIII.	Costo de reparación	86
XXIV.	Costo de reparación en millones US\$	87
XXV.	Costos de inversión y mantenimiento de un sistema aislado	89

XXVI.	Costos de inversión y mantenimiento de un sistema de disipadores ...	90
XXVII.	Resumen y comparación de egresos sistema de protección sísmica ..	91
XXVIII.	Valor actual neto (VAN) en US\$ por sistema de protección sísmica....	92
XXIX.	Tasa interna de retorno (TIR) por sistema de protección sísmica.....	93

GLOSARIO

Elastómero	Materias artificiales o naturales que presentan alta elongación o elasticidad y amplia elasticidad frente a cargas antes de fracturarse o romperse.
Estructura portante	Conjunto de elementos estructurales que, además de sostenerse a sí mismos, constituyen el soporte y apoyo de otros sistemas más complejos.
Ingeniería de valor	Método sistemático de evaluación dirigido al análisis de materiales, sistemas y procesos, así como al equipamiento del edificio con el propósito de alcanzar las funciones requeridas en el programa al menor costo total.
Estudios de viabilidad	Son estudios técnico-económicos que se desarrollan para evaluar la pertinencia de ejecutar un proyecto determinado.
Interfaz de aislamiento	Límite imaginario entre la superestructura que está aislada y la cimentación que se mueve rígidamente con el suelo.
Lucro cesante	Consiste en la pérdida de la utilidad económica de un edificio como consecuencia del daño ocasionado por un terremoto y que no se habría producido si el movimiento telúrico no hubiera ocurrido.

Nuevos materiales	Son productos diseñados, desarrollados y contruidos a medida de requerimientos específicos con nuevas tecnologías, para responder a nuevas necesidades o a alguna aplicación tecnológica.
Protección civil	Entidades, instalaciones y acciones orientadas a proteger la integridad física de la población y su patrimonio, ante los efectos de los fenómenos naturales o tecnológicos que generan desastres.
Riesgo sísmico	Se llama riesgo sísmico a una medida que combina el “peligro sísmico”, con la “vulnerabilidad” y la posibilidad de que se produzcan en ella daños por movimientos sísmicos en un período determinado.
Niveles de desempeño	El nivel de desempeño describe un estado límite del daño desempeño directo. Representa una condición límite o tolerable establecida en función a los posibles daños estructurales y no estructurales, a las amenazas sobre la seguridad y respecto a la funcionalidad de la edificación.
Rehabilitación estructural	A diferencia de las reparaciones que se realizan a las estructuras existentes con daños ocasionados por algún evento, como terremotos o deterioro por el uso prolongado de la estructura, la Rehabilitación Estructural se refiere al reforzamiento de estructuras existentes en las que se requiere mejorar las condiciones de resistencia y rigidez a fin de prepararlas para las sollicitaciones de diseño y extenderles su ciclo de vida.

RESUMEN

Las normas de diseño sismorresistente para la construcción de edificaciones han evolucionado durante los últimos 50 años. En ese lapso se ha desarrollado el uso de tecnologías de protección sísmica para el resguardo de estructuras de todo tipo, en especial, de edificios y puentes.

El propósito de esta investigación es determinar el tipo de dispositivo de protección sísmica que resulte, económica y funcionalmente, más adecuado para utilizarse en la rehabilitación de hospitales nacionales construidos en la ciudad de Guatemala antes de la invención de estas tecnologías. A través del programa de simulación ETABS 18 e implementando el uso de aisladores elastoméricos y amortiguadores viscosos, se llevó a la estructura más allá de lo especificado por las normas de diseño sismorresistente de esa época, las que establecían la preservación de la vida humana a costa de permitir daños significativos en la misma.

Los resultados obtenidos mostraron que el edificio objeto de análisis, empleando cualquiera de estas dos tecnologías, es capaz de soportar sismos hasta de 5 % probabilidad de ser excedido en 50 años y, de esta forma, conseguir su total e ininterrumpido funcionamiento luego de un sismo bastante considerable, además de extender su vida útil más allá de lo inicialmente previsto.

En conclusión, los amortiguadores de fluido viscoso son los dispositivos de protección sísmica que se adaptan de mejor manera a las estructuras construidas en la ciudad de Guatemala con códigos antiguos, ya que además de ser efectivas en la reducción de la respuesta sísmica de la edificación, no requieren de mayores modificaciones, son de fácil instalación y, en comparación a los aisladores sísmicos, la inversión económica es menor.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala, los edificios clasificados como obras esenciales según la norma AGIES, entre los que se incluyen los hospitales nacionales construidos hace más de 30 años, son estructuras diseñadas y construidas con base en códigos no vigentes, por lo que no poseen elementos de protección sísmica que mejoren su capacidad de respuesta estructural.

Si bien estos edificios son estructuras que deben permanecer accesibles y en total funcionamiento luego de un sismo de magnitud considerable o después de que ocurre un desastre natural, es necesario anticipar un mecanismo de protección que procure salvaguardar la vida de los ocupantes, la inversión y la demanda adicional de atención médica como consecuencia de tal evento.

En consecuencia, resolver esta problemática requiere soluciones orientadas hacia la construcción de estructuras adoptando el uso de tecnologías de protección sísmica que mejoren su capacidad de respuesta ante un siniestro de esta naturaleza. Pero, además, que estos sistemas sean técnicamente factibles de construir y económicamente rentables. Se debe recordar que Guatemala es uno de los países más vulnerables del mundo ante la probable ocurrencia de un evento sísmico de considerable intensidad, ya que se ubica en el límite donde convergen tres placas tectónicas, lo cual ha sido objeto de reflexión y debate, pues se hace esencial construir estructuras que más allá de prevenir su colapso sean capaces de mantener su funcionalidad después del sismo.

Los códigos sísmicos han ido cambiando a lo largo de los años y estructuras que antes se consideraban sísmicamente diseñadas, en la actualidad puede que

no sea el caso. Por ello, es necesario ubicar este tipo de construcciones y realizarle una evaluación estructural a fin de diagnosticar deficiencias y de esta forma, proponer soluciones para la rehabilitación de estas, en especial, aquellas que luego de un siniestro deban permanecer en funcionamiento.

En los últimos años las tecnologías de protección sísmica han innovado sistemas eficientes que amortiguan las vibraciones y disipan la energía generada por los movimientos tectónicos, mejorando la seguridad estructural de las edificaciones y previendo su funcionalidad después del sismo. De hecho, en distintas normas y códigos internacionales se regula el uso de dispositivos de protección sísmica para el control de desplazamientos y derivas en distintos tipos de estructuras, mediante la instalación de dispositivos de aislamiento sísmico, disipación de energía o la combinación de ambos.

En tal sentido, se plantea el siguiente cuestionamiento principal:

¿Cuáles de los dispositivos de protección sísmica se adaptan de mejor forma a la rehabilitación de edificios hospitalarios?

Y, derivado del mismo, las siguientes interrogantes secundarias:

¿Cuál es la metodología para la evaluación del riesgo sísmico en las estructuras?

¿Qué normas o códigos internacionales se emplearán de referencia para efectuar el diseño de rehabilitación?

¿Cuál es la relación del daño estructural en comparación con el costo de rehabilitación?

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el tipo de dispositivo pasivo de protección sísmica que se adapte económica y funcionalmente de mejor forma a las necesidades de rehabilitación de hospitales nacionales en la ciudad de Guatemala, con el propósito de procurar su funcionalidad después del sismo.

Objetivos específicos

1. Evaluar el riesgo sísmico de un edificio hospitalario de concreto reforzado, en términos de la probabilidad de excedencia de la respuesta estructural, mediante el análisis del peligro sísmico y el modelamiento de sismos, empleando normas o códigos internacionales de referencia para efectuar el diseño de su rehabilitación.
2. Efectuar un análisis comparativo del comportamiento estructural de un edificio hospitalario utilizando dispositivos de aislamiento sísmico y disipadores de energía, con el fin de establecer el sistema de protección sísmica mejor se adapta y realizar una evaluación de los costos de adquisición, instalación y mantenimiento de tales dispositivos.
3. Dar a conocer el uso de esta tecnología en este país como un mecanismo para mejorar el comportamiento sismorresistente y la seguridad estructural de construcciones existentes, estructuras antiguas que no fueron construidas con bases sísmicas o para rescatar y/o preservar edificios y monumentos históricos.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Enormes pérdidas de vidas y de recursos económicos son las consecuencias de la devastación producida por los terremotos a través de la historia. De hecho, los modernos códigos de diseño sismorresistente incluyen el uso de sistemas de protección sísmica como una medida preventiva. En Guatemala, la norma AGIES aun no los incorpora y, tomando en cuenta que los hospitales nacionales fueron construidos hacen más de 30 años, se hace necesario incluir en su rehabilitación elementos de protección sísmica que mejoren su capacidad de respuesta estructural.

Por ello, el propósito de esta investigación trata de evaluar el daño sísmico de un edificio hospitalario de concreto reforzado construido en la década de los años 50 y compararlo mediante el modelado digital del mismo edificio utilizando dispositivos de aislamiento sísmico y disipadores de energía. La fuerza cortante en la base de estructura y el control de desplazamientos y derivas en distintos niveles del edificio, junto a un sencillo análisis económico complementario, demuestran que el uso, ya sea de aisladores sísmicos o de amortiguadores viscosos, además de ser bastante confiables, son aptos para la rehabilitación de edificios en este país.

INTRODUCCIÓN

Guatemala es uno de los países más vulnerables del mundo ante la probable ocurrencia de un evento sísmico de considerable intensidad. Esta permanente amenaza sísmica, que en cualquier momento podría impactar al territorio nacional, expone a un sinnúmero de edificaciones a sufrir daños estructurales, cuyas consecuencias podrían llegar a reducir la eficacia y la calidad de los servicios que prestan a la población. En el caso de los hospitales nacionales, a raíz de un evento sísmico, pueden llegar a limitar, dañar o rebasar su capacidad hospitalaria instalada, o incluso, de llegar a colapsar, acrecentando aún más la emergencia. También es de considerar que los hospitales nacionales ubicados en la ciudad capital se encuentran en las zonas sísmicas más críticas del país y estos fueron construidos con especificaciones que, en la actualidad, han quedado obsoletas, siendo este un factor influyente al momento que su infraestructura padezca fallas críticas durante un terremoto.

Las tecnologías de vanguardia en el campo de la protección sísmica ofrecen actualmente distintas soluciones prácticas y confiables, como el asilamiento sísmico y los disipadores de energía que, en relación con otras posibilidades tecnológicas de mayor desarrollo, resultan mucho más económicas. Aunque se torna indispensable mantener la continuidad del funcionamiento de los hospitales y de otras instalaciones vitales después de un terremoto, la práctica constructiva y las normativas de construcción en este país no consideran el uso de tecnologías de protección sísmica para el resguardo de las mismas, no obstante, los hospitales públicos representan una fuerte inversión para cualquier Estado, por lo que los costos de su reconstrucción y la recuperación de sus capacidades técnicas imponen una considerable carga económica.

El primer capítulo de esta investigación tiene como finalidad aportar fundamentos teóricos que consideren y promuevan el uso de esta tecnología en Guatemala, destacando que los dispositivos de protección sísmica pasivos proveen un mínimo de calidad estructural para resistir las fuerzas de un sismo considerable, sin que aparezcan daños que limiten su uso y funcionalidad, aumentando la tolerancia de las estructuras sobre los niveles de riesgo sísmico. Repasa los conceptos de sismología y del comportamiento de las estructuras sismorresistentes, destacando la eficiencia de la aislación sísmica de base como la medida técnicamente factible de construir y económicamente rentable para el resguardo de las estructuras ante un posible terremoto de considerable magnitud.

En el segundo capítulo se describe la metodología de trabajo, la cual responde a la aplicación consecuente de los conceptos y fundamentos tratados en el capítulo anterior. Reflexiona y describe los factores técnicos y económicos indispensables a toma en cuenta en el diseño de un sistema de aislación sísmica frente a los dispositivos de disipación de energía, con el objeto de evaluar ambas técnicas constructivas desde el punto de vista, tanto de la eficiencia dinámica, como de la viabilidad económica. Además, examina y detalla todos aquellos criterios de análisis que deben ser objeto de consideración previo a realizar el cálculo estructural del edificio y de aquellos que se deben cumplir conforme al método de análisis seleccionado y del software especializado para realizar dicho análisis estructural.

En el tercer capítulo se desarrolla el análisis sismorresistente y el cálculo estructural del edificio desde dos perspectivas distintas: en la primera, se utilizaron las especificaciones de AGIES- NSE (2018) para el diseño de edificios de base fija, con el objeto de emplear esta estructura así calculada como referencia; en la segunda, se aplicaron las especificaciones del código internacional ASCE 7-10 para la instalación de aislamiento sísmico de base y

disipadores de energía, a fin de comparar las fuerzas de corte en la base del edificio y los desplazamientos originados en los niveles de la superestructura. En ambos casos, se tomaron en consideración las características del edificio y las condiciones del suelo y de la acción sísmica a la que deberá someterse la estructura.

Finalmente, el cuarto capítulo presenta un análisis de resultados a partir del modelo de base fija, al que luego se le integrarán los dispositivos de aislamiento sísmico de base y posteriormente, los dispositivos de disipación de energía. De esta manera, el estudio examina el comportamiento dinámico del edificio y la viabilidad económica de ambas soluciones en la misma estructura, lo cual facilita la evaluación de cada sistema, según alcance este equilibrio.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Sismología

La sismología, como parte de la geofísica, aborda el estudio de los terremotos, de los aspectos relacionados con la recurrencia y de las causas por las cuales se originan los sismos. Investiga, además, el movimiento de la corteza terrestre, conocida como tectónica de placas, y la propagación sísmica de las ondas hasta la superficie del planeta.

Se basa en la observación y medición provocadas por las vibraciones de los movimientos sísmicos y otras perturbaciones naturales del terreno como, erupciones volcánicas, hundimientos, desprendimientos de rocas en las laderas de las montañas, entre otros, así como de las señales sísmicas generadas de forma artificial causadas por explosiones inducidas para la exploración de subsuelos, entre otras.

1.1.1. Ondas sísmicas

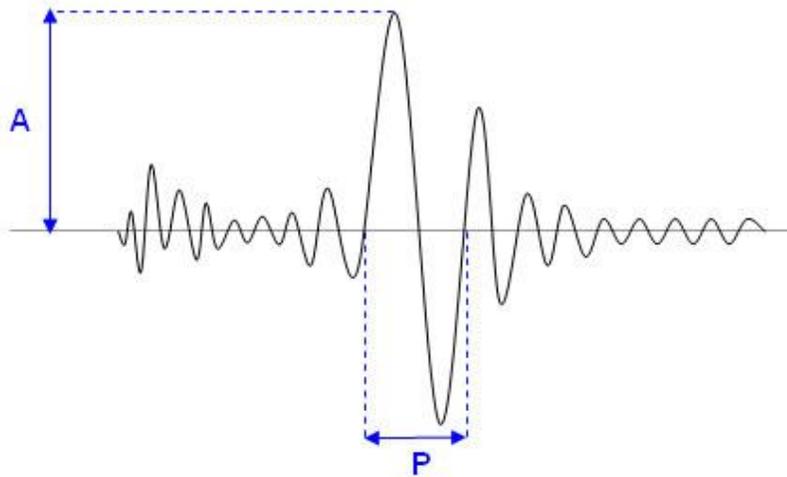
Los sismos se producen cuando las tensiones en el manto pétreo subyacente se acumulan y se liberan materiales bruscamente deformando o deslizando de improviso los estratos rocosos inmediatos y causan la fractura y el reacomodamiento de la corteza terrestre, lo cual deja escapar enormes cantidades de ondas de energía que provocan la vibración del suelo.

Generalmente, los movimientos sísmicos se originan entre la corteza profunda y el manto superior de la litósfera, desde donde se generan y propagan

las ondas sísmicas que viajan a través de un medio sólido y elástico de forma concéntrica y tridimensional hasta alcanzar la superficie, donde se vuelven bidimensionales y continúan dispersándose en todas direcciones.

Las ondas sísmicas se propagan según su amplitud, que es la distancia del pico más alto medido desde la línea central y, su período, el tiempo que la onda dura en viajar entre dos puntos de máxima amplitud. Casi siempre, las ondas que poseen mayores amplitudes tienen un período corto, mientras que las de período largo, amplitudes menores.

Figura 1. **Ejemplo onda sísmica**



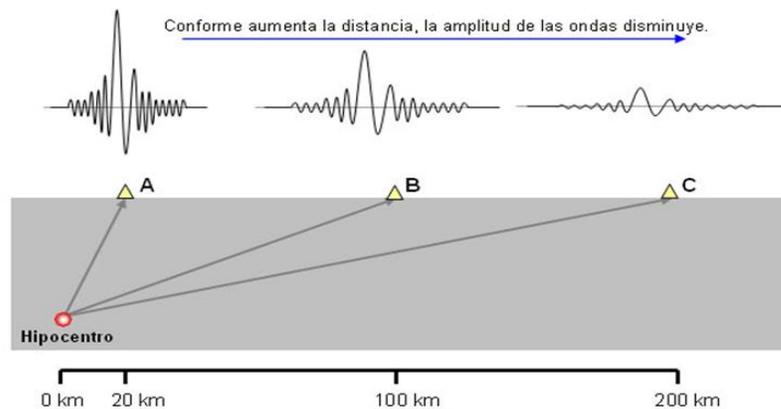
Fuente: Laboratorio de Ingeniería Sísmica. *Onda Sísmica*. Consulta 17 de abril de 2020.

Recuperado de <http://www.lis.ucr.ac.cr/8>

Por ello, las ondas sísmicas, al llegar a la superficie disminuyen su amplitud y disipan su energía conforme se alejan del epicentro al propagarse en todas direcciones. Es así como los terremotos se tornan más imperceptibles conforme

aumentan la distancia al hipocentro, ya que los períodos cada vez más largos tienen a predominar.

Figura 2. **Amplitud ondas sísmicas**

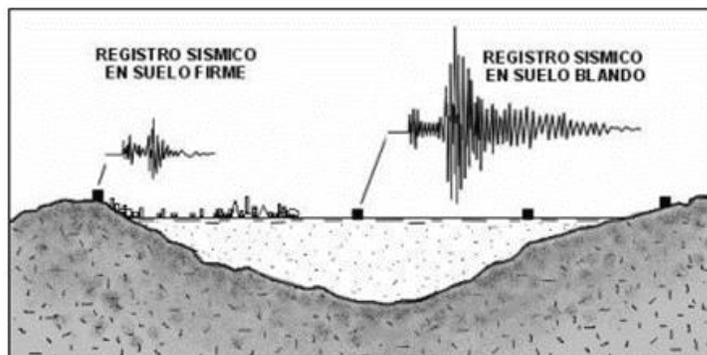


Fuente: Laboratorio de Ingeniería Sísmica. *Amplitud de Onda Sísmica*. Consulta 17 de abril de 2020. Recuperado de <http://www.lis.ucr.ac.cr/8>

La densidad y elasticidad de los mantos que las ondas sísmicas encuentran a su paso determinan su velocidad; viajan más rápido en aquellos materiales rígidos, es decir, cruzan más de prisa un estrato rocoso que una capa de lodo no consolidada. Conforme la onda avanza el material que atraviesa la amortigua y la sensación del movimiento sísmico disminuye.

Conforme las ondas sísmicas van alcanzando la superficie atraviesan capas menos consolidadas; el impacto de la lluvia y los procesos de erosión resultan como un amplificador de su amplitud, como ocurre con los suelos arenosos y/o arcillosos.

Figura 3. **Registro sísmico**



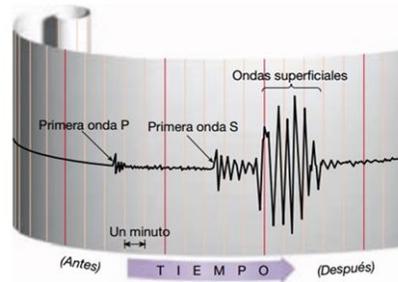
Fuente: Laboratorio de Ingeniería Sísmica. *Registro Sísmico*. Consulta 17 de abril de 2020.

Recuperado de <http://www.lis.ucr.ac.cr/8>

Las oscilaciones que produce un sismo se transmiten a los puntos vecinos, los cuales también empiezan a oscilar. De hecho, un sismo produce dos tipos de ondas: internas, que viajan a grandes profundidades entre el manto superior y las capas profundas de la litósfera y las superficiales, que lo hacen a través de los estratos externos y poco profundos de la corteza terrestre.

La clasificación de las ondas internas integra las ondas P (Push-pull) o de compresión y las S (Shear) o de corte. Como los sismógrafos registran primero las ondas P por ser más veloces (entre 1.1 y 8.0 km/s según el material que atraviesan), se les llaman primarias. Al ser más lentas y registrarlas los sismógrafos después, a las ondas S se les denomina secundarias, pues sus velocidades giran alrededor de un 58 % de las P. Las ondas P, llamadas longitudinales, comprimen y dilatan los estratos superficiales viajan paralelamente junto a las ondas sísmicas; las S, o transversales, desplazan perpendicularmente el suelo cortándolo de arriba hacia abajo. Usualmente, con una mayor amplitud, la sensación de la onda S es más fuerte.

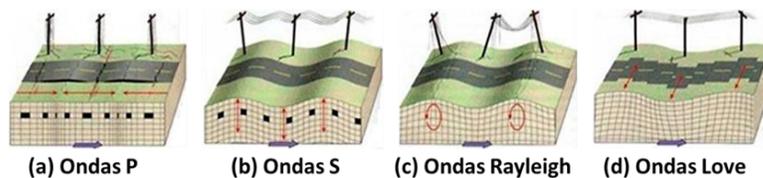
Figura 4. **Registro de aceleración**



Fuente: Tarbuck y Frederick (2005). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*.

Por su parte, las ondas superficiales viajan de forma bidimensional y perpendicular al movimiento de propagación de estas, con una mínima penetración en los estratos subyacentes. Se mueven a 90 % de la velocidad de las S, con amplitudes mayores a las P, pero con períodos más prolongados. Se dividen en dos tipos: Rayleigh y Love. Las primeras viajan entre 1 y 4 km/s y surgen al interactuar las ondas P con la componente vertical de las S. Las segundas se originan por la superposición de dos o más ondas P con la componente horizontal de las S, creando patrones de ondas con mayores amplitudes que vuelven a ser las mismas de antes tras alcanzar su punto más alto. Son más veloces que las Rayleigh, entre 1 y 4.5 km/s.

Figura 5. **Tipos de ondas sísmicas**



Fuente: Tarbuck y Frederick (2005). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*.

Las ondas superficiales son más destructivas y las culpables de las catástrofes sísmicas. (a) Ondas P. Nótese los cables de alta tensión rotos debido a la tensión y el pavimento aplastado y fracturado por la compresión. (b) Ondas S. Puede distinguirse el vaivén ondulatorio del terreno conforme las ondas sísmicas avanzan. (c) Ondas Rayleigh. Obsérvese los cables de alta tensión rotos por el vaivén ondulatorio del terreno y cómo el movimiento elíptico de las ondas hace emerger segmentos de la superficie terrestre y hunde otros. (d) Ondas Love. La distorsión en los cables de alta tensión provocada por los cortes transversales que producen estas ondas en la superficie terrestre.

1.1.2. Magnitud e intensidad de los sismos

A través de los años, el conocimiento y la comprensión sobre los terremotos fue avanzando. Las rudimentarias investigaciones que empíricamente describían sus consecuencias dieron paso a los primeros registros objetivos y luego a las primeras escalas que medían vagamente lo catastrófico que resultaban. Los sismos, en la actualidad, son evaluados según su intensidad y magnitud, es decir, según la destrucción ocasionada y por la cantidad de energía liberada.

1.1.2.1. Intensidad

Es un parámetro subjetivo de medida de daño y de devastación ocasionada por un sismo en un área limitada a las estructuras y a las personas y de los efectos negativos que produce sobre el suelo. Se basa en la percepción humana y en la observación del daño ocasionado, sin usar instrumentos de medición, por lo que sus resultados pueden variar de un lugar a otro en una misma región.

Existen más de 50 escalas que miden la intensidad, pero las más conocida y utilizada en este continente es la escala Mercalli modificada. Consta de doce grados de severidad, desde muy débil hasta catastrófico.

Tabla I. **Intensidad de Mercalli Modificada (IMM)**

Grado	Descripción
I. Imperceptible por humanos	Imperceptible para las personas. Solo puede ser detectado por los sismógrafos.
II. Muy leve	Sentido solo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios u otra situación favorable.
III. Leve	Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Objetos colgados oscilan de un lado a otro. Muchos no lo reconocen como sismo. Sensación semejante al paso de un camión pequeño.
IV. Moderado	Sentido por la mayoría de las personas dentro de los edificios y por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche, algunas personas pueden despertarse. Platos, puertas y ventanas vibran. Las paredes y amazonas de madera crujen. Los automóviles detenidos se balancean. Sensación semejante al paso de un camión grande.
V. Un poco fuerte	Sacudida sentida por todo el país o zona. Algunos muebles pesados cambian de sitio y provoca daños leves, en especial en viviendas de material ligero.
VI - Fuerte.	Sacudida sentida por todo el país o zona. Algunos muebles pesados cambian de sitio y provoca daños leves, en especial en viviendas de material ligero.
VII - Muy fuerte.	Ponerse de pie es difícil. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables en estructuras pobremente construidas. Mampostería dañada. Perceptible por personas en vehículos en movimiento.
VIII - Destructivo.	Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles derrumbes. Fuertes daños en estructuras pobremente construidas. Mampostería seriamente dañada o destruida. Muebles completamente sacados de lugar.
IX - Muy destructivo.	Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Grandes daños en importantes edificios, con derrumbes parciales. Edificios desplazados fuera de las bases.
X - Desastroso.	Algunas estructuras de madera bien construidas quedan destruidas. La mayoría de las estructuras de mampostería y de marco quedan destruidas con sus bases. Vías ferroviarias dobladas.
XI - Muy desastroso.	Pocas estructuras de mampostería, si las hubiera, permanecen en pie. Puentes destruidos. Vías ferroviarias curvadas en gran medida.
XII - Catastrófico.	Destrucción total con pocos supervivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados. Imposibilidad de mantenerse en pie.

Fuente: Laboratorio de Ingeniería Sísmica. *Intensidad de Mercalli Modificada*. Consulta 17 de abril de 2020. Recuperado de <http://www.lis.ucr.ac.cr/8>

1.1.2.2. Magnitud

En 1935, el sismólogo estadounidense Charles Richter, estableció como parámetro de medición de un sismo la cantidad de energía liberada, el cual revolucionó la forma de medir los terremotos. A diferencia de la intensidad, que asigna un valor según la devastación ocasionada en un área limitada, la magnitud tiene un valor único en cualquier parte del mundo donde se calcule. La escala sismológica de Richter es la más conocida mundialmente, pero ha sido remplazada por otras escalas más precisas y exactas. Un inconveniente de esta es que cuando se emplea para medir sismos muy grandes, el valor de magnitud ya no permite describir satisfactoriamente el tamaño del sismo. A diferencia de esta, la magnitud del momento (M_w) no se satura y permite describir eficazmente el tamaño de los sismos, sean muy grandes o pequeños. (Tarbuck y Lutgens, 2005).

1.2. Estructuras sismorresistentes

La sismorresistencia es la capacidad de las estructuras de resistir los efectos causados por sismos recurrentes o uno de considerable magnitud, aunque las mismas sufran daños. Pretende atenuar el comportamiento errático de una edificación con el fin de evitar su colapso y salvaguardar las vidas de sus ocupantes.

Aunque las estructuras sean diseñadas y construidas en base a las recomendaciones de las normativas y códigos de diseño no es posible garantizar que una estructura sea totalmente sismorresistente, pues siempre existe la posibilidad de que ocurra un terremoto de mayor magnitud a lo previsto y pueda provocar un daño estructural irreparable, o incluso, el derrumbe de esta.

La sismorresistencia considera la ductilidad de los materiales para deformarse inelásticamente y concentra el daño de la estructura en regiones específicas llamadas articulaciones plásticas, capaces de admitir amplias deformaciones inelásticas que absorben y disipan la energía durante el sismo. Esto le permite a la edificación mantener su integridad estructural y su capacidad de resistencia. Las estructuras dúctiles son capaces de soportar múltiples ciclos de carga sísmica, al aprovechar las articulaciones plásticas para acomodar las deformaciones que se producen. (Chopra, 2014)

Para aquellas obras clasificadas como estructuras esenciales, importantes y/o estratégicas, prevenir su propio colapso resulta insuficiente, ya que además de proteger los contenidos, resulta imperativo que la edificación continúe funcionando ininterrumpidamente durante la ocurrencia de un siniestro y posterior al mismo, especialmente cuando se trata de centros hospitalarios, escuelas, museos, edificios públicos, data-centers, construcciones industriales, puentes, puertos y aeropuertos, entre otros. (Tecnológico Corporación de Desarrollo, 2012)

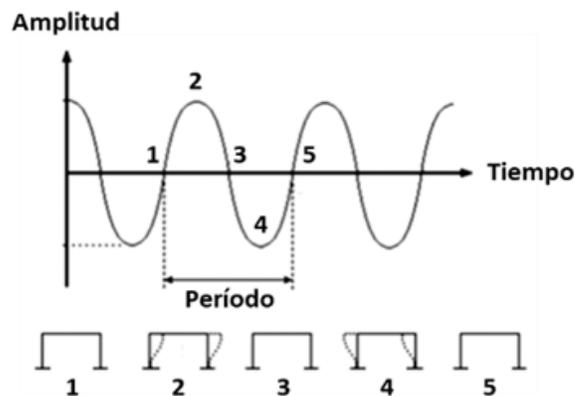
1.2.1. Comportamiento sísmico de las estructuras

Durante un sismo, la cimentación transmite la vibración del suelo a la estructura. El edificio pasa bruscamente del estado de reposo a resistir un grotesco movimiento ondulatorio que genera cargas dinámicas actuando en todas direcciones, esfuerzos cíclicos de tensión/compresión y cambios de dirección de los esfuerzos de corte/flexión.

En una estructura totalmente rígida la vibración de la super y subestructura serían iguales, sin embargo, las aceleraciones que el suelo transmite a la cimentación provocan que el período de vibración de la base varíe al de la

estructura. Toda estructura durante un sismo oscila de lado a lado con un período de vibración característico.

Figura 6. **Periodo de vibración**



Fuente: Oviedo y Duque (2007). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*.

El período de vibración se refiere al tiempo que la edificación requiere para completar una oscilación completa. Cuanto mayor la duración del período, mayor daño se induce a la estructura, ya que se producen mayores desplazamientos. El período fundamental, aquel de máxima duración, se emplea en el diseño para anticipar el comportamiento estructural del edificio, de forma que resulte lo más segura y económica posible.

La aceleración es un indicador que precisa cualquier alteración en la velocidad horizontal del suelo; es una medida que se puede relacionar con el daño que el sismo provoca en las edificaciones. Por ello, el diseño de las edificaciones requiere que su estructura soporte una aceleración máxima, la cual permite estimar la fuerza de reacción en la base del edificio

Cuando el suelo tiende a vibrar más lentamente que la estructura, la aceleración máxima del edificio y la del suelo se asemejan. Cuando el período

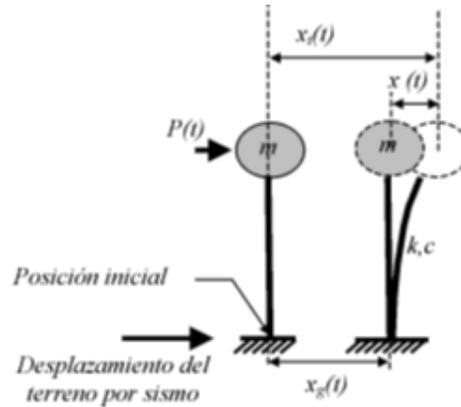
de vibración del suelo y del edificio son iguales o cercanos, la estructura amplifica el movimiento del suelo, las fuerzas sísmicas se incrementan y la oscilación del edificio se vuelve peligrosa. Es decir, que las aceleraciones en la edificación disminuyen en función del aumento de su periodo. (Oviedo y Duque, 2007)

1.2.2. Períodos de vibración de las edificaciones

La respuesta dinámica de una edificación durante un sismo obedece a la relación entre los períodos de vibración del suelo de apoyo y el propio de la estructura. Si ambos tienden o son iguales, el edificio entra en resonancia, es decir, la vibración del edificio aumenta de forma progresiva conforme la aceleración del suelo se va amplificando gradualmente en la edificación, según las ondas sísmicas atraviesan los estratos superficiales. Cíclicamente, los elementos estructurales son sometidos a esfuerzos de corte y flexión que constantemente cambian de dirección, ocasionando incrementos en los esfuerzos de tensión y compresión, lo cual provoca mayores deformaciones debido a estos desplazamientos.

Generalmente, los edificios altos se mueven más lentamente ya que experimentan oscilaciones de mayor período que las construcciones bajas. Cuando se presentan oscilaciones de alta frecuencia y períodos cortos el sismo es más nocivo para las estructuras bajas y rígidas. Con períodos más largos y de menor frecuencia, las estructuras altas y flexibles corren mayor riesgo. En cuanto al suelo, los blandos tienden a reducir el período y amplificar las bajas frecuencias del sismo. (Caicedo, 2014)

Figura 7. **Modos de vibración**



Fuente: Oviedo y Duque (2007). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*.

1.2.3. Efecto del amortiguamiento en la respuesta de las edificaciones

El tiempo de oscilación de las estructuras sometidas a las fuerzas variables impuestas por un sismo depende de sus propiedades de amortiguamiento, es decir, de su capacidad para reducir los desplazamientos en la edificación. La energía se disipa mediante la fricción inelástica de articulaciones plásticas que se ubican en secciones preestablecidas de la edificación, cuando los materiales que conforman los elementos estructurales son esforzados cíclicamente; la tipología estructural y el medio circunvecino absorben otra mínima parte.

El amortiguamiento procura mantener la edificación dentro del rango elástico; a medida que la estructura aumenta su período de vibración, cada vez más la pérdida de su rigidez se intensifica hasta el punto de alcanzar el rango inelástico, en el cual, las deformaciones se vuelven más críticas conforme mayor sea el tiempo que dure la carga sísmica. Cuando un sismo es muy severo, una

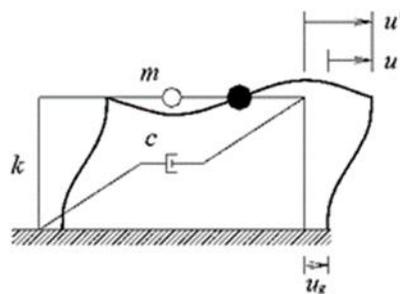
inminente falla en el concreto reforzado podría provocar que un edificio experimente un daño estructural irreversible, e incluso, irreparable. (Clark, Aiken, Tajirian, Kasai, y Ko, 1999)

1.2.4. Espectros de respuesta y de diseño

El comportamiento de un edificio se refiere al modo en que la estructura responde a la aceleración inducida por un sismo, es decir, a los cambios ocasionados en su configuración por los efectos que las vibraciones del suelo causan al perturbar su estado de equilibrio. Incluye el análisis de las fuerzas, aceleraciones, velocidades y desplazamientos que resultan de las deformaciones que surgen en la estructura, al reducir la misma a un sistema de equilibrio dinámico.

Las ondas sísmicas atraviesan los estratos superficiales de modo continuo, ininterrumpido y compacto, ocasionando a cada instante variaciones de la aceleración del sismo en la cimentación que modifican el comportamiento de la estructura. La perturbación transportada, de distinta duración, origina un desplazamiento de la masa de la edificación provocado por el corrimiento del suelo (u_g) y su correspondiente lugar de asentamiento (u).

Figura 8. **Desplazamiento relativo**



Fuente: Chopra (2014). *Dinámica de estructuras*.

Los espectros sísmicos de respuesta se generan graficando sobre un sistema de coordenadas los máximos absolutos de las respuestas, ya sea, con respecto de las frecuencias – tiempo o aceleración del suelo – período de vibración del edificio. (Bazan y Meli, 2010)

1.2.5. Desplazamientos y derivas horizontales

Los componentes no estructurales son altamente vulnerables durante sismos de gran intensidad. Por ello, los límites de desplazamiento horizontal juegan un papel importante entre los desplazamientos laterales que las estructuras pueden llegar a desarrollar y los desplazamientos que los componentes no estructurales pueden llegar a tolerar, mientras la estructura vibra en su rango elástico. Cuando estos elementos permanecen conectados a la edificación, la rigidez estructural aumenta mientras el período de vibración disminuye; en consecuencia, las cargas sísmicas estimadas en el diseño serán menores a las que realmente la estructura deberá soportar. (Bazan y Meli, 2010)

Para limitar los desplazamientos de la edificación, a efecto de reducir el daño provocado por un sismo y mejorar su desempeño, actualmente el uso de sistemas de aislación y *dampers* o disipadores se ha convertido en una práctica usual a nivel mundial.

1.3. Sistemas de protección sísmica

La protección del entorno edificado en las ciudades y regiones alrededor del mundo propensas a terremotos implica no solo el diseño y la construcción óptimos de nuevas obras, sino también la mejora y rehabilitación de las estructuras e infraestructuras existentes. Esta última es una tarea laboriosa y costosa, que solo se puede lograr paulatinamente. Sin embargo, la inestimable

pérdida de vidas y los incalculables costos después de un gran terremoto en un área metropolitana brindan razones suficientes para su consideración. (Martelli, 2009)

En la actualidad, los incipientes métodos de protección sísmica han avanzado a sistemas totalmente automatizados, de hecho, pueden utilizarse en cualquier estructura. (Brebbia, 2007)

La clasificación de los sistemas de protección sísmica para edificios integra cuatro categorías principales.

1.3.1. Sistemas pasivos

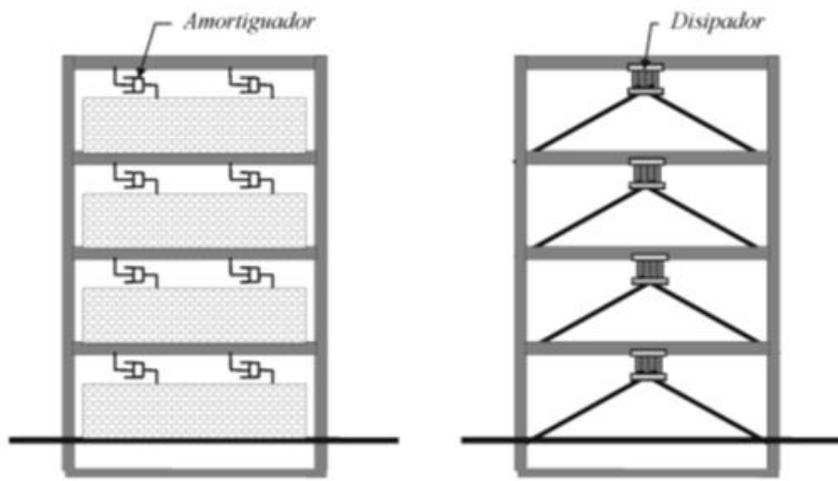
Estos dispositivos mejoran significativamente el rendimiento estructural del edificio mediante la atenuación de la amplitud de las ondas sísmicas. Son desarrollados por medios únicamente mecánicos y algunos, como los *dampers* o disipadores y los aisladores, son sumamente sencillos; otros, como los amortiguadores de masa sincronizada, funcionan con contrapesos de forma similar a un péndulo. (Martelli, 2009).

Son los más utilizados en países como Estados Unidos, China, Rusia e Italia, especialmente en Japón, donde cerca de cinco mil estructuras han sido protegidas mediante estos dispositivos. El sistema más desarrollado es el de aislación sísmica ya que conforme a los años su tecnología sigue avanzando, al igual que sus especificaciones y aplicaciones de diseño. (Saiful, Jameel, y Zamin, 2011)

Son clasificados en cuatro diferentes categorías: de fricción, viscoelástico, histeréticos y de fluidos. Se instalan por lo general en riostras diagonales como

complemento al sistema de aislación de base o dentro de los pórticos del edificio, entre la plataforma de aislamiento y la fundación.

Figura 9. **Sistemas pasivos**



Fuente: Oviedo y Duque (2007). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones.*

Entre estos, los disipadores metálicos como riostras, *dampers* de barras y planchas flexo-deformables, resaltan mundialmente por ser económicos, duraderos y prácticos de instalar. Las variantes de tipo histerético como las riostras flexionantes, cuyas condiciones de anclaje limitan su pandeo, se vuelven muy útiles en los casos de rehabilitación de estructuras. (Tecnológico Corporación de Desarrollo, 2012)

1.3.2. **Sistemas activos**

Los sistemas más comunes son los osciladores de masa sincronizada y los sistemas de arriostramiento activos; estos últimos, los más efectivos para el

control de vibraciones por su sistema de sensores de detección en tiempo real. Existen también los sistemas de tendones activos, pero aún se encuentran a nivel experimental. (Tecnológico Corporación de Desarrollo, 2012)

1.3.3. Sistemas híbridos

Al combinar sistemas de protección pasivos y activos se mejora la confiabilidad y la eficiencia de la estructura, pues se busca complementar con los primeros las carencias de los segundos. Los osciladores híbridos son las más comunes, al igual que los aisladores activos. (Spencer y Soong, 1999)

1.3.4. Sistemas semiactivos

Una de sus principales ventajas de estos sistemas es que no requieren grandes suministros de energía, reduciendo la respuesta estructural sin aplicar fuerzas de control. (Spizzuoco, Occhiuzzi, y Serino, 2004)

1.3.5. Eficiencia de la aislación sísmica de base

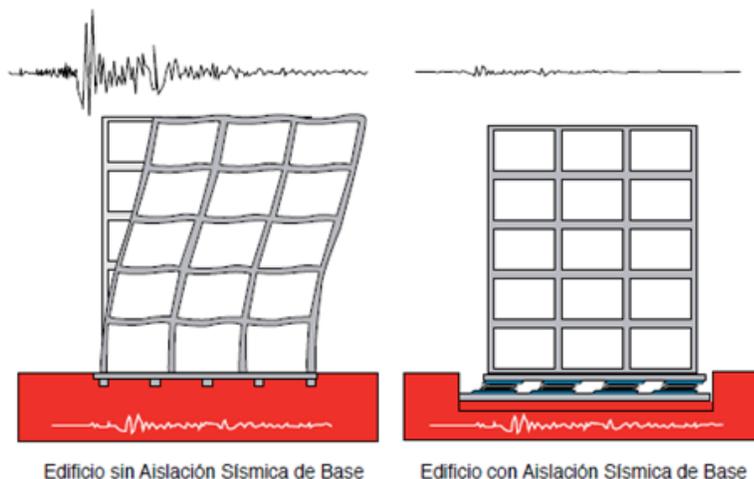
Se le denomina aislamiento sísmico a la técnica de diseño de lograr aislar la edificación junto a su cimentación del suelo mediante el acoplamiento de elementos flexibles. La ductilidad de sus elementos, durante sismos de gran intensidad, mantiene al edificio dentro de los límites de su comportamiento elástico absorbiendo una parte significativa de la fuerza sísmica y evitando la atenuación de su resistencia, reduciendo la fatiga de sus elementos y minimizando el potencial daño estructural. (Genatios y Lafuente, 2006)

El uso de aisladores tiene por objeto desarticular la edificación del movimiento del suelo mediante puntos de conexión flexibles que se colocan para

desacoplarla de su cimentación, aunque también son utilizados comúnmente por encima de los sótanos (subestructura).

Estos sistemas pueden ser utilizados indistintamente en edificaciones ya existentes que requieran de una rehabilitación o en aquellas que se planean construir. Su uso pretende minimizar los esfuerzos de la estructura, pero principalmente, procurando reforzar y proteger aquellas edificaciones consideradas esenciales, entre ellas, los hospitales.

Figura 10. **Comparación edificios con y sin aislamiento**



Fuente: Tecnológico Corporación de Desarrollo. *Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*. Consultado el 23 de abril de 2020.

1.3.6. Tipos de aisladores sísmicos de base

Estos son la técnica constructiva más efectiva en edificaciones rígidas y/o con pocos niveles. Los deslizadores disipan la energía por el rozamiento de dos planos horizontales que se deslizan uno sobre el otro, mientras que aisladores elastoméricos, los más utilizados y desarrollados actualmente, lo hacen mediante

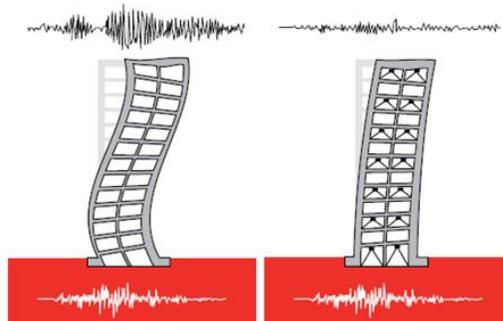
la utilización de un elastómero natural de caucho o de neopreno con fibras laminadas de acero.

1.3.7. Disipadores de energía

A diferencia de los anteriores, los disipadores no son capaces de absorber la energía transferida del suelo hacia la estructura. Generalmente, son adosados a la misma para restringir su movimiento ante un evento telúrico, vientos fuertes u otros fenómenos naturales, con lo cual se evita el desgaste, reduce daños y previene la pérdida de elementos constructivos. Entre los más avanzados para absorber las vibraciones en la superestructura, se encuentran los contrapesos colgantes, también denominados amortiguadores de masa.

Ambos sistemas (aislación/disipación) en la actualidad son ampliamente utilizados alrededor del mundo para proteger y/o reforzar todo tipo de estructuras, en especial, aquellas que, por ser esenciales, como los hospitales, requieren su uso ininterrumpido durante y después de un siniestro.

Figura 11. Comparación edificios con y sin disipadores de energía



Fuente: Tecnológico Corporación de Desarrollo. *Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*. Consultado el 23 de abril de 2020.

1.3.8. Aspectos arquitectónicos y estructurales

El diseño sismorresistente de un edificio debe evaluarse desde la perspectiva económica, así como su eficiencia dinámica utilizando aisladores, disipadores o su combinación. Para lograr alcanzar este equilibrio es necesario realizar el análisis del comportamiento dinámico del edificio con un diseño tradicional, es decir de base fija, para luego compararlo contra un diseño utilizando disipadores de energía y aislamiento sísmico de base.

Decidir la técnica constructiva que se adecúa de la mejor manera debe considerar la importancia del edificio, aunque, por tratarse de un hospital, el costo para su rehabilitación no se escatimaría. Un edificio sísmicamente protegido, aunque tenga un costo mucho más elevado, debe de ser sísmicamente protegido. Por lo cual la diferencia económica en ambos casos no siempre será el marco para la toma de decisiones.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. Consideraciones de diseño

Antes de diseñar un edificio, ya sea integrando a la estructura dispositivos de aislación sísmica de base o disipadores de energía, debe tenerse en cuenta que, además de alcanzar un equilibrio razonable entre la eficiencia dinámica y el costo económico de cada solución, la que se adopte también debe ser factible de construirse. En ese sentido, resulta conveniente tomar en cuenta la descripción de los siguientes aspectos:

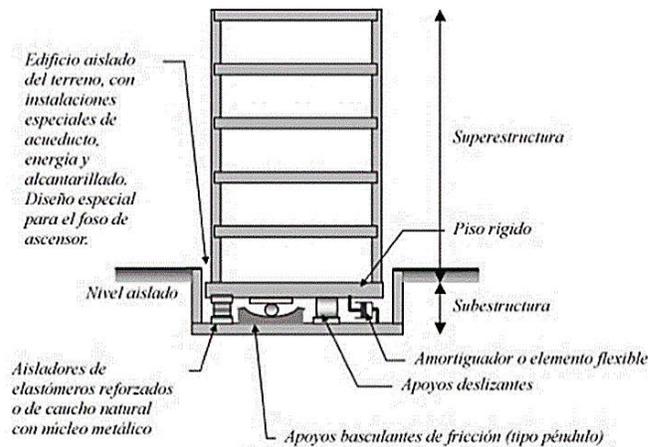
2.1.1. Diseño de un sistema de aislación sísmica

La forma más eficiente para proteger sísmicamente estructuras relativamente bajas y/o rígidas, ocurre aislando su base.

2.1.1.1. Tipos de aisladores sísmicos

Aunque existe una gran diversidad de mecanismos de aislación sísmica, su uso se reduce básicamente a dos tipos: los apoyos deslizantes o de fricción, que mediante una fuerza con sentido opuesto al movimiento (rozamiento), disipan la energía a través de sus superficies de deslizamiento y, los aisladores elastoméricos, los más desarrollados y utilizados actualmente, que poseen una flexibilidad lateral extraordinaria y una considerable rigidez vertical.

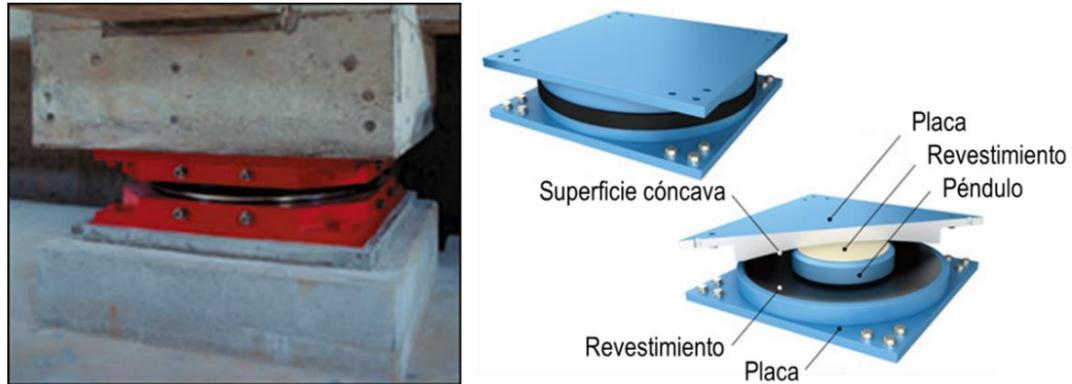
Figura 12. Tipos de sistema de protección sísmica



Fuente: Oviedo y Duque (2007). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones.*

Los apoyos de fricción soportan la estructura mediante dos placas deslizantes que la separan de la cimentación. Para regresar la estructura nuevamente a su ubicación, generalmente se utilizan mecanismos hidráulicos, los cuales demandan un mayor cuidado en su operación y mantenimiento. Se distinguen dos clases: apoyos planos, los más simples, que carecen de fuerza de restauración y actúan por medio de una junta deslizante recubierta con una fina capa de material elastomérico la cual reduce el coeficiente de fricción y, péndulos friccionales (figura 13), los que además que proveen la suficiente rigidez para reducir considerablemente las aceleraciones del sismo en un amplio rango de frecuencias, resuelven el problema de retornar nuevamente la edificación a su lugar gracias a la acción de un péndulo deslizante. (Jameel y Jumaat, 2011)

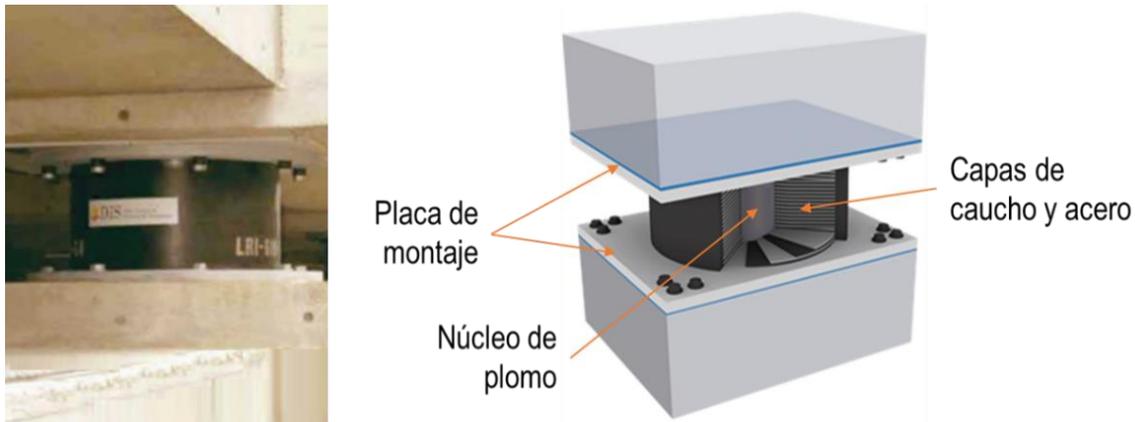
Figura 13. **Péndulo de fricción**



Fuente: CORPORATION, s.f. *FPS Sliding Pendulum Type Seismic Isolation Device Friction Pendulum System*. Consultado el 18 de mayo de 2020. Recuperado de <https://www.oiles.co.jp/en/menshin/building/menshin/products/fps/>.

Por su parte, los aisladores elastoméricos se fabrican intercalando láminas horizontales de acero y caucho, agregando entre capas resinas y otros materiales para desarrollar mejores propiedades de amortiguación. Estos aisladores cuentan o no con un núcleo cilíndrico de plomo aumentan el nivel de amortiguamiento a niveles entre 25 y 30 %. Generalmente, se usan en conjunto con otros sistemas de aislación o disipación; la idea es proveer un amortiguamiento adicional. Se fabrican de acuerdo con las especificaciones de cada proyecto y se pueden diseñar con sección cuadrada o circular. Aunque su vida útil es mayor de 50 años, las condiciones ambientales, en especial la temperatura, pueden afectar las propiedades del caucho prematuramente.

Figura 14. **Aisladores elastoméricos**



Fuente: Ingeniería Antisísmica CDV. *Aisladores sísmicos con núcleo de plomo*. Consultado 18 de mayo de 2020. Recuperado de <https://www.cdvperu.com/disipadores-sismicos-taylor/>

El corrimiento lateral de la edificación sobre la cimentación se logra gracias al comportamiento individual y en conjunto de sus elementos. Mientras la parte laminada de caucho-acero soporta la masa de la edificación, el núcleo se deforma plásticamente consiguiendo disipar más eficientemente la energía y aumentar la amortiguación. El acero es sumamente rígido bajo las cargas de servicio y el núcleo a su vez resiste los desplazamientos excesivos bajo altas cargas laterales.

2.1.2. Diseño empleando aisladores elastoméricos

El objetivo fundamental del diseño de un edificio utilizando aisladores elastoméricos es obtener una estructura que pueda desacoplarse de la cimentación, logrando de esta forma que las aceleraciones en el edificio ya aislado sean notablemente amortiguadas, generando con ello menores esfuerzos en los elementos estructurales y limitando los desplazamientos. La finalidad en sí es ampliar su periodo con el objeto de lograr un comportamiento más flexible.

Previo al diseño del modelo aislado se deben validar algunas variables, entre ellas: las propiedades geofísicas del suelo, el nivel de sismicidad del lugar, la revisión de los desplazamientos generados conforme al sismo y al espectro de diseño. Por otra parte, el edificio al desplazarse horizontalmente de manera independiente del suelo obliga a recapacitar sobre ciertas instalaciones especiales como tuberías de agua potable, drenajes, energía eléctrica y un diseño especial para el foso del ascensor, entre otras.

En el diseño del edificio, los criterios estipulados en la norma nacional AGIES NSE (2018) fueron utilizados para la edificación de base fija y, por carencia de normativa en el país, lo establecido por la norma estadounidense ASCE 7-16 para la estructura aislada.

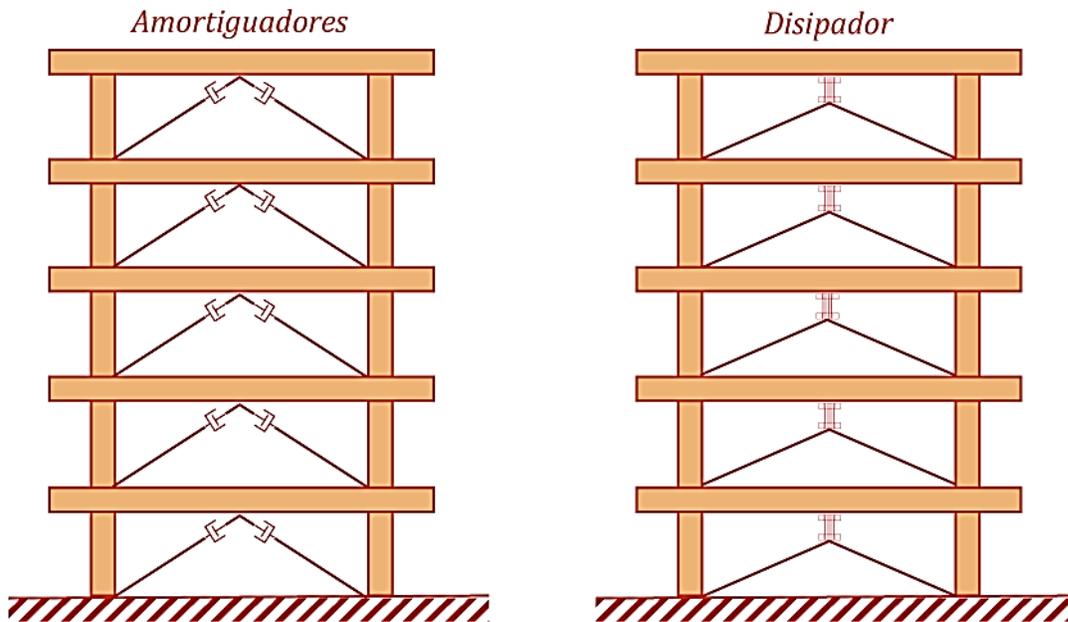
2.1.3. Diseño de un sistema de disipación de energía

Las técnicas de amortiguación sísmica en edificios de gran altura emplean generalmente este tipo de mecanismos.

2.1.3.1. Tipos de disipadores de energía

Todos los mecanismos de este tipo disipan hasta en un 80 % la energía sísmica acumulada, reduciendo considerablemente los daños de la edificación durante un terremoto. Se fijan mecánicamente a los marcos estructurales para que el edificio pueda contener cualquier deformación dentro de su límite elástico. A pesar de existir en el mercado una gran diversidad de estos dispositivos, se clasifican generalmente en disipadores sísmicos de fricción, si restringen el desplazamiento y, disipadores sísmicos de fluido viscoso, si su función es que las ondas sísmicas al atravesar los estratos superficiales disminuyan su velocidad.

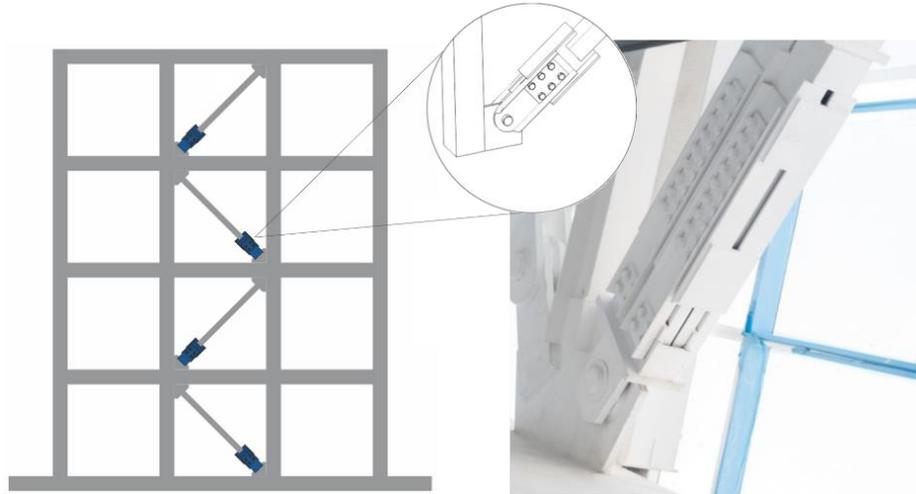
Figura 15. Tipos de disipadores de energía



Fuente: Genatios y Lafuente (2006). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras.*

Los disipadores sísmicos de fricción, formados por platinas que se deslizan una sobre otra, ejercen una fuerza de fricción contraria al movimiento como resultado del roce entre dos superficies rugosas y secas. Funcionan bajo los principios del amortiguamiento de Coulomb o fricción en seco, que depende esencialmente de los materiales y condiciones de contacto. A pesar de existir en el mercado una diversidad de estos dispositivos, los más comúnmente utilizados y económicos son los disipadores a tensión-compresión.

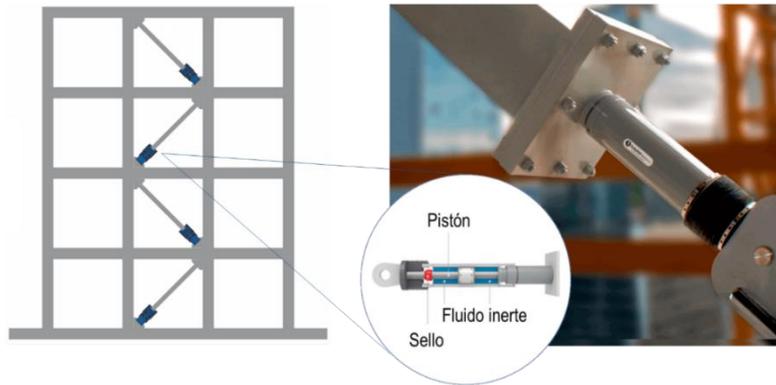
Figura 16. **Disipador sísmico de fricción**



Fuente: QUAKETEK. *Diseño Con Disipadores sísmicos a Fricción*. Consultado el 18 de mayo de 2020. Recuperado de <https://www.quaketek.com/es/disenio-sismico-con-disipadores-a-friccion/>.

Por su parte, los disipadores sísmicos de fluido viscoso, comúnmente llamados *dampers* o amortiguadores, funcionan de la misma manera como lo hacen los amortiguadores de los automóviles. La fuerza generada por la aceleración sísmica es absorbida por el fluido viscoso cuando empuja y atraviesa los agujeros de un émbolo en su interior, ocasionando una gran resistencia que se opone al movimiento horizontal del edificio. (Santos, 2011). Cuanto mayor es la velocidad, mayor es la fuerza de resistencia que se produce.

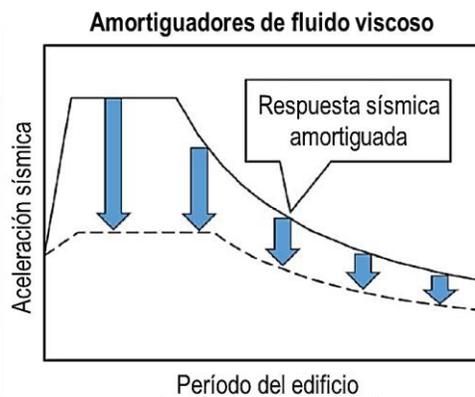
Figura 17. **Disipador sísmico de fluido viscoso**



Fuente: Ingeniería Antisísmica CDV. *Disipadores sísmicos de fluido viscoso*. Consultado 18 de mayo de 2020. Recuperado de <https://www.cdvperu.com/disipadores-sismicos-taylor/>

Estos dispositivos disminuyen eficazmente las aceleraciones sin aumentar las demandas entre la estructura y los cimientos: atenúan de mejor forma las vibraciones, no incrementan los esfuerzos en la estructura lo cual reduce las deformaciones en el edificio y, además, requieren muy poco mantenimiento.

Figura 18. **Respuesta sísmica amortiguada**



Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Diseño empleando amortiguadores viscosos

La amortiguación le permite a una estructura lograr un rendimiento óptimo cuando está sujeta a movimientos sísmicos, ráfagas de viento u otras perturbaciones transitorias de choque o vibración que no necesariamente sacuden la estructura solo en su período fundamental de movimiento.

El principal objetivo de diseñar un edificio integrando *dampers* busca que las riostras (piezas metálicas que se adosan a la estructura) disipen la energía del sismo, aliviando los esfuerzos en los elementos estructurales y permitiéndole de esta forma, permanecer dentro del rango elástico. La finalidad es amortiguar las aceleraciones sin incrementar los esfuerzos y los desplazamientos en la estructura, lo cual se logra disminuyendo la velocidad relativa entre los extremos del amortiguador. En sí, las riostras aumentan la rigidez y la resistencia estructural al mismo tiempo que restringen las deformaciones, disminuyendo la ductilidad en vigas y columnas, optimizando su rendimiento.

En la fase de diseño se requiere la verificación de variables tanto en la estructura con base fija como en la arriostrada, entre ellas: las propiedades geofísicas del suelo, el nivel de sismicidad del lugar, la revisión de los desplazamientos generados conforme al sismo y al espectro de diseño. Para evaluar la efectividad de los amortiguadores debe lograrse una reducción de al menos, 50 %, en los desplazamientos por nivel y el cortante en la base.

En el diseño sismorresistente del edificio se contemplan los criterios estipulados en la norma nacional AGIES NSE (2018) y, para el edificio con disipadores sísmicos de energía, lo establecido por la norma estadounidense ASCE 7-16.

2.1.5. Consideraciones técnicas

El diseño de un edificio utilizando la técnica constructiva del aislamiento sísmico de base o instalando disipadores sísmicos de energía requiere considerar y evaluar ciertos aspectos constructivos.

2.1.5.1. Sistema de aislación sísmica

La eficiencia y la carga que pueden soportar los aisladores elastoméricos es directamente proporcional a su superficie, es decir, que el empleo de dispositivos con mayores superficies no solo amplía el período de vibración, sino también logra un comportamiento más flexible, en comparación si se instalaran el equivalente de dispositivos de menor diámetro. (Genatios y Lafuente, 2006)

Figura 19. Amortiguadores de base

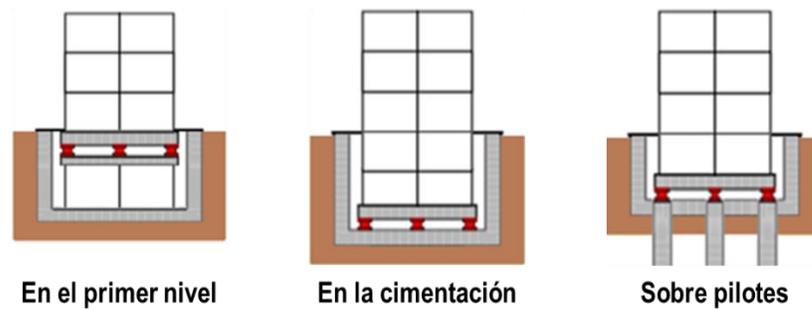


Fuente: Dynamic Isolation System. *Aislamiento Sísmico Para Edificaciones y Puentes*. Consultado el 15 de junio de 2020.

Muchos de los proveedores de aisladores elastoméricos prestan apoyo técnico a los proyectos, ayudando a realizar diseños, presupuestos, estudios de factibilidad-viabilidad del proyecto y hasta simulaciones en computadora.

Es muy importante decidir dónde se ubicará la interfaz de aislamiento, es decir, el límite donde los cimientos se van a desconectar de la superestructura para aislarla del movimiento del suelo.

Figura 20. **Ubicación de la interfaz de aislamiento**



Fuente: Oviedo (2015). *Protección sísmica y reforzamiento de edificaciones a través de sistemas no convencionales.*

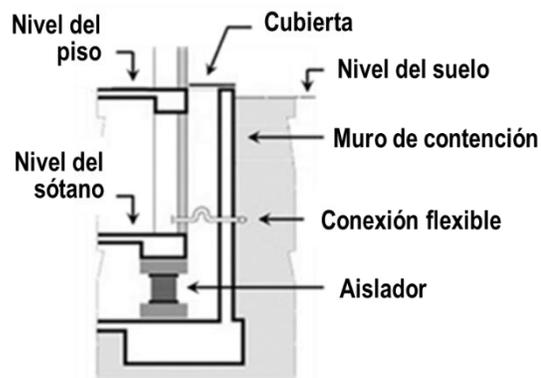
Si se elige la planta baja del edificio o en un edificio sin sótano, su instalación requerirá de columnas y paredes totalmente separadas de la cimentación, lo cual obliga a colocar juntas horizontales para dar continuidad en escaleras, elevadores, fachadas y otros elementos no estructurales, lo que en obra muchas veces resulta inadecuado por ser más complicado de lo previsto.

Si se escoge el nivel inferior de la cimentación se requiere desvincular los muros perimetrales de contención de la estructura, con el propósito de que el movimiento de la interfaz del sistema aislado quede libre de movimiento. Prácticamente se requiere que los aisladores sean instalados sobre elementos constructivos aislados del confinamiento perimetral.

Si se construye sobre pilotes debe instalarse un diafragma que separe totalmente la edificación de los muros perimetrales de contención. Se debe considerar una separación mínima que supere el máximo desplazamiento, para evitar el choque del diafragma.

En cualquier caso, es necesario adaptar un diseño arquitectónico que facilite la conexión de componentes que se deban de acoplar sin interferir el movimiento de la interfaz de aislamiento para no sufrir daños, como drenajes, tuberías de agua potable, energía eléctrica, escaleras, ascensores u otras instalaciones especiales. Además, requiere acceso y espacio suficiente para la inspección de los aisladores y su cambio.

Figura 21. **Sección esquemática de un aislador**



Fuente: Arnold (2016). *Seismic Safety Of The Building Envelope*.

Los accesorios que se montan en las tuberías a menudo son fabricados con el fin de ser flexibles o están equipados con juntas universales. Esto les permite desplazarse libremente sin entorpecer el movimiento de la interfaz de aislamiento.

Los accesos, escaleras y salidas de emergencia se deben fijar a la superestructura para que permanezcan suspendidas sin apoyarse en la interfaz de aislamiento; pequeños apoyos deslizantes se pueden colocar al último escalón para permitir movimientos laterales.

La estructura externa donde viaja el ascensor debe aislarse de los sótanos a partir del nivel 0 o donde se encuentre la interfaz de aislamiento para que, de esta forma, al quedar suspendida la torre del ascensor de los niveles superiores, la misma no quede apoyada a la subestructura. Otra alternativa es apoyar parcialmente esta torre sobre deslizadores para que pueda desplazarse lateralmente. (Arnold, 2016)

Un aspecto imprescindible de evaluar son las condiciones de suelo de apoyo y la geología local. No es recomendable aislar sísmicamente edificios que descansen sobre estratos inestables, depósitos granulares, sedimentos frágiles, materiales blandos y en aquellos que sean susceptibles de ser saturados por agua, ya que las vibraciones del sismo hacen que pierdan su estabilidad y consecuentemente disminuyan su resistencia, quedando la estructura vulnerable a sufrir asentamientos, agrietamientos, inclinaciones y eventualmente, daños irreparables que pueden conducir a la pérdida total.

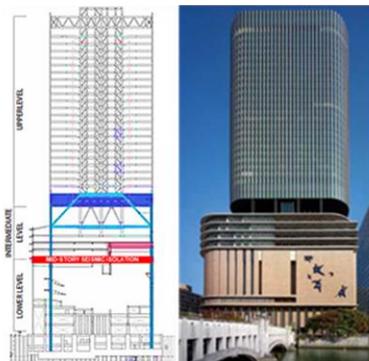
De igual forma, no es aconsejable aislar sísmicamente estructuras sumamente rígidas con períodos de vibración muy bajos, ya que el aislador incrementará las aceleraciones del suelo en la estructura. Para este tipo de edificaciones, el rango ideal oscila entre períodos de 0.5 y un segundo.

Los aisladores en edificios muy altos resultan inadecuados, ya que solo son eficientes en edificaciones bajas y de mediana elevación; de hecho, el edificio

aislado más alto es Los Ángeles City Hall, de 138 m de altura (32 niveles), rehabilitado en California, EE. UU., en 2001.

Sin embargo, el aislamiento sísmico de base puede presentarse como una opción para edificios de gran altura si se emplean técnicas sofisticadas de manera correcta. Como ejemplo se resalta el edificio Nakanoshima Festival Tower, un complejo rascacielos de 200 m de altura (39 niveles), rehabilitado en Osaka, Japón, en 2012. Este cuenta con 31 niveles aislados separados por la interfaz ubicada debajo del nivel 9, que divide la sección intermedia de la inferior. Es así, la segunda estructura sísmicamente aislada más alta del mundo. (Okadan, 2014)

Figura 22. **Nakanoshima Festival Tower**



Fuente: Okadan (2014). *Structural Design of Nakanoshima Festival Tower*.

Es importante tener presente que una configuración estructural irregular produce desplazamientos máximos distintos en cada aislador, influenciados por las particularidades del sismo y de la excentricidad del edificio. De manera general, el alejamiento de formas y esquemas estructurales simétricos es castigado severamente por los sismos. Por tal razón, es recomendable utilizar aisladores de sección transversal circular, cuyas propiedades, iguales en

cualquier dirección, producen una mejor respuesta de la estructura dada la naturaleza errática de los sismos.

Por aparte, las normas generalmente establecen que, en las áreas del edificio sin riesgo de incendios, los aisladores no requieren protección al fuego; en las áreas con riesgo de incendios o si la norma lo requiere, se debe proveer mediante cajas selladas de concreto contrafuego, mantas laminadas con materiales ignífugos, revestimientos de aislamiento térmico contra incendios, extintores, entre otros. Referente a los materiales con los que está hecho el aislador, el fabricante recomienda el tipo de protección al fuego que se deba emplear. Una cubierta resistente al fuego es necesaria instalar si los aisladores son colados en nivel inferior. (Dynamic Isolation System, 2007).

Figura 23. **Ejemplos de cubiertas resistentes al fuego**



Manta ignifuga

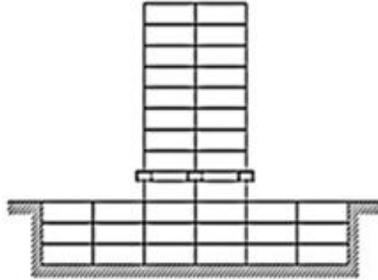


Caja contrafuego

Fuente: Dynamic Isolation System. *Aislamiento Sísmico Para Edificaciones y Puentes*. Consultado el 17 de Junio de 2020.

En el siguiente ejemplo se presentan algunas formas en que se podría ubicar la interfaz de aislamiento sísmico, lo cual permite formarse una idea de las consideraciones de diseño que se deben tener presente al momento de implementar dispositivos de aislación. Dicho ejemplo se realiza en una torre de nueve niveles y tres sótanos.

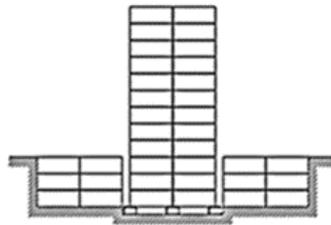
Figura 24. **Torre de edificio aislada en el primer entrecapiso**



Fuente: León (2014). *Sistemas modernos de protección sísmica: aisladores sísmicos.*

- Presenta problemas con la instalación de escaleras, elevadores, fachadas y otros elementos no estructurales.
- En estructuras esbeltas se pueden producir esfuerzos de tensión en los aisladores.
- La cimentación es más cara.

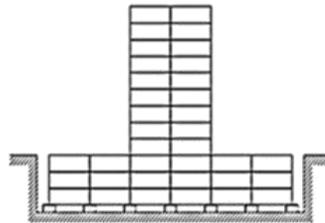
Figura 25. **Torre del edificio totalmente aislada**



Fuente: León (2014). *Sistemas modernos de protección sísmica: aisladores sísmicos.*

- En torres esbeltas se pueden producir esfuerzos de tensión en los aisladores
- La estructura puede resultar inestable

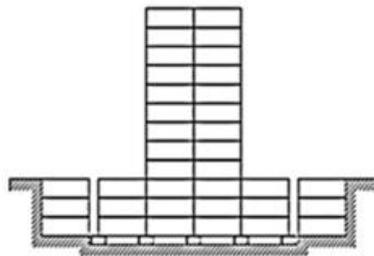
Figura 26. **Edificio totalmente aislado**



Fuente: León (2014). *Sistemas modernos de protección sísmica: aisladores sísmicos.*

- Es la mejor opción porque toda la estructura se protege sísmicamente.
- Si el edificio cuenta con más de un sótano, la contención del suelo resulta difícil y costosa.

Figura 27. **Torre del edificio parcialmente aislada**



Fuente: León (2014). *Sistemas modernos de protección sísmica: aisladores sísmicos.*

- Resuelve el problema de contención del suelo
- Los contenidos, así como la estructura, se encuentran protegidos

- Juntas típicamente en estacionamientos

2.1.5.2. Amortiguadores de fluido viscoso

A diferencia de los disipadores sísmicos de fricción que generan una fuerza de amortiguación fija bajo cualquier deflexión de la edificación, al mismo tiempo que aumentan la tensión en las columnas, estos dispositivos no añaden rigidez al edificio, no soportan ninguna carga estática y únicamente funcionan cuando se mueven proporcionando una fuerza de resistencia.

También, tienen la capacidad única de reducir simultáneamente tanto la tensión como la deflexión dentro de una estructura sujeta a un movimiento transitorio. Esto se debe a que un amortiguador de fluido varía su fuerza solo con la velocidad, lo que proporciona una respuesta que está inherentemente fuera de fase con las tensiones ocasionadas al flexionarse el edificio.

La respuesta fuera de fase es exclusiva de estos amortiguadores y puede entender fácilmente analizando el siguiente caso.

Al tener presente que un edificio se sacude lateralmente hacia adelante y hacia atrás durante un siniestro telúrico o ráfagas de viento, en el movimiento hacia adelante el punto máximo de tensión en las columnas ocurre cuando el edificio alcanza la máxima flexión desde su posición normal. En este mismo punto, las columnas flexionadas invierten la dirección la fuerza para retroceder en la dirección opuesta. Se agrega un amortiguador de fluido viscoso, la fuerza de amortiguación se reducirá a cero en este punto de máxima deflexión, debido a que durante el recorrido del amortiguador la velocidad llega a cero cuando las columnas invierten la dirección. A medida que el edificio se flexiona hacia atrás, la velocidad aumenta gradualmente hasta que el amortiguador opone la máxima

fuerza, la cual ocurre cuando la columna pasa por su posición vertical normal. En este punto se registran los mínimos esfuerzos tensionantes en las columnas.

La efectividad de la amortiguación es proporcional a la cantidad, distribución y disposición de dispositivos instalados. De hecho, los amortiguadores son generalmente acoplados a vigas y columnas empleando conexiones metálicas y otros accesorios de sujeción. Por ello, al diseñar el acomodamiento de estos mecanismos, deberán distinguirse dos sistemas independientes interactuando entre sí: la edificación y los amortiguadores.

Se deben instalar uniformemente y buscando la simetría en el recorrido de toda la altura del edificio, arriostrándolos a los marcos estructurales en la dirección con mayor desplazamiento y alejados del centro de gravedad de cada nivel, a fin de atenuar los efectos torsionales. Donde las velocidades y deformaciones de entrepiso son bajas, los amortiguadores suelen colocarse entre dos niveles consecutivos e incluso, entre tres o más.

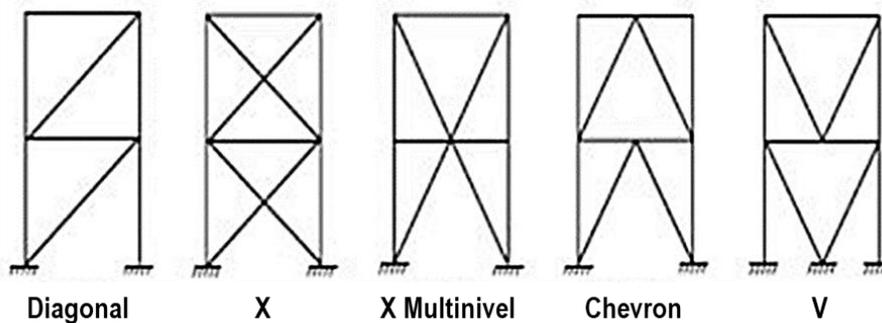
A medida que el edificio se balancea en un terremoto y un nivel se mueve en relación con otro, como consecuencia de un movimiento de tipo cortante, los amortiguadores capturan este movimiento y resisten en las direcciones de tensión y compresión con una fuerza opuesta. Este concepto funciona muy bien en edificios residenciales o de oficinas construidos con marcos reforzados o muros de corte y se puede instalar a estructuras bajas, medianas y altas.

Aunque la ubicación de estos dispositivos requiere de un proceso de cálculo iterativo hasta alcanzar la óptima y eficiente respuesta sísmica de la estructura, durante el diseño de nuevos edificios es recomendable comenzar los cálculos colocándolos en los entresijos donde ocurren las variaciones máximas de velocidad y/o en aquellos donde se dan los mayores valores de desplazamiento.

En las edificaciones que se pretenden reforzar no es tan fácil, pues generalmente se presentan una serie de problemas como cambios en la arquitectura y estética demandantes (típicamente fachadas), remoción de tabiquería y elementos no estructurales, interrupción del libre paso, entre otras.

Existe una gran variedad, tamaños y configuraciones de amortiguadores de fluido viscoso. Se pueden conectar a la estructura de varias maneras y ocultarse dentro de muros o tabiques, no obstante, generalmente quedan vistos. Funcionan de igual manera tanto en edificios nuevos como en edificaciones existentes. Las riostras diagonales son populares al igual que los montajes chevron.

Figura 28. **Configuraciones de arriostramiento**



Fuente: elaboración propia.

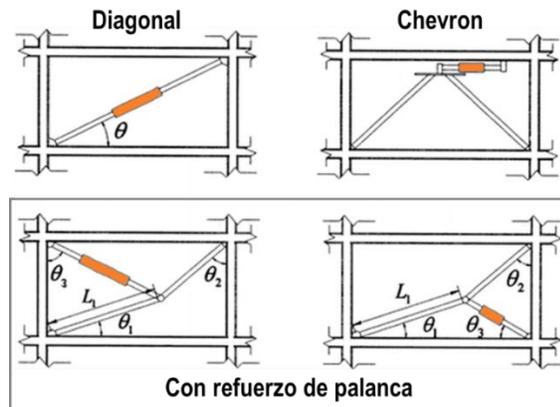
El arriostramiento en diagonal es la disposición más simple para absorber y disipar eficientemente la componente horizontal de las fuerzas, logrando el mismo nivel de desempeño con un menor número de dispositivos, en comparación con otras disposiciones de instalación. Aumentan el amortiguamiento, disminuyen la vibración y reducen las demandas en la estructura (aceleraciones en el edificio, desplazamientos de entrepiso, cortante

en las columnas y otros elementos verticales). La torsión es nula produciendo una distribución lineal de momentos.

La disposición chevron reduce eficientemente las derivas, ya que estos dispositivos se instalan al techo de forma horizontal con el fin de absorber directamente las fuerzas actuantes. No obstante, la acción horizontal del sismo sobre el edificio provoca un sobreesfuerzo en la parte la viga donde se fija el amortiguador, generando tensiones y compresiones que deben ser controladas agregándole generalmente a esta un refuerzo adicional mediante anclajes y planchas metálicas

Para edificios relativamente rígidos se pueden usar amortiguadores con refuerzo de palanca, los cuales capturan las deflexiones en un plano y las trasladan a otro, proporcionando una amortiguación mucho más eficiente; requieren de un mecanismo diseñado y fabricado específicamente para cada proyecto en particular.

Figura 29. **Configuraciones de amortiguadores con refuerzo de palanca**



Fuente: elaboración propia.

Un concepto es similar al arriostamiento diagonal, pero con dimensiones mucho mayores y en un tramo mucho más largo, son las llamadas mega riostras, usadas para trasladar el movimiento y absorber las deflexiones de varios niveles de un edificio hacia un amortiguador conectado a los principales nodos estructurales.

Figura 30. **Arriostamiento diagonal**

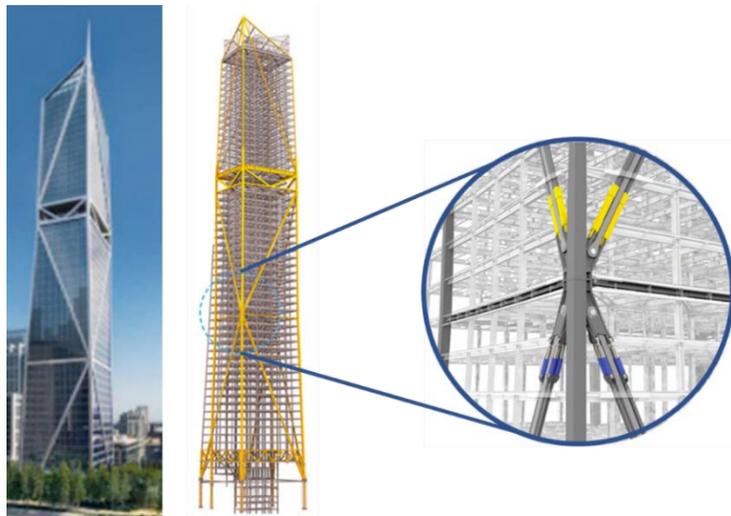


Fuente: Genatios y Lafuente (2006). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras.*

También se debe tomar muy en cuenta que los amortiguadores de fluido viscoso resultan bastante eficientes para edificaciones bajas y de mediana elevación, pero son especialmente adecuados para edificios de gran altura; de hecho, el 181 Fremont, el tercer edificio más alto de San Francisco con 56 niveles y 245 m de altura emplea un sistema de amortiguación compuesto por un mega marco de acero perimetral que integra amortiguadores mega riostra para resistir las fuerzas sísmicas y del viento. Los primeros 37 niveles son ocupados por comercios y oficinas, mientras los restantes son condominios. Los

amortiguadores mega riostra se extienden en los dos tercios inferiores del edificio, entre los nodos cerca del nivel del suelo hasta alcanzar los niveles 20 y 37. Un marco reforzado tipo chevron invertido proporciona continuidad lateral hacia los niveles residenciales, donde se incorpora nuevamente el mega sistema amortiguación. Cada mega riostra, que se sujeta lateralmente en cada nivel del edificio para evitar pandeo, integra tres amortiguadores viscosos en paralelo.

Figura 31. **Mega riostras**



Fuente: Taylor Devices inc. *Fluid Viscous Dampers*. Consultado el 17 de junio de 2020.

Conforme la altura del edificio aumenta, también lo hace el período fundamental; correspondientemente, las velocidades del piso entre niveles son menores y la eficiencia de amortiguación aumenta. Para edificios sumamente altos, más flexibles, los amortiguadores mega riostra son extremadamente eficientes para contener la energía acumulada en varios niveles y disiparla. Cuando se trata de edificios poco altos, más rígidos, se suelen colocar

amortiguadores de gran tamaño a fin de lograr los mismos resultados que se obtendrían colocando una mayor cantidad de dispositivos más pequeños.

En edificios de poca o mediana altura, construidos sobre el nivel del suelo y que tienen grandes aberturas como ventanas y puertas anchas, enormes espacios sin obstáculos como estacionamientos u otras aberturas donde normalmente se necesitaría un muro de corte para lograr la estabilidad y minimizar la posibilidad de que ocurra el fenómeno conocido como colapso de pisos suaves, la instalación de amortiguadores únicamente en el nivel inferior reduce significativamente el cortante total de la base, sin disminuir el período de la estructura.

Casi siempre la ubicación de los amortiguadores está sujeta a restricciones arquitectónicas. Sin embargo, como cualquier sistema de resistencia a una fuerza lateral, es importante asegurarse de que los amortiguadores se coloquen en una configuración que no introduzca asimetría en la estructura. La ubicación más eficiente sería equivalente al centro de masa del edificio para controlar cualquier movimiento de torsión del edificio; por consiguiente, será mejor instalarlos a lo largo del perímetro de las estructuras típicas.

Los amortiguadores muchas veces no se requieren en todos los niveles; a menudo se dejan de instalar en los niveles superiores o se pueden alternar entre diferentes niveles de piso. Previo su anclaje, debe considerarse su ubicación respecto al -centro de masa- y las fuerzas actuantes en cualquier dirección del edificio. Para edificios con una base más grande, es conveniente instalar más de dos amortiguadores lo que podría resultar en tamaños y conexiones de miembros estructurales más económicos. A fin de minimizar la amplificación torsional en edificios que presentan irregularidades en el plano, los amortiguadores se pueden colocar en el lado más rígido del mismos.

La implementación de amortiguadores de fluido viscoso en la actualidad es la variante de modernización sísmica más recomendada por su alto desempeño y simplicidad de anclaje, ya que generalmente no se requiere una modificación de los cimientos, lo que acorta significativamente las labores de construcción y reduce los costos. También son bastante eficientes para resolver problemas de separación de edificios.

Algunas de las limitaciones que se deben considerar previo a la instalación de este tipo de protección sísmica son:

- Algunos tipos de amortiguadores pueden requerir ser reemplazados parcial o totalmente luego de un sismo severo.
- Están sujetos a un constante control de fugas.
- Debe dejarse un acceso libre y espacio suficiente para su revisión, mantenimiento y su reemplazo.
- Protección contra incendios. El modo de protección de un amortiguador durante la exposición al fuego es el derretimiento de los sellos, liberando así el fluido inflamable al área circundante. Esto evita el riesgo de explosión, ya que la fusión de los sellos liberaría cualquier acumulación de alta presión antes de que haya una gran tensión dentro de las paredes del contenedor.
- Protección contra la corrosión. Las condiciones y posición de los aisladores deben revisarse en intervalos regulares.

2.1.6. Consideraciones económicas

En la actualidad, diversos métodos son empleados para evaluar los costos de explotación de una edificación a lo largo de su tiempo de vida útil,

considerando la inversión actual y los beneficios futuros. En la formulación de un proyecto es frecuente elegir la opción con el menor costo de inversión, aunque los costos de mantenimiento sean mayores o simplemente, no se toman en cuenta porque incumben a otra etapa, si bien, una menor inversión tiende a tener un mayor costo de mantenimiento y viceversa.

Siempre debe tomarse en cuenta que la prevención de daños a consecuencia de un sismo bastante severo e incluso, evitar la demolición del edificio, recupera por mucho más el gasto que conlleva la instalación de este tipo de dispositivos. De igual manera, se debe considerar que los costos de mantenimiento son permanentes y necesarios para conservar la estructura operativa, mismos que continuarán siendo realizados hasta que se incurran en nuevos costos de inversión destinados a extenderle la vida útil al edificio.

También es importante señalar que, en estos casos, los costos asociados con la implementación de medidas antisísmicas no solo se relacionan con la inversión en la clase de tecnología seleccionada y los gastos que conlleva el montaje de tales dispositivos, sino que, además, se debe considerar el valor económico rescatable tanto de los contenidos y los elementos no estructurales como el de su total funcionalidad después del sismo, los cuales sin lugar a dudas, representan un monto muy superior al costo del edificio. Por ello, más que la evaluación económica del proyecto, deben plantearse los beneficios comerciales que serán un factor crucial en la explotación económica y el futuro de la edificación. En sí, la inversión en protección sísmica ha venido ganando la aceptación y la confiabilidad del mercado inmobiliario a nivel mundial. (Genatios y Lafuente, 2006)

Adicionar un sistema de protección sísmica a un edificio representa incurrir en costos que derivan esencialmente de las características de su uso y del nivel

de seguridad estructural requerida por el proyecto. Aunque la tendencia mundial de los códigos sismorresistentes es incluir tales dispositivos, en este país aún persiste la duda si estos sistemas realmente representan un ahorro. Si bien, la inversión en un sistema de protección sísmica dependerá básicamente del tipo de dispositivos que se instalarán según el diseño adoptado, este gasto compensa las reparaciones de la estructura previstas por sismos durante su ciclo de vida. (Genatios y Lafuente, 2006)

A pesar de que la adopción de estos sistemas de protección sísmica representa un costo adicional, este debe considerarse como una inversión sumamente conveniente, no solo por la reducción de los posibles daños que el sismo pudiera ocasionarle a la edificación en sí y su contenido, sino también porque aumenta la seguridad y las probabilidades de sobrevivencia de las personas que permanecen dentro o transitan en sus alrededores. En sí, el costo de una estructura protegida sísmicamente suele ser mayor que el de una construida convencionalmente. Al precio de un aislador elastomérico que oscila entre 9 y 15 mil dólares estadounidenses (Sirvesa, s.f.), o al de un amortiguador o *damp*er que se mantiene entre 5 y 10 mil dólares, debe agregársele los costos:

Costos de inversión

- Dispositivos (fabricación, prototipos y ensayos en obra).
- Instalación (anclajes, montaje, nivelación, etc.).
- Remoción y reparación (pre y post instalación respectivamente) de elementos, componentes y accesorios arquitectónicos, sistema eléctrico, plomería, etc., si las hubiera para realizar la readecuación.
- De ser necesario, protección contra incendios.

Costos de mantenimiento

- Mantenimiento e inspecciones durante su vida útil
- Reemplazo de unidades debido al envejecimiento, abrasión y/o uso
- Mecanismo paralelo por ser instalado para realizar el reemplazo de unidades

La instalación de dispositivos de aislación sísmica debe considerar, además, los siguientes costos:

- Diafragma, columnas u otros elementos para soportar la interfaz y aislar la superestructura de la cimentación y esta, de los muros de contención.
- Red de juntas de dilatación, conectores flexibles y otras tuberías para la acometida de energía eléctrica, agua potable, drenaje.
- Adaptación del foso del ascensor y otras instalaciones especiales.

La diferencia económica en ambos casos no siempre será el marco para la toma de decisiones. De hecho, el edificio aislado conseguirá una mejor eficiencia dinámica, pero su costo será más elevado; por el contrario, la inversión en disipadores viscosos es un tanto menor. No obstante, la idea de una inversión actual representa un ahorro en el futuro, ya sea disminuyendo o eliminando los costos de reparaciones del inmueble, descartando los costos por discontinuidad o paralización de actividades y lucro cesante, evitando las cuantiosas pérdidas de los contenidos y, en fin, protegiendo la vida de usuarios y público en general.

En este orden de ideas, fortalecer la estructura antisísmica de un edificio hospitalario construido hace ya varias décadas y, además, extenderle su ciclo de vida mediante su rehabilitación estructural, es bastante difícil de llevar a cabo al afrontar distintas dificultades que se presentan al intentar recuperar las

capacidades estructurales, las cuales no dejan de ocasionar molestias a los usuarios además de causar considerables interrupciones temporales y pérdidas económicas. En consecuencia, es conveniente encontrar soluciones simples que, sin comprometer la cimentación, logren contener las liberaciones abruptas de energía sísmica y canalizar las aceleraciones y las fuerzas sísmicas.

2.1.7. Selección del método de análisis

El Método de las fuerzas laterales equivalentes y el Método Modal Espectral (MME), son los más comúnmente adoptados por la generalidad de las normativas sismorresistentes. La preferencia en su selección dependerá principalmente de la importancia del edificio, su configuración estructural y otras características particulares de su diseño. Por otra parte, los códigos establecen criterios adicionales que se deben cumplir en cuanto al uso de dispositivos de protección sísmica (aisladores y disipadores), previo a seleccionar el que se considere como el más adecuado. Sin mencionar también que, en la fase de diseño, mientras más complejos sean los requerimientos arquitectónicos del edificio, el análisis demandará métodos más rigurosos para obtener un diseño más preciso, donde una mayor complejidad asocia un mayor costo.

En esta investigación se seleccionó el MME, un método de respuesta lineal que aproxima de manera más exacta el comportamiento sísmico de una edificación de acuerdo con sus propiedades dinámicas. En otras palabras, el análisis se llevó a cabo según los parámetros modales que son: la frecuencia (o período), los modos de vibración y el amortiguamiento.

Con estos parámetros y el MME se reprodujeron desplazamientos y estimaron fuerzas con gran precisión, además de poder reducir las respuestas en resonancia y descubrir los modos que más fácilmente se excitan con el sismo, lo que resultó realmente útil para apreciar el comportamiento aislado del edificio.

Como todo programa de simulación, el MME tiene sus restricciones; en su caso, derivan del -comportamiento inelástico- que desarrollan las estructuras durante el sismo. Por esa razón, las normas usualmente incluyen disposiciones de cumplimiento obligatorio que el diseño estructural debe observar.

2.1.8. Selección de la herramienta de diseño

El análisis sísmico en esta investigación aprovechó las ventajas que ofrece ETABS, un software dedicado al análisis estructural tridimensional desarrollado específicamente para el diseño y dimensionamiento de edificios de concreto reforzado y acero.

Las herramientas de modelado que brinda ETABS permiten la creación de diseños e integrar detalles, cuenta con facilidades de dimensionamiento, capacidad de emplear una gran diversidad de materiales, selección del tipo de análisis estructural, entre muchas otras; por aparte la visualización en 3D a través monitores sintetiza y permite al usuario la comprensión inmediata de los resultados obtenidos.

A diferencia de otros programas, ETABS identifica características que son inherentes al diseño de edificios y que otros softwares no reconocen, por lo que se eligió para este análisis. Sus comandos son intuitivos y permiten la generación de elevaciones y plantas estructurales; incluye el dimensionamiento de vigas, columnas, losas, muros y mampostería. Los modelos se pueden crear y automáticamente los resultados representarse directamente en la estructura. Facilita diseños esquemáticos del modelo, cuadros resumen, tablas informativas, detalles de los elementos estructurales y calcula fuerzas, esfuerzos y desplazamientos.

2.2. Criterios de análisis

Actualmente, la tecnología aún no es capaz de garantizar un estado de vulnerabilidad nula, pero debe de garantizar la vida humana en el proceso de evacuación o durante las réplicas. De hecho, la norma de seguridad estructural guatemalteca NSE, a diferencia de la normal estadounidense, no considera sistemas de protección sísmica.

Por ello, esta investigación inicia determinando el estado actual de la estructura utilizando el método de análisis lineal según la norma AGIES para calcular el edificio con cimentación. Luego, empleando como referencia los criterios y normas establecidas en el código ASCE 7-16 de los Estados Unidos, se efectuó el cálculo del mismo edificio utilizando los métodos de aislación sísmica y disipación de energía para posteriormente, contrastar ambos resultados con los del edificio con cimentación. Finalmente, el análisis económico parte de la comparación de los desplazamientos obtenidos de cada análisis y, su relación directa con el daño estructural que producen.

2.2.1. Marco de referencia

De acuerdo con lo mencionado en la NSE 6, la evaluación estructural constituye una herramienta para la toma de decisiones en las acciones a tomar en una estructura existente. Establece que las evaluaciones y rehabilitaciones de estructuras existentes deben efectuarse por los motivos siguientes:

- Daños existentes o daños potenciales en la estructura por eventos sísmicos.
- Cambio de uso de categoría ocupacional de acuerdo con la clasificación del Capítulo 3 de la NSE 1.
- Normalización de la normativa vigente hacia la implementación de criterios con mayor rigor.

2.2.2. Clasificación de las estructuras y factores de seguridad

Las normas fijan cincuenta años de vida útil como un dato referencial para la mayor parte de edificaciones, período durante el cual, se estima que se hallarán sujetas a sismos de intensidad y ocurrencia variable, desde sacudidas leves pero muy frecuentes, hasta sismos de considerable magnitud con muy poca probabilidad de que sucedan. El nivel de riesgo considerado se establece clasificando las estructuras según su importancia y las consecuencias de la falla y, modificando el período de retorno, se calcula el periodo de retorno del sismo de diseño a fin de elegir el sismo que adecuado al diseño que mejor se adapte a la sismicidad del lugar.

AGIES clasifica como obras esenciales aquellas que ininterrumpidamente han de continuar funcionando al ocurrir un desastre y posterior al mismo. Entre esta clasificación se encuentran los hospitales, incluyendo especialmente, las unidades de cuidados intensivos, las salas de emergencias y los quirófanos.

La NSE clasifica las obras según el uso al que se destinen, del grado de control del daño y por la proporción construida en riesgo y las repercusiones sociales y económicas debidas al cese de sus funciones. Establece el nivel de sismo como:

Tabla II. **Nivel de sismo**

Nivel del sismo	Periodo de retorno (50 años)	Uso u ocupación
Básico	10 %	Obras ordinarias
Severo	5 %	Obras importantes o esenciales
Extremo	5 %	Criterio empleado para la elaboración del Mapa de Zonificación Sísmica
Mínimo	Referirse a la norma NSE 2	Obras utilitarias y readecuación de las ya existentes

Fuente: AGIES. *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Consultado el 18 de junio de 2020.

Recomienda el factor K_d para la clasificación del riesgo sísmico en función del nivel de sismo.

Tabla III. **Factores K_d**

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. *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Consultado el 18 de junio de 2020.

2.2.3. Clasificación del sitio

La vibración del sismo en la superficie está sumamente influenciada por las condiciones del suelo subyacente y, en consecuencia, las características del sitio de construcción y la naturaleza del suelo de apoyo condicionan la respuesta sísmica de las estructuras. Las tres normas estudiadas clasifican el tipo del suelo según su granulometría y su perfil estratificado a 30 m de profundidad, basándose en los tres parámetros siguientes:

- El promedio de la velocidad de la onda S
- La dureza y consistencia de los estratos subyacentes
- La resistencia no-drenada al cortante del suelo

Las características del sitio de construcción y las condiciones del suelo de apoyo determinan la clasificación del terreno donde se asentará la edificación, la cual se representa mediante letras de la A a la F según se catalogue la clase de suelo. Es así como los suelos rocosos corresponden a categorización A-B; C-D caracteriza aquellos estratos densos y firmes; E identifica suelos formados por capas de textura blanda; y F abarca todos aquellos suelos vulnerables a la exigencia sísmica. De hecho, esta clasificación está estipulada según la norma AGIES NSE 2.1. Es importante hacer notar que esta gradación es indispensable al momento de conformar adecuadamente un espectro de diseño.

Tabla IV. Clasificación del tipo de suelo

Clase de suelo	Nombre Perfil de Suelo	PROPIEDADES PROMEDIO EN LOS PRIMEROS 30 METROS		
		Velocidad de onda de corte, \bar{v}_g (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, \bar{N}	Resistencia al corte del suelo NO drenado, \bar{s}_v , (kpa)
A	Roca dura	$\bar{v}_g > 1500$	N/A	N/A
B	Roca	$750 < \bar{v}_g \leq 1500$	N/A	N/A
C	Suelo denso y roca suave	$365 < \bar{v}_g \leq 750$	$\bar{N} > 50$	$\bar{s}_v \geq 100$
D	Perfil de suelo rígido	$185 \leq \bar{v}_g \leq 365$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$50 \leq \bar{s}_v \leq 100$
E	Perfil de suelo suave	$\bar{v}_g < 185$	$\bar{N} < 15$	$\bar{s}_v < 0$
E	-	Cualquier perfil con más de 3 metros de suelo con las siguientes características: 1. Índice de plasticidad $PI > 20$, 2. Contenido de humedad $w \geq 40\%$, 3. Resistencia al corte de suelo no drenado < 25 kPa		
F	-	Cualquier perfil con contenido de suelo que tenga una o más de las siguientes características: 1. Suelos vulnerables a fallas o colapsos bajo cargas sísmicas, así como suelos licuables, arcillas altamente sensibles, suelos débilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas ($H > 3$ metros de turba o arcilla altamente orgánica) 3. Arcillas altamente plásticas ($H > 8$ metros con coeficiente de plasticidad $P > 75$) 4. Arcillas en estratos de gran espesor, suave/medio rígidas ($H > 36$ metros)		

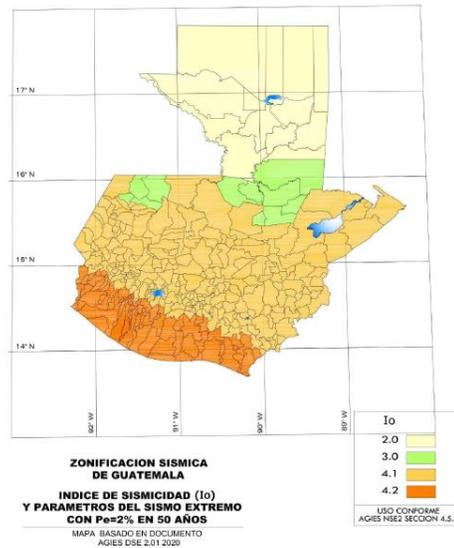
Fuente: AGIES. *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Consultado el 18 de junio de 2020.

2.2.4. Clasificación de la sismicidad del lugar

En Guatemala se establecen cuatro zonas de intensidad sísmica. Esta zonificación responde a la aceleración del sismo extremo como una forma de medir su impacto en diferentes regiones, tomando como referencia la aceleración media del suelo Clase A y un periodo de retorno de 2 %.

En el mapa de zonificación de Guatemala, se distinguen las diferentes zonas en base a índice de sismicidad (I_0), el cual se encuentra especificado a mayor detalle en el Anexo A - listado de amenaza sísmica y velocidad básica del viento por municipios (AGIES, 2018).

Figura 32. **Mapa de zonificación de Guatemala**



Fuente: AGIES. *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Consultado el 18 de junio de 2020.

2.2.5. Configuración del espectro de diseño

Mientras los espectros de diseño marcan el final de los estudios probabilísticos de peligrosidad sísmica y el inicio de los análisis sobre la respuesta estructural, los espectros de respuesta, casi siempre normalizados por la máxima aceleración del suelo, representan la plataforma para llegar a estimar: deformaciones laterales y fuerzas de diseño; ello requiere conocer las propiedades y la naturaleza geológica del suelo donde se asentará la estructura, las características sísmicas del lugar y el período fundamental de la edificación. Se debe considerar un amortiguamiento crítico del 5 %, ajustar al perfil del suelo y corregir la amplificación que sufren las ondas sísmicas al atravesar suelos compresibles.

NSE 2 emplea un amortiguamiento del 5 % para simplificar los espectros de respuesta que definen el sismo de diseño. Asimismo, el Anexo A - lista de amenaza sísmica y velocidad básica del viento por municipios (AGIES, 2018), proporciona los valores S_{1r} y S_{cr} con los que se configuran dichos espectros, siendo estos respectivamente, las ordenadas de los períodos de 1 y 0.2 segundos del sismo extremo que se producirían en un suelo clase A, mismos que se deben ajustar al lugar donde se llevará a cabo la construcción teniendo en cuenta la existencia de fallas geológicas inmediatas y el índice de sismicidad de dicho lugar.

Para ello, se deben considerar en el cálculo las relaciones siguientes:

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v \quad y \quad S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a$$

Donde:

- S_{1s} y S_{cs} : definidas en el enunciado que antecede.
- F_v y F_a : son respectivamente, los factores para períodos largos y cortos; dependen de la naturaleza geológica del suelo donde se asentará la estructura y del índice de sismicidad.
- N_a y N_v : son respectivamente, los factores de falla cercana asociados a la proximidad horizontal de fuentes sísmicas o amenazas geológicas.

Los parámetros del espectro son calibrados mediante las siguientes expresiones: $S_{1d} = K_d * S_{1s}$ y $S_{cd} = K_d * S_{cs}$.

Tabla V. Factores F_a y F_v

Tabla 4.5-1 — Coeficientes de sitio F_a

Clase de sitio	Índice de sismicidad			
	2	3	4.1	4.2
AB	1.0	1.0	1.0	1.0
C ^[1]	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 - ver Sección 4.4			

[1] En los casos en que la investigación de suelos abreviada no especifique si un suelo firme clasifica como C o como D, el factor F_a se tomará del suelo C.

Tabla 4.5-2 — Coeficientes de sitio F_v

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]	1.0	1.0	1.0	1.0
E	1.0	1.0	1.0	1.0
F	Se requiere evaluación específica - ver Sección 4.4			

Fuente: AGIES. *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Consultado el 18 de junio de 2020.

Tabla VI. Factores N_a y N_v

Tabla 4.6.2-2 — Factor N_a para periodos cortos de vibración

Tipo de fuente	Distancia horizontal más cercana a fuente sísmica ^[1]		
	≤ 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

[1] Tomar distancia horizontal a la proyección horizontal de la fuente sísmica sobre la superficie; no considerar las porciones del plano de falla cuya profundidad exceda 10 km.
[2] Utilizar el mayor factor N_a obtenido al cotejar todas las fuentes relevantes.

Tabla 4.6.2-3 — Factor N_v para periodos largos de vibración

Tipo de fuente	Distancia horizontal más cercana a fuente sísmica ^{[1][2]}			
	≤ 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. *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Consultado el 18 de junio de 2020.

3. ANÁLISIS Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO

3.1. Especificación de parámetros sísmicos

La finalidad de este análisis fue determinar el tipo de dispositivo pasivo de protección sísmica que, económica y funcionalmente, se adecuara de mejor forma a las necesidades de rehabilitación del edificio hospitalario objeto de esta investigación. Para ello, los cortantes en la base y los desplazamientos y las derivas originadas en la superestructura del actual edificio con cimentación, se compararon con los obtenidos incorporando inicialmente aisladores y luego, empleando amortiguadores viscosos. Para cada análisis se emplearon los siguientes valores:

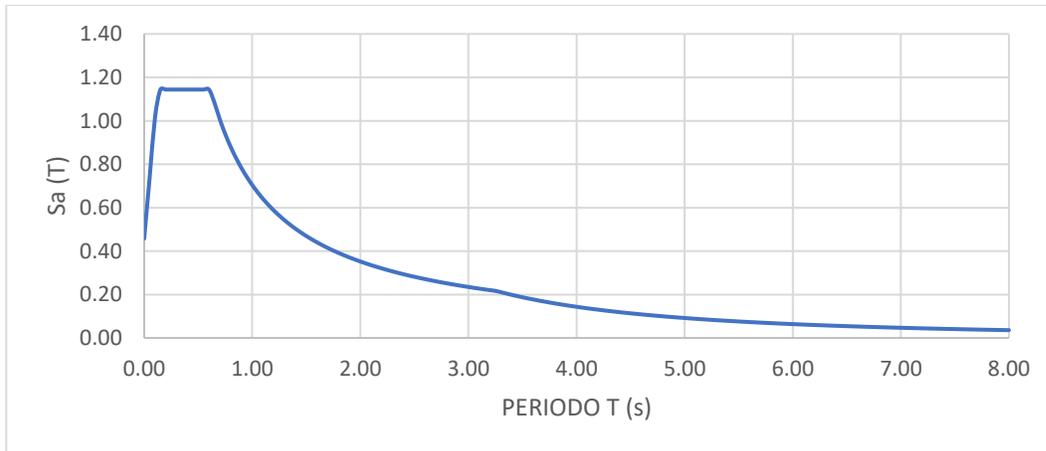
Tabla VII. **Tabla resumen parámetros espectro de diseño**

Parámetro	Valores
Índice de Sismicidad del Sitio (I_0)	4.10
Ordenada Espectral de período Corto (S_{CR})	1.43
Ordenada Espectral de período 1 s (S_{1R})	0.88
Coficiente de Sitio para período de vibración corto (F_A)	1.00
Coficiente de Sitio para período de 1 s (F_V)	1.00
Factor de determinación de niveles de diseño (K_D)	0.80
Período que separa valores cortos y largos (T_S)	0.62
Período que marca el inicio de la meseta de períodos cortos (T_0)	0.12
Período que marca decaimiento doble-exponencial en períodos largos (T_L)	3.26
Espectro calibrado para nivel de diseño requerido, período corto (S_{CD})	1.14
Espectro calibrado para nivel de diseño requerido, períodos largos (S_{1D})	0.70
Componente vertical del sismo de diseño (S_{VD})	0.23

Fuente: elaboración propia.

La siguiente gráfica muestra la configuración del espectro de diseño calculado con estos parámetros:

Figura 33. **Espectro de diseño**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Descripción del edificio

Se diseñará un edificio hospitalario de concreto reforzado de cuatro plantas sobre el nivel del suelo destinadas a uso de clínicas, quirófanos y encamamientos y un sótano utilizado como bodega y parqueos. Se localiza en la ciudad de Guatemala y su construcción data del año de 1948. Su altura es de 17.30 m; 14.00 m corresponden a la super estructura y la subestructura (sótano) tiene una altura de 3.30 m. Tiene un área de construcción de 3,422.76 m². El sótano queda confinado entre paredes perimetrales y la cimentación consiste en zapatas aisladas y vigas conectoras. La losa tiene 0.12 m de espesor; las vigas principales son de 0.39 x 0.60 m; y las dimensiones de sus marcos con columnas van desde 0.39x0.50 m hasta 0.39 x 0.70m.

Figura 36. Sección transversal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2020.

El concreto del edificio, según los planos originales, es de 215.00 kg/cm² (3000.00 psi). Para efectos de este estudio y considerando que tiene más de 70 años de antigüedad, se asumió un valor de 280.00 kg/cm² (4000.00 psi).

Los niveles se encuentran destinadas a uso hospitalario y la descripción de las cargas a utilizar se muestran a continuación:

Tabla VIII. **Consideraciones de cargas**

Tipo	Descripción de carga	kg/m²
Carga muerta	Techo	175.00
	Entrepisos	250.00
Carga viva	Techos sin acceso	100.00
	Clínicas y encamamiento	250.00
	Pasillos	500.00

Fuente: elaboración propia, datos extraídos de AGIES (2018).

Debido a la falta de un estudio de suelos, se considera un suelo tipo D, como lo dispone la NSE.

3.3. Diseño estructural del edificio

Con el análisis estructural se buscó obtener las siguientes magnitudes: cortante, desplazamientos y derivas máximas. Para ello, se utilizaron dos normas distintas: para el cálculo de base fija se empleó la norma nacional AGIES NSE (2018), sin embargo, debido a la falta de normativa y de literatura en el país para las estructuras que emplean un método de aislación sísmica, se utilizó lo establecido por la norma estadounidense ASCE 7-16.

En cuanto a los mecanismos de evaluación y medición de las deformaciones que se producen en el plano horizontal, las derivas, ocasionadas por el movimiento lateral del edificio, permiten calcular el desplazamiento relativo resultante entre dos puntos ubicados sobre la misma alineación vertical de dos niveles consecutivos, siendo el máximo valor permisible, de acuerdo con la normativa AGIES NSE3 para una obra esencial de marcos concreto, 0.002727.

Tabla IX. **Derivas últimas tolerables**

Estructura	Clasificación de obra		
	Categoría II	Categoría III	Categoría IV
Edificaciones NSE 7.4	0.007h _p	0.007h _p	0.007h _p
Edificaciones NSE 7.9	0.010h _p	0.010h _p	0.010h _p
Edificaciones en general	0.020h _p	0.020h _p	0.015h _p

h_p es la altura del piso para el que se calcula la deriva.^[1]

Fuente: AGIES. *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Consultado el 19 de junio de 2020.

3.3.1. Análisis sismorresistente del edificio existente

Cuando se trata de marcos rígidos de concreto, la norma NSE 3 asigna un valor igual a 8 al factor de reducción (R).

El análisis modal correspondiente a este modelo contó con 12 patrones de vibración (modos), alcanzando el 98 % del total de su masa. El primer patrón consiguió el 48 % de participación de masa en la dirección Y, el segundo en dirección X con 78 % y el tercero un modo torsional que alcanzó el 80 % del total de la masa. El periodo de la estructura fue de 0.57 segundos.

Tabla X. **Proporciones de masas de participación modal estructura existente**

Modo	Periodo (seg)	U _x	U _y	SumU _x	SumU _y	RZ	SumRz
1.00	0.57	0.00	0.48	0.00	0.48	0.31	0.31
2.00	0.50	0.78	0.01	0.79	0.48	0.00	0.31
3.00	0.41	0.00	0.31	0.79	0.79	0.49	0.80

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

El cortante en X fue 358.94 toneladas y de 410.11 toneladas para la dirección Y.

Tabla XI. **Cortantes de estructura existente**

Nivel	V _x (Ton)	V _y (Ton)
LOSA 5 - AZOTEA	47.85	62.84
LOSA 4 - NIVEL 4	110.56	145.15
LOSA 3 - NIVEL 3	231.08	272.02
LOSA 2 - NIVEL 2	319.87	367.14
LOSA 1 - NIVEL 1	358.94	410.11

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

En la azotea se registraron los desplazamientos máximos en X e Y, siendo de 2.29 y 4.84 cm, respectivamente.

Tabla XII. **Desplazamientos de estructura existente**

Nivel	U _x (cm)	U _y (cm)
LOSA 5 - AZOTEA	2.29	4.84
LOSA 4 - NIVEL 4	1.93	4.09
LOSA 3 - NIVEL 3	1.47	3.16
LOSA 2 - NIVEL 2	1.00	2.04
LOSA 1 - NIVEL 1	0.41	0.77

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

Las derivas máximas en la estructura se obtienen en el nivel 2 para ambas direcciones, siendo: 0.001733 en X (que representa un 63.54 % del máximo valor tolerable) y 0.00364 en Y (excedida en 33.47 %).

Tabla XIII. **Relación de derivas de estructura existente**

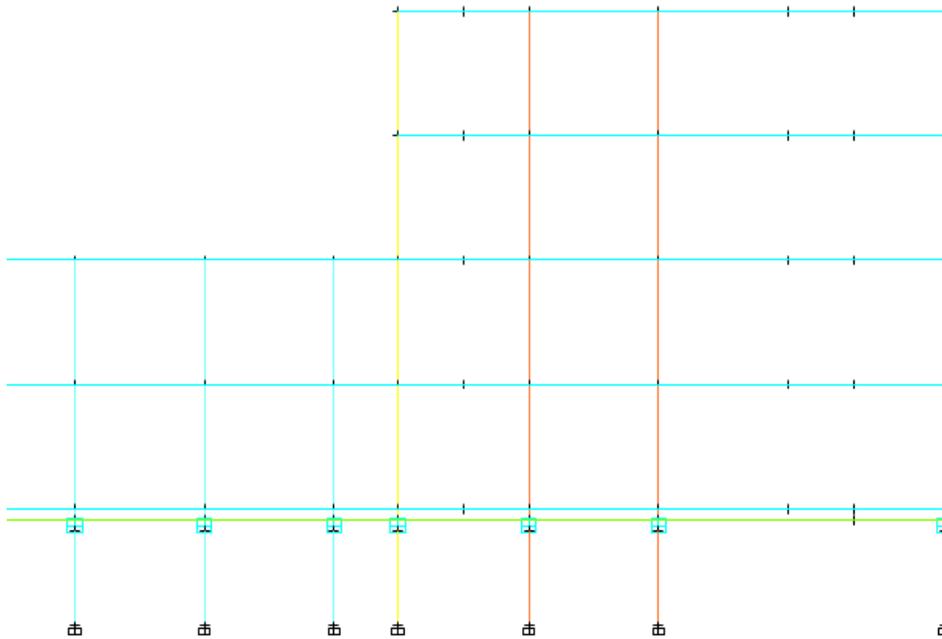
Nivel	Deriva Δ_x	Deriva Δ_y
LOSA 5 - AZOTEA	0.00123	0.002244
LOSA 4 - NIVEL 4	0.001451	0.002703
LOSA 3 - NIVEL 3	0.001371	0.003224
LOSA 2 - NIVEL 2	0.001733	0.00364
LOSA 1 - NIVEL 1	0.001265	0.002329

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

3.3.2. Análisis del edificio con aisladores elastoméricos

En este análisis la interfaz de aislación se ubicó por debajo del primer nivel de la estructura. Se colocaron 67 aisladores elastoméricos por debajo de las columnas que transmiten la carga entre la superestructura y la subestructura, lo cual requirió, además de realizar obras preliminares para efectuar la separación de tales elementos y construir vigas rectangulares de 0.25 x 0.30 m a nivel de la interfaz, colocar juntas horizontales en las fachadas, cajas de escaleras y elevadores, así como en otros componentes arquitectónicos y equipos que necesitan adosarse a la estructura.

Figura 37. **Sección de ubicación aisladores**



Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

Las propiedades que se emplean para diseñar este tipo de dispositivos son:

- Capacidad de carga (σ_{AC}): 10 MPa (102 kg/cm²)
- Deformación última de corte: 500 %
- Módulo de cortante (G): 1 MPa (10.19 kg/cm²)
- Amortiguamiento efectivo: 12 %
- Período objetivo (TD): 2.30 segundos
- Espesor de capas (t): 8 mm
- Masa soportada: 3,237.68 ton

Para la implementación de los aisladores en el modelo ETABS, fue necesario poner mayor énfasis en la rigidez efectiva, rigidez vertical, área y altura de los dispositivos.

La rigidez efectiva total se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$K_T = M * \left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2 = 3,237.68 \text{Ton} * \left(\frac{2\pi}{2.30 \text{s}}\right)^2 = 24,162.28 \text{ kN/m} \quad (1)$$

Mientras que la sumatoria de las rigideces de todos los aisladores completa la rigidez del sistema, con la relación que se desarrolla a continuación se consigue la rigidez propia de cada uno:

$$K_h = \frac{K_T}{N} = \frac{24,162.28 \text{ kN/m}}{67} = 360.63 \text{ kN/m} \quad (2)$$

El área total requerida por el sistema de aislación se consigue con la ecuación:

$$A_T = \frac{P_{max}}{\sigma_{AC}} = \frac{3,237.68 \text{ Ton} * 9.81 \text{ m/s}^2 * 1.4}{10 \text{ MPa}} = 4.45 \text{ m}^2 \quad (3)$$

Por lo que el área individual de cada uno se consigue con la ecuación:

$$A = \frac{A_T}{N} = \frac{4.45 \text{ m}^2}{67} = 0.066 \text{ m}^2 \quad (4)$$

Para ello se requiere usar aisladores cuadrados de 25 x 25 cm o aisladores circulares con diámetro de 30 cm.

Para obtener el espesor de caucho del aislador se utiliza la ecuación

$$e = \frac{G \cdot A}{K_T} = \frac{1 \text{MPa} \cdot 4.45 \text{m}^2}{24,162.28 \text{kN/m}} = 0.18 \text{m} \quad (5)$$

Esto requiere 23 capas de 8mm cada una, a lo cual se le debe adicionar el espesor total de las láminas metálicas que conforman el aislador.

La rigidez vertical se obtiene mediante la siguiente ecuación, donde el período en la dirección vertical no debe ser mayor a 0.1 segundos:

$$K_v = M * \left(\frac{2\pi}{T_v}\right)^2 = 3,237.68 \text{ Ton} * \left(\frac{2\pi}{0.1}\right)^2 = 12,781,848.31 \text{ kN/m} \quad (6)$$

El valor de la relación K_v y K_T debe ser igual o mayor a 50, lo que efectivamente se cumple.

El análisis modal correspondiente a este modelo contó con 12 patrones de vibración (modos), alcanzando el 98 % del total de su masa. El primer patrón consiguió el 69 % de participación de masa en la dirección Y, el segundo en dirección X con 97 % y el tercero un modo torsional que alcanzó el 98 % del total de la masa. El periodo de la estructura fue de 1.61 segundos.

Tabla XIV. **Proporciones de masas de participación modal de estructura aislada**

Modo	Periodo (seg)	Ux	Uy	SumUx	SumUy	RZ	SumRz
1.00	1.61	0.01	0.63	0.01	0.63	0.34	0.34
2.00	1.57	0.97	0.01	0.98	0.65	0.00	0.34
3.00	1.45	0.00	0.33	0.98	0.98	0.64	0.98

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

El cortante en X es de 328.78 toneladas y en Y de 328.83 toneladas.

Tabla XV. **Cortantes de estructura aislada**

Nivel	V _x (Ton)	V _y (Ton)
LOSA 5 - AZOTEA	21.01	23.03
LOSA 4 - NIVEL 4	58.31	63.92
LOSA 3 - NIVEL 3	150.49	152.89
LOSA 2 - NIVEL 2	245.80	246.78
LOSA 1 - NIVEL 1	328.78	328.83

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

Los desplazamientos máximos del edificio se obtienen en el nivel de la azotea, siendo X = 11.02 e Y = 15.02 cm.

Tabla XVI. **Desplazamientos de estructura aislada**

Nivel	U _x (cm)	U _y (cm)
LOSA 5 - AZOTEA	11.02	15.02
LOSA 4 - NIVEL 4	10.84	14.71
LOSA 3 - NIVEL 3	10.58	14.29
LOSA 2 - NIVEL 2	10.27	13.74
LOSA 1 - NIVEL 1	9.87	13.11

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

Las derivas máximas en la estructura se obtienen en el nivel 2 para ambas direcciones, siendo en X (63.54 %) de 0.001147 y en Y de 0.001428 (52.36 %). El valor expresado entre los paréntesis se refiere porcentaje con respecto a la deriva máxima tolerable.

Tabla XVII. **Relación de derivas de estructura aislada**

Nivel	Deriva Δ_x	Deriva Δ_y
LOSA 5 - AZOTEA	0.000578	0.000775
LOSA 4 - NIVEL 4	0.000789	0.001045
LOSA 3 - NIVEL 3	0.00091	0.001221
LOSA 2 - NIVEL 2	0.001147	0.001428
LOSA 1 - NIVEL 1	0.00065	0.001136

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

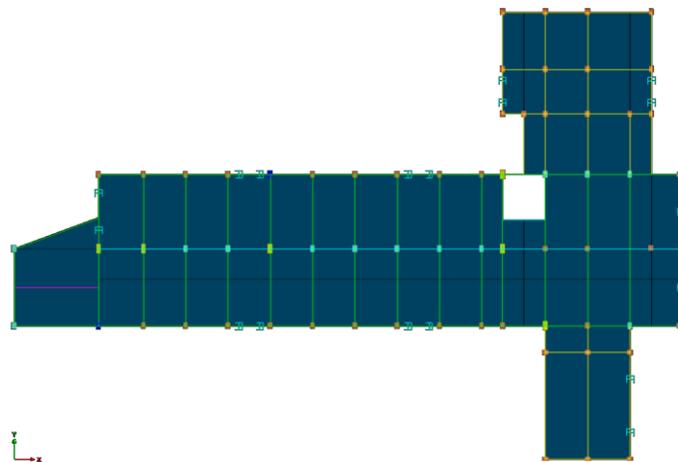
3.3.3. Análisis del edificio con disipadores de energía

27 amortiguadores viscosos fueron colocados en diagonal a lo largo del perímetro de los primeros tres niveles para este análisis. De estos, 15 fueron ubicados longitudinalmente y 12 transversalmente a fin de minimizar las derivaciones torsionales. Para su instalación se requiere la adaptación de un refuerzo adicional a la viga mediante anclajes y planchas metálicas.

Los amortiguadores utilizados en este modelo corresponden a los producidos por Taylor Devices Inc. de EE. UU., que desde la década de los 90 se dedica a la fabricación de estos dispositivos; las propiedades de estos se presentan a continuación:

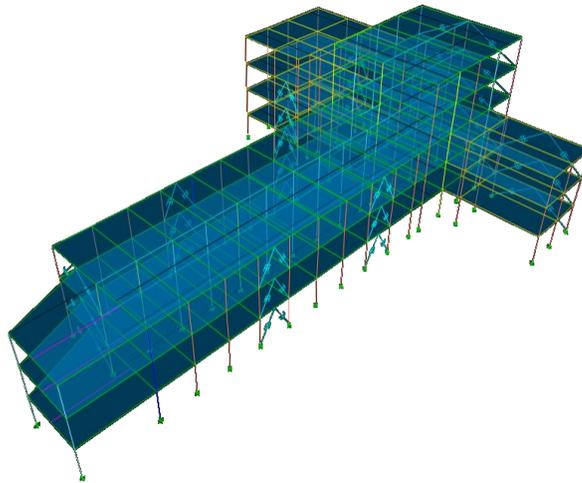
- Constante de amortiguamiento, $C = 100 \text{ kip}^*(\text{s/in})^c$
- Rigidez, $K = 2000 \text{ kip/in}$
- Exponente de velocidad, $\alpha = 0.5$

Figura 38. Planta de ubicación disipadores de energía



Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

Figura 39. **Modelo 3D con disipadores de energía**



Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

El análisis modal correspondiente a este modelo contó con 12 patrones de vibración (modos), alcanzando el 98 % del total de su masa. El primer patrón consiguió el 48 % de participación de masa en la dirección Y, el segundo en dirección X con 78 % y el tercero un modo torsional que alcanzó el 80 % del total de la masa. El periodo de la estructura fue de 0.57 segundos.

Tabla XVIII. **Proporciones de masas de participación modal de estructura aislada**

Modo	Periodo (seg)	Ux	Uy	SumUx	SumUy	RZ	SumRz
1.00	0.57	0.00	0.48	0.00	0.48	0.31	0.31
2.00	0.50	0.78	0.01	0.79	0.48	0.00	0.31
3.00	0.41	0.00	0.31	0.79	0.79	0.49	0.80

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

El cortante en la base de la estructura es de 286.41 toneladas para la dirección X y de 359.37 toneladas para la dirección Y.

Tabla XIX. **Cortantes de estructura con disipadores de energía**

Nivel	V _x (Ton)	V _y (Ton)
LOSA 5 - AZOTEA	38.18	55.06
LOSA 4 - NIVEL 4	88.22	127.19
LOSA 3 - NIVEL 3	184.38	238.37
LOSA 2 - NIVEL 2	255.24	321.72
LOSA 1 - NIVEL 1	286.41	359.37

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

Los desplazamientos máximos del edificio se obtienen en el nivel de la azotea, siendo X = 1.83 cm e Y = 4.24.

Tabla XX. **Desplazamientos de estructura con disipadores de energía**

Nivel	U _x (cm)	U _y (cm)
LOSA 5 - AZOTEA	1.83	4.24
LOSA 4 - NIVEL 4	1.54	3.59
LOSA 3 - NIVEL 3	1.17	2.77
LOSA 2 - NIVEL 2	0.80	1.79
LOSA 1 - NIVEL 1	0.33	0.67

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

En ambas direcciones del nivel 2 de este modelo se obtienen las máximas derivas, siendo de 0.001436 en la dirección X (que representa un 52.65 % de la máxima deriva tolerable) y en la dirección Y de 0.0024 (lo que es un 88.00 % de la máxima deriva tolerable).

Tabla XXI. **Relación de derivas de estructura con disipadores de energía**

Nivel	Deriva Δ_x	Deriva Δ_y
LOSA 5 - AZOTEA	0.001086	0.001657
LOSA 4 - NIVEL 4	0.00145	0.001991
LOSA 3 - NIVEL 3	0.001137	0.002065
LOSA 2 - NIVEL 2	0.001436	0.0024
LOSA 1 - NIVEL 1	0.001046	0.001545

Fuente: elaboración propia, extraída de ETABS 18.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

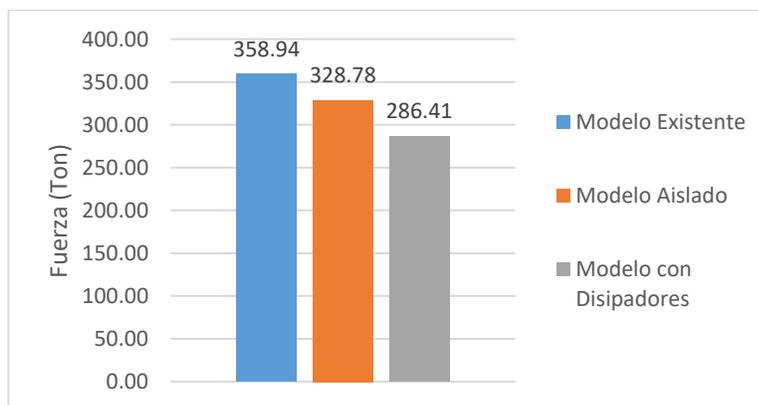
4.1. Análisis funcional

La rehabilitación del edificio analizado pretende sobrepasar los criterios y parámetros sísmicos que la normativa sismorresistente de esa época permitía, la cual consentía daños estructurales significativos en beneficio de salvaguardar la vida de sus ocupantes. De hecho, la finalidad de este estudio fue determinar el tipo de dispositivo pasivo de protección sísmica que se adapte económica y funcionalmente de mejor forma a las necesidades de rehabilitación y así, evitar la interrupción de cualquiera de los servicios hospitalarios al ocurrir un sismo severo. Esto requirió obtener, inicialmente, el cortante que se producía a ras de los cimientos, así como los desplazamientos y las derivas originadas en cada nivel de la superestructura, para luego compararlos con los conseguidos al emplear aisladores y posteriormente, amortiguadores viscosos.

Por un lado, la colocación de aisladores elastoméricos tiene como propósito desplazar la superestructura horizontalmente para conseguir la ampliación del período fundamental y lograr una disminución de las fuerzas y aceleraciones producidas por un sismo. Por su parte, la amortiguación de los *dampers* no añade rigidez a la estructura, no soportan ninguna carga estática y funcionan solo cuando se oponen al movimiento que varía con la velocidad; cuanto mayor es la velocidad, mayor es la fuerza de resistencia que se produce. En ambos casos, el control sobre los límites máximos de las derivas tolerables es de gran importancia para conseguir un comportamiento sísmico más estable del edificio y limitar el daño a los componentes no estructurales, los cuales son altamente vulnerables a las incursiones post elásticas durante sismos prolongados y/o de gran intensidad.

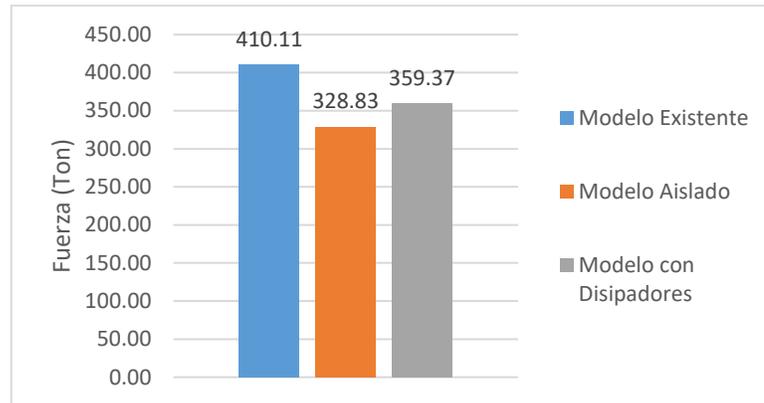
El parámetro con el cual se calcularon y evaluaron tanto desplazamientos como -derivadas de diseño- fue cortante a ras de los cimientos. El gráfico a continuación presenta los valores de este sobre los ejes X-Y. Puede distinguirse que el comportamiento del edificio en cada eje se manifiesta de formas muy diferentes. Mientras en la parte aislada se registran disminuciones en $X = 30.16$ Ton (8.4 %) e $Y = 81.28$ Ton (19.8 %), el sistema amortiguado presenta una mayor reducción en $X = 72.53$ Ton (20.2 %), que en $Y = 50.74$ Ton (12.4 %). Esto indica que la interfaz de aislación transmite menores esfuerzos cortantes y amortigua una considerable carga sísmica en el eje Y, el más crítico. El periodo fundamental, tanto en la estructura existente como en el modelo con amortiguadores, fue de 0.57 segundos, mientras en el de base aislada alcanzó 1.61 segundos de los 2.30, el periodo objetivo.

Figura 40. **Cortante basal en dirección X**



Fuente: elaboración propia.

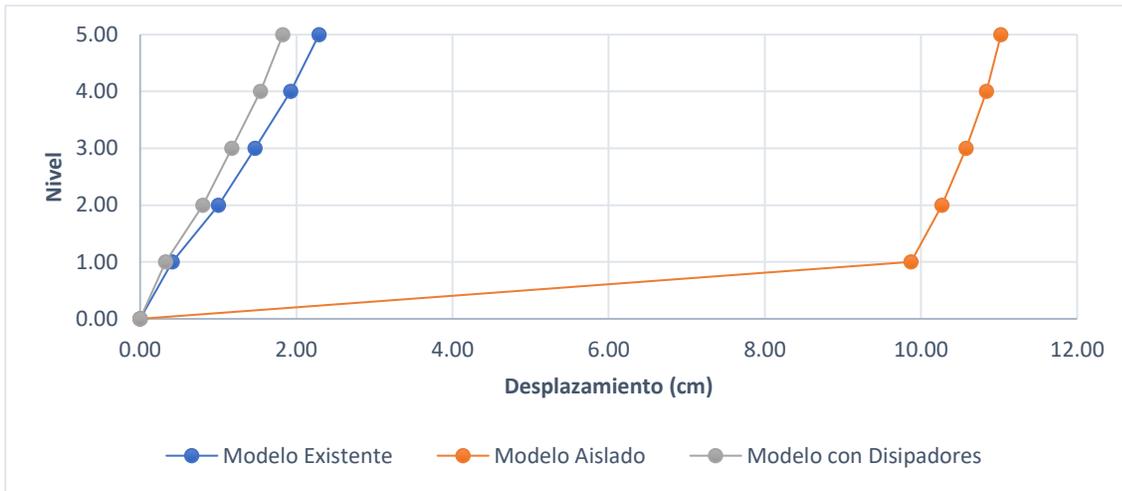
Figura 41. Cortante basal en dirección Y



Fuente: elaboración propia.

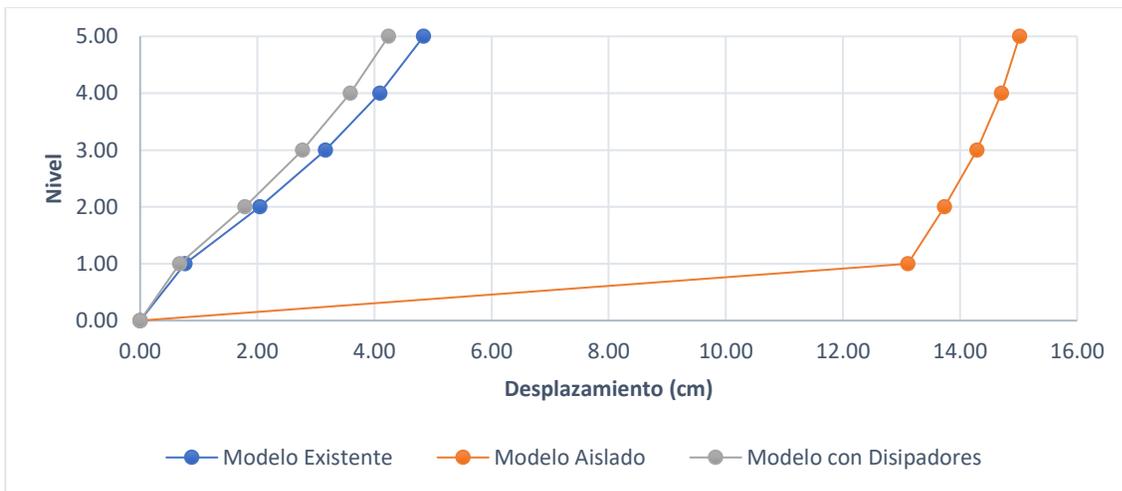
Los gráficos a continuación distinguen dos concentraciones de desplazamientos laterales: un desplazamiento elástico circunscrito al límite de cedencia de la edificación existente y del modelo con amortiguadores, seguido por un desplazamiento mayor que permite a la superestructura alcanzar magnitudes que solo se lograrían en el rango post elástico. En este sentido, ambos gráficos muestran los desplazamientos (cm) que se presenta en cada nivel del edificio dentro del rango elástico. Se observa que la instalación de amortiguadores vuelve más rígida la estructura, lo cual restringe el desplazamiento máximo en la azotea: $X = 0.46$ cm e $Y = 0.60$ cm. Por el contrario, la base aislada le otorga mayor flexibilidad a la superestructura, obteniendo mayores desplazamientos relativos: 8.73 cm (381.2 %) en X y 10.18 cm (210.3 %) en Y.

Figura 42. Desplazamientos por nivel en dirección X



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Desplazamientos por nivel en dirección Y



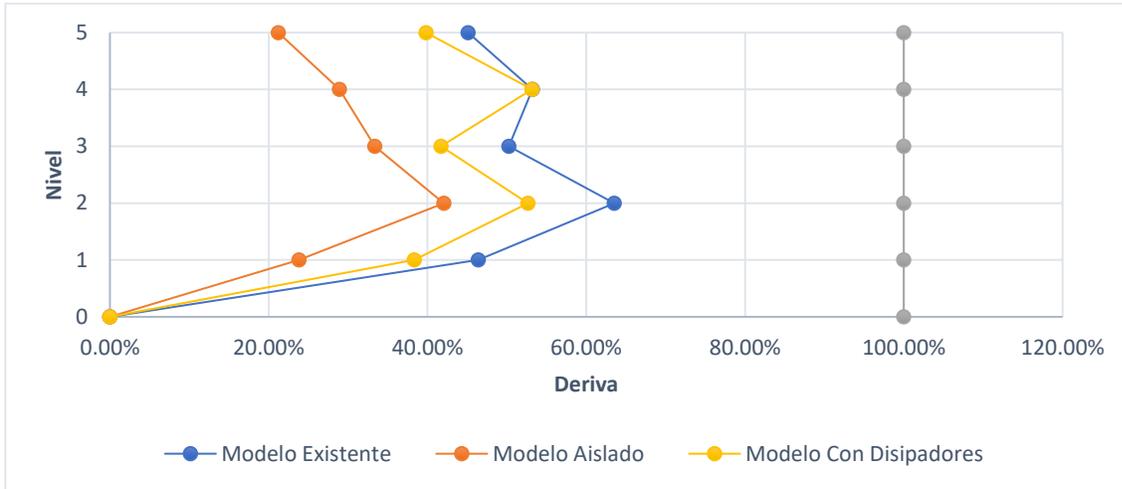
Fuente: elaboración propia.

Con la intención de prevenir daños considerables, las deformaciones horizontales se centran más en las derivas que en los desplazamientos absolutos

producidos lateralmente, ya que las mismas determinan los límites para que una estructura conserve su integridad o presente un daño colateral aceptable, en virtud de estar directamente asociadas con la rigidez de la edificación, aunque pueden admitir el desarrollo de deformaciones significativas a causa de un comportamiento inelástico. Es importante destacar que el control de las deformaciones horizontales se vuelve más rígido a medida que las limitaciones de deriva se tornan más rigurosas. Así, en función de la clasificación y la tipología de la edificación, AGIES NSE establece las derivas últimas máximas, las cuales se convierten en los máximos valores admisibles para cada sistema estructural.

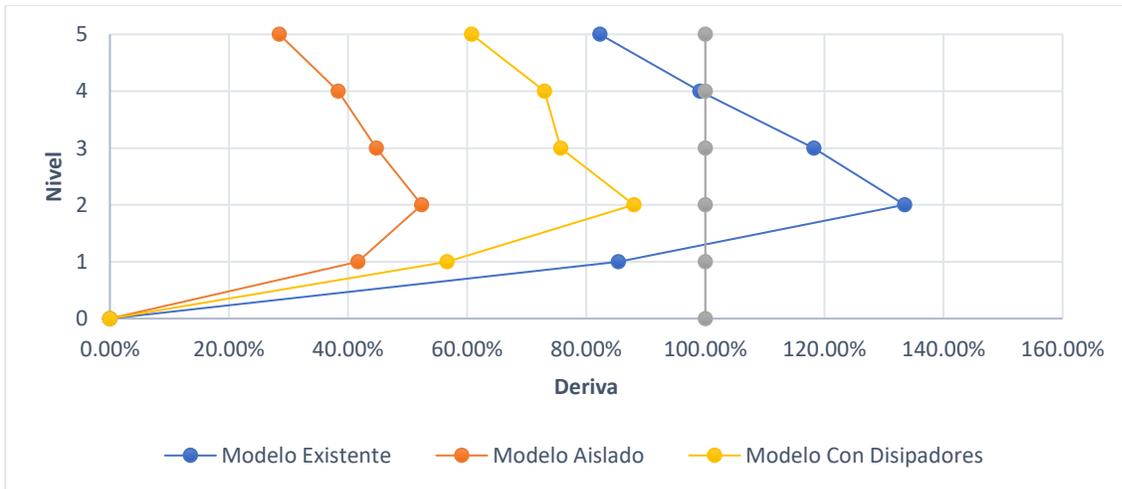
Los siguientes gráficos muestran en porcentaje las derivas producidas en ambas direcciones (X-Y) de cada nivel del edificio, siendo, según lo establece la norma NSE, 0.002727 el 100%. Nótese que las derivas en la estructura aislada y en el modelo con amortiguadores viscosos son considerablemente menores a las del edificio existente. Por lo tanto, ambos sistemas de protección sísmica se adaptan a las necesidades de rehabilitación y mantienen a la estructura dentro de los rangos aceptables de previsión de daños post sismo. Queda únicamente determinar cuál de los dos resulta económica más favorable, lo cual se trata en el siguiente análisis.

Figura 44. Deriva en dirección X



Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Deriva en dirección Y



Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis económico

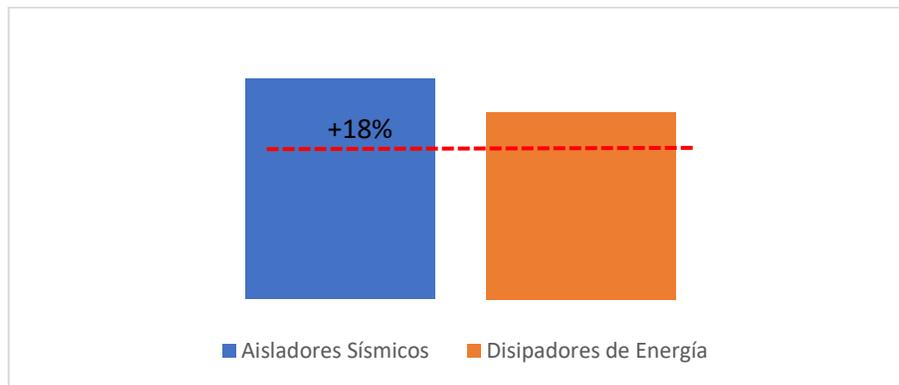
En Guatemala, la normativa sismorresistente vigente acepta que se produzca un cierto nivel de daño estructural cuando ocurren sismos extremos y de mediana magnitud, lo cual acarrea consecuencias funcionales y económicas muy negativas al momento de llevar a cabo los trabajos de reparación. Disipar la tremenda energía de un sismo, infringiéndole daños a la estructura en zonas y elementos previamente definidas en el diseño, era la tecnología que hace más de 50 años. En la actualidad, las nuevas tecnologías permiten disipar la energía a través de diferentes mecanismos que llevan a la estructura, más allá de su límite elástico.

Como se mencionó anteriormente son muchas las variables para la cuantificación económica de un proyecto, especialmente cuando se trata de una rehabilitación estructural. Por esta razón y para simplificar este proceso, se compararon los costos del mismo edificio inicialmente utilizando aisladores elastoméricos y luego, habiéndosele instalado disipadores de fluido viscoso. A pesar de que los precios de tales dispositivos son muy similares, se debe considerar la diferencia entre los costos derivados de su instalación, mantenimiento y aquellos otros ocasionados por la construcción, el reforzamiento o la reparación de columnas, techos, vigas y otros, ya sea donde se vayan a anclar los disipadores o donde irá colocado el diafragma de aislación.

Para el análisis con aisladores sísmicos se colocó un dispositivo por columna, teniendo un total de 67 aisladores debajo del nivel de plaza; el precio aproximado de cada dispositivo es de \$7,500.00. En el análisis con disipadores viscosos se utilizó un total de 58 instalados alrededor del perímetro del edificio, con un precio que ronda entre los 5 y \$10,000. La siguiente gráfica muestra que,

si a este edificio se le colocaran aisladores en vez de disipadores, se requeriría una inversión mayor del 18 %.

Figura 46. **Costo de inversión**



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, es posible determinar los costos de reparación según el estado de daño del edificio. De hecho, según el criterio de diversos autores, conforme mayor sea la deformación de entrepiso, mayor será el daño ocasionado a la edificación; y luego asocian el alcance de estos daños con los costos que representaría su reparación. La siguiente tabla muestra de forma resumida esta relación.

Tabla XXII. Estado de daño - deformación de entrepiso

Estado de daño	Estado / límite	Descripción del daño	Deformación de entrepiso %
Ninguno	Elástico	Sin daño estructural y no estructural visible	< 0.2
Leve	Agrietamiento	Posible reparación de elementos no estructurales	0.2 - 0.5
Moderado	Fluencia	Requiere reparaciones sin demoler o reemplazar elementos estructurales	0.5- 1.0
Fuerte	Ruptura, pandeo y/o aplastamiento	Daño estructural que requiere la demolición de grandes áreas o el reemplazo del edificio	> 1.0

Fuente: Mosalem (1997). *Seismic Fragility of LRC Frames with and without masonry infill walls. Journal of Earthquake Engineering.*

Las máximas derivas tolerables en ambos modelos son menores a los límites permitidos según AGIES; al edificio aislado le corresponde el 50 % de este valor y para el mismo edificio con disipadores es de 88 %. Tomando en cuenta que la máxima deriva en el edificio existente excede un 33 % del límite permitido, se obtiene una reducción del 80 % para el modelo de aislado sísmicamente y de 45 % para el modelo con *dampers*. Como resultado, para el modelo con aisladores elastoméricos se obtiene una mayor reducción, por lo tanto, un nivel de daño ligero, mientras que, para el modelo con disipadores de energía, la reducción es menor, o sea, el nivel de daño se clasifica como moderado.

La siguiente tabla permite visualizar de mejor forma estos conceptos y apreciar que el edificio con aisladores, al sufrir un daño ligero tendría un costo de reparación equivalente al 5 % del valor actual del edificio, mientras que con amortiguadores sufriría un daño moderado y su costo de reparación aumentaría a 25 %. Debe tomarse en cuenta que el edificio en las actuales condiciones

sufriría un daño de severo a total, lo cual tendría un costo de reparación, en el mejor de los casos, no menor del 50 %.

Tabla XXIII. **Costo de reparación**

Nivel	Estado de daño en %	Descripción del daño	Costo de reparación con relación al valor de mercado del edificio
Ninguno	0	Sin daño	---
Ligero	0 - 5	Daño no estructural aislado	< 5 %
Moderado	5 - 25	Daño estructural ligero y no estructural considerable	< 25 %
Severo	25 - 50	Daño estructural considerable y no estructural excesivo	< 50 %
Total	50 - 100	Daño total	Más económico demoler que reparar
Colapso	> 100	Destrucción del edificio	Demolición y reemplazo del edificio

Fuente: Earthquake Engineering Research Institute. *Post-earthquake investigation field guide, Learning from earthquakes.*

Tomando en cuenta que el valor de mercado actual del m² construcción es de US\$ 2,500 y dado que el edificio analizado tiene un área construida de 3,422.76 m², su costo se estima en US\$ 8.857 millones. De esta forma, la siguiente tabla muestra el costo de reparación del edificio en relación con su actual valor de mercado y de acuerdo con la magnitud del daño sufrido, en la cual se aprecia la nueva inversión que monetariamente habría de hacerse y el ahorro que cada sistema de protección sísmica provee:

Tabla XXIV. Costo de reparación en millones US\$

Sistema de protección sísmica	% de daño	Descripción del daño	Costo de reparación con relación al valor de mercado del edificio	Ahorro
			Millones de US\$	
Aisladores elastoméricos	< 5	Daño no estructural aislado	0.427	3.851
Amortiguadores de fluido viscoso	< 25	Daño estructural ligero y no estructural considerable	2.139	2.139
Edificio sin protección	< 50	Daño estructural considerable y no estructural excesivo	4.278	0

Fuente: elaboración propia.

Dado que el proyecto de rehabilitación no pretende obtener un valor mercantil por objeto de la inversión, más bien, lo que procura es el beneficio social que presta el hospital al infringirle el menor daño a la estructura con el objeto de que continúe funcionando ininterrumpidamente durante y después de un sismo catastrófico (cuyo período de retorno es de 50 años), la decisión de optar por uno de los dos sistemas de protección sísmica debe basarse en otros criterios tales como la disposición económica para cubrir la inversión actual, la severidad del daño esperado y la capacidad económica para cubrir los costos de reparación en el futuro.

En sí, la prevención de daños a la edificación y su contenido (a veces de mayor valor que el de la propia estructura) ante un sismo bastante severo e incluso, evitar la demolición del edificio, recupera por mucho más el gasto que conlleva la instalación de este tipo de dispositivos, además que aumentan la confianza, la seguridad y las probabilidades de sobrevivencia de las personas que permanecen dentro o transitan en sus alrededores.

Algunos autores sugieren utilizar el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), dos herramientas que permiten visualizar cuantitativamente la conveniencia entre varios proyectos e interpretar el costo actual de cada opción.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_o \quad (7)$$

Donde:

Vt: Ingresos + egresos netos en periodo t

Io: Inversión inicial

n: Período de evaluación

k: Tasa de descuento

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n} = 0 \quad (8)$$

Donde:

Fn: Ingresos + egresos netos en el periodo

I: Tasa de descuento

N: Período de evaluación

La toma de decisión se basa en el resultado como se indica a continuación:

VAN > 0, se acepta el proyecto

VAN = 0, da igual aceptarlo o rechazarlo

VAN < 0, se debe rechazar el proyecto

TIR > TMA, se acepta el proyecto

TIR = TMA, da igual aceptarlo o

rechazarlo TIR < TMA, se debe

rechazar el proyecto

Donde TMA = Tasa Mínima Aceptable

Para ello, las siguientes tablas muestran los costos de inversión y de mantenimiento de cada sistema, que se refieren respectivamente, a las erogaciones que conlleva instalar y poner los dispositivos de protección sísmica en funcionamiento y a los gastos destinados a la preservación de tales dispositivos durante su vida útil, misma que se considera de 50 años, los que se han estimado por década.

Tabla XXV. **Costos de inversión y mantenimiento de un sistema aislado**

Costos de inversión	US\$				
Dispositivos (fabricación, prototipos y ensayos en obra)					
67 aisladores elastoméricos instalados debajo del nivel de plaza; precio unitario \$7,500	502,500				
Instalación (anclajes, montaje, nivelación, etc.)	100,500				
Remoción/reparación (pre y post instalación) de elementos y componentes arquitectónicos, sistema eléctrico, plomería, etc.	60,300				
Protección contra incendios	50,250				
Red de juntas de dilatación, conectores flexibles y otras tuberías para la acometida de energía eléctrica, agua potable, drenaje	70,350				
Adaptación del foso del ascensor y otras instalaciones especiales	65,325				
Diafragma, columnas u otros elementos para soportar la interfaz y aislar la superestructura de la cimentación y esta, de los muros de contención	175,875				
Total de la inversión	1,025,100				
	US\$ - Años de vida útil				
Costos de mantenimiento	10	20	30	40	50
Mantenimiento e inspecciones	14,500	21,750	29,000	43,500	58,000
Reemplazo de unidades debido al envejecimiento, abrasión y/o uso	725	1,088	1,450	2,175	2,900
Mecanismo paralelo para instalar y reemplazar unidades	36	82	145	326	580
Total de los egresos	15,261	22,919	30,595	46,001	61,480

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Costos de inversión y mantenimiento de un sistema de disipadores**

Costos de inversión		US\$				
Dispositivos (fabricación, prototipos y ensayos en obra)						
58 amortiguadores de fluido viscoso instalados en el perímetro del edificio; precio unitario \$5,000		290,000				
Instalación (anclajes, montaje, nivelación, etc.)		58,000				
Remoción/repación (pre y post instalación) de elementos y componentes arquitectónicos, sistema eléctrico, plomería, etc.		34,800				
Protección contra incendios		29,000				
Total de la inversión		411,800				
Costos de mantenimiento		US\$ - Años de vida útil				
		10	20	30	40	50
Mantenimiento e inspecciones		25,125	37,688	50,250	75,375	100,500
Reemplazo de unidades debido al envejecimiento, abrasión y/o uso		1,256	1,884	2,513	3,769	5,025
Mecanismo paralelo para instalar y reemplazar unidades		63	141	251	565	1,005
Total de los egresos		26,444	39,713	53,014	79,709	106,530

Fuente: elaboración propia.

La siguiente tabla resume y compara el total de egresos derivado de la instalación y operación durante su vida útil de cada sistema de protección sísmica.

Tabla XXVII. **Resumen y comparación de egresos por sistema de protección sísmica**

Concepto de los egresos	Aisladores elastoméricos	Amortiguadores de fluido viscoso
	Costos en US\$	
Total de la inversión	1,025,100	411,800
Total de egresos por mantenimiento en 50 años	176,257	305,410
Total de egresos	1,201,357	717,210

Fuente: elaboración propia.

Asumiendo que el valor de recuperación equivale al ahorro derivado de cada sistema de protección sísmica utilizado (Tabla 24- Costo de Reparación en millones de US\$) y, tomando en cuenta que una propiedad puede rendir un retorno de 4-6 % (sin considerar su plusvalía en este caso por no ser un inmueble a la venta), al aplicar la fórmula del Valor Actual Neto (VAN) se obtienen los siguientes resultados:

Tabla XXVIII. **Valor actual neto (VAN) en US\$ por sistema de protección sísmica**

Aisladores elastoméricos	Valores netos	VAN 4 %	VAN 5 %	VAN 6 %
Valor de recuperación	3.851,000	3.851,000	3.851,000	3.851,000
Total de egresos	1.201,357	1.194,577	1.192,963	1.191,379
TOTAL	1.397,883	1.398,837	1.399,064	1.399,287
Amortiguadores de fluido viscoso	Valores netos	VAN 4 %	VAN 5 %	VAN 6 %
Valor de recuperación	2.139,000	2.139,000	2.139,000	2.139,000
Total de egresos	717,210	705,463	702,667	699,923
TOTAL	611,895	613,548	613,942	614,328

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados, al ser mayores que cero (0) para las tasas de retorno calculadas, indican la factibilidad de poder usar cualquiera de los dos Sistemas de Protección Sísmica; al mismo tiempo, muestran la ventaja comparativa de cada uno al final de la vida útil a una determinada tasa.

A fin de formarse una mejor idea sobre cuál es el Sistema de Protección Sísmica más conveniente para instalar, se empleó la fórmula de la Tasa Interna de Retorno (TIR) con el objeto de interpretar el costo actual de cada opción. El cálculo se hizo utilizando únicamente la tasa de retorno del 4 % por ser la más baja, ya que se trata de un inmueble que no está a la venta, con los siguientes resultados.

Tabla XXIX. **Tasa interna de retorno (TIR) por sistema de protección sísmica**

	Aisladores elastoméricos		Amortiguadores de fluido viscoso	
	Valores netos	VAN 4 %	Valores netos	VAN 4 %
Valor de recuperación	3.851,000	3.851,000	2.139,000	2.139,000
Total de egresos	1.201,357	1,194,577	717,210	705,463
TIR	8.71 %	8.74 %	4.68 %	4.7 %

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, el modelo con aisladores elastoméricos es el Sistema de Protección Sísmica más conveniente de instalar, ya que el resultado de la TIR es muy superior a la tasa de retorno en ambas opciones.

CONCLUSIONES

Luego de haber profundizado en el estudio de una estructura existente y, determinado cuál es la mejor tecnología para su rehabilitación y mejorar el desempeño para resistir el impacto de terremotos, usando los códigos actualmente vigentes, se plantea lo siguiente:

1. Los amortiguadores o *dampers* son los mecanismos que se adaptan de mejor manera para proteger sísmicamente a las estructuras construidas en la ciudad de Guatemala con códigos antiguos, ya que además de ser efectivos mejorando el comportamiento de la edificación, no requieren de mayores modificaciones, son de fácil instalación y, en comparación a los dispositivos de aislación, la inversión económica es menor.
2. La ventaja económica de un edificio con aisladores elastoméricos radica en el ahorro que se genera al momento de su reparación, pues como se aprecia en los resultados obtenidos, la relación de los costos de reparación entre el uso de amortiguadores de fluido viscoso respecto al sistema de aislamiento sísmico es de 5 a 1, produciéndose una diferencia substancial de US\$ 1.712 millones, cantidad que cubre y rebasa en más de US\$ 0.5 millones los costos de inversión y mantenimiento durante su vida útil del sistema aislado.
3. A pesar de que los costos derivados de la instalación de los sistemas de aislación son bastante mayores al de los *dampers* o disipadores, a futuro, la inversión en reparaciones es sumamente menor. No obstante, establecer el monto total de la inversión en el sistema de protección

sísmica a utilizar, requiere haber precisado la importancia del edificio; siendo los hospitales instalaciones indispensables, este costo no se debería de escatimar.

4. Aunque la metodología de esta investigación ofrece una solución para la rehabilitación de todos aquellos hospitales construidos en Guatemala bajo normas que no consideran dispositivos de protección sísmica, su aplicación requiere revisar funcional, económica y constructivamente el sistema de protección sísmica que mejor se adapte en cada caso.
5. Los criterios de análisis y diseño estructural que dicta la norma guatemalteca AGIES NSE restringen los desplazamientos máximos o derivas de las estructuras, por el cual el edificio analizado no cumple con estos requerimientos sísmicos de las normativas actuales.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis particular para la rehabilitación de cada hospital nacional, debido a que en Guatemala la mayoría fueron diseñados en base a códigos antiguos.
2. Incluir, como una opción de diseño y rehabilitación de estructuras, tecnologías de protección sísmica en la normativa de seguridad estructural del país.
3. Promover y dar a conocer los diferentes dispositivos de protección sísmica a través de diversas instituciones como universidades, colegios profesionales, entre otros, para que ingenieros, inversionistas y empresarios del sector de la construcción conozcan y comiencen a emplear estas tecnologías en la construcción de nuevos edificios, así también, como para la rehabilitación de edificaciones, monumentos y otras estructuras existentes.

REFERENCIAS

1. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018). *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Guatemala: AGIES, 2018.
2. Aiken, I. (1998). *Testing of seismic isolators and dampers: considerations and limitations*. San Francisco, California: Proceedings, Structural Engineering World Congress.
3. Amaya, N. (2003). *Sistemas de control pasivos y activos de aislamiento de base para edificios sometidos a acciones sísmicas*. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte Barranquilla.
4. Arnold, C. (2016). *Seismic Safety Of The Building Envelope*. Building Systems Development Inc.
5. Barrios, O. (2019). *Disipadores histeréticos de energía sísmica*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
6. Bazan, E., y Meli, R. (2010). *Diseño sísmico de edificios*. México: Limusa, Noriega Editores.
7. Brebbia, C. A. (2007). *Earthquake Resistant Engineering Structures VI*. Gran Bretaña: Athenaem Press Ltd.
8. Espíndola, J. M. (1994). *Terremotos y ondas sísmicas*. UNAM.

9. Caicedo, I. M. (2014). *Períodos de vibración de las edificaciones*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 8-14.
10. Ingeniería Antisísmica CDV (2018). *AISLADORES SÍSMICOS CON NÚCLEO DE PLOMO*. Obtenido de CDVPERU: <https://www.cdvperu.com/disipadores-sismicos-taylor/>
11. Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2014). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. México: Secretaría de Gobernación.
12. Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*. México: Pearson Educación.
13. Clark, P., Aiken, I., Tajirian, F., Kasai, K., y Ko, E. a. (1999). *Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices*. Santa Barbara, California: Structural Engineers Association of California.
14. CORPORATION, O. (s.f.). *FPS Sliding Pendulum Type Seismic Isolation Device Friction Pendulum System*. Obtenido de CORPORATION, OILES: <https://www.oiles.co.jp/en/menshin/building/menshin/products/fps/>
15. Cuza, I. (2014). *Estudios de vulnerabilidad sísmica estructural de instalaciones hospitalarias: elemento imprescindible en la prevención de desastres*.

16. Dynamic Isolation System. (2007). *Aislamiento Sísmico Para Edificaciones y Puentes*. Nevada, USA: Dynamic Isolation System.
17. Earthquake Engineering Research Institute. (1996). *Post-earthquake investigation field guide, Learning from earthquakes*. Oakland California, Estados Unidos: Earthquake Engineering Research Institute.
18. Genatios, C., y Lafuente, M. (2006). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Caracas, Venezuela: Banco de Desarrollo de América Latina.
19. Genner Villareal, D. (2011). *Edificaciones con disipadores de energía*. Lima, Perú.
20. Godoy, V. (2011). *Evaluación del comportamiento sísmico de edificios altos diseñados mediante el método de diseño de desplazamientos (Tesis de Master)*. Catalunya, España: Universidad politécnica de Catalunya.
21. Guerra, Á. (2017). *Rehabilitación sísmica mediante métodos de aislación pasiva en edificio modelo*. Chile: Universidad de Talca.
22. Higahsino, M. (2009). *State of the Art of the Development and Applications of Seismic Isolation and Energy Dissipation Technologies for Buildings in Japan*. Japón: WIT Transactions on The Built Enviroment.

23. Jameel, M., y Jumaat, M. Z. (2011). *Seismic isolation in buildings to be a practical reality: Behavior of structure and installation technique*. Kuala Lumpur, Malaysia: Department of Civil Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.
24. Laboratorio de Ingeniería Sísmica. (18 de 10 de 2019). Universidad de Costa Rica. Obtenido de <http://www.lis.ucr.ac.cr/8>
25. León, I. (2017). *SISTEMAS MODERNOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA: AISLADORES SÍSMICOS*. Obtenido de https://issuu.com/engcaos/docs/ponencia_cip-ancash_2017
26. Martelli, A. (2009). *Progress of the Applications of Passive Antiseismic Systems*. WIT Transactions on The Built Environment.
27. Martínez, C. (2016). *Diseño de sistemas de disipación pasiva de energía para rehabilitar construcciones antiguas en zonas sísmicas validado mediante análisis dinámico no lineal*. Argentina: Computacional, Asociación Argentina de Mecánica.
28. Martínez, C. (2012). *Diseño óptimo de sistemas pasivos de disipación de energía en estructuras bajo excitación sísmica*. Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
29. Mosalem, K. (1997). *Seismic Fragility of LRC Frames with and without masonry infill walls*. Journal of Earthquake Engineering.
30. Okadan, K. (2014). *Structural Design of Nakanoshima Festival Tower*. Japón: International Journal of High-Rise Buildings.

31. Oviedo, I., y Duque, I. (2009). *Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas*. Colombia: Revista EIA.
32. Oviedo, I., y Duque, I. (2016). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*. Revista EIA.
33. Oviedo, J. (2015). *Protección sísmica y reforzamiento de edificaciones a través de sistemas no convencionales*. Colombia: 3er Simposio de ingeniería de materiales y estructuras.
34. Oviedo, J. A., y Duque, M. D. (2007). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*. Medellín, Colombia: Escuela de Ingeniería de Antioquia.
35. QUAKETEK. (2018). *Diseño Con Disipadores sísmicos a Fricción*. Obtenido de <https://www.quaketek.com/es/disenosismico-con-disipadores-a-friccion/>
36. Saiful, A. B., Jameel, M., y Zamin, M. (2011). *Seismic Isolation in Buildings to be a Practical Reality: Behavior of Structure and Installation Technique*. Journal of Engineering and Technology Research (Vol. 3).
37. Sauter, F. (1990). *Introducción a la sismología Primera Edición*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, San José.
38. Spencer, B. F., y Soong, T. T. (1999). *New Applications and Development of Active, Semi-active and Hybrid Control*

Thechniques for Seismic and Non-Seismic Vibrations in the USA.
Cheju, Korea: Proceedings of International Post-SMiRT Conference
Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and
Active Control of Vibration of Structures.

39. Spizzuoco, Occhiuzzi, y Serino. (2004). *Performance of a Semi-Active MR Control System for Earthquake Protection.* Canada: Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering.
40. Tarbuck, E. J., y Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física.* Madrid, España: 8ª ed. Prentice Hall.
41. Taylor Devices inc. (2020). *Fluid Viscous Dampers.* North Tonawanda, USA: Taylor Devices Inc.
42. Tecnológico Corporación de Desarrollo. (2012). *Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía.* Santiago de Chile, Chile: Cámara Chilena de la Construcción.
43. Vázquez, R. L. (2014). *Proceso de evaluación y elección del sistema de rehabilitación estructural, de un edificio de 16 niveles de concreto reforzado.* México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.