



UNIVERSIDAD CATÓLICA "ANDRÉS BELLO"
Vicerrectorado Académico
Dirección General de los Estudios de Postgrado
Área: Ingeniería
Programa: Especialización en Ingeniería Estructural

Trabajo Especial de Grado como requisito parcial para optar al Título de
Especialista en Ingeniería Estructural

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO CON PISO BLANDO INCORPORANDO DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO CAJA METÁLICA

AUTOR: ING. ARGENIS LÓPEZ
ASESOR: Dra. CAROLINA TOVAR
Caracas, Septiembre 2018

Caracas, 26 de Septiembre de 2018

Señores

Director y demás integrantes

Consejo de Área de Ingeniería

UCAB,

Presentes.-

Referencia: Aceptación de Asesor

Estimados Señores:

Por medio de la presente hago constar que he leído y revisado el borrador final del Trabajo Especial de Grado titulado **“EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO CON PISO BLANDO INCORPORANDO DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO CAJA METÁLICA”**, desarrollado por el Ing. Argenis Abraham López Ortiz, titular de la cédula de identidad número 18.853.782, como requisito parcial para optar al Título de **Especialista en Ingeniería Estructural**.

A partir de dicha lectura y revisión considero que el mencionado Trabajo Especial de Grado cumple con los requisitos y reúne los méritos suficientes para su evaluación exposición por parte del distinguido Jurado que tenga(n) a bien designar.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carolina Tovar', with a horizontal line underneath.

Ing. Carolina Tovar

Dra. en Ingeniería Estructural



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

www.ucab.edu.ve

Telf.: (0212) 407-56-24 Fax 407-43-52

Estudios de Postgrado

RF: J-00012156-5

ACTA DE EVALUACIÓN DE TRABAJO ESPECIAL DE GRADO ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Nosotros, Profesores CAROLINA TOVAR NATERA (Asesor) y MARÍA BARREIRO VAZQUEZ, designados por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería a los veintiseis días del mes de septiembre del año dos mil dieciocho, para conocer y evaluar en nuestra condición de jurado del Trabajo Especial de Grado "EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE CONCRETO REFORZADO CON PISO BLANDO INCORPORANDO DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO CAJA METÁLICA", presentado por el ciudadano López Ortiz, Argenis Abraham, C.I. N°. 18853782, para optar al grado de Especialista en Ingeniería Estructural.

Declaramos que:

Hemos leído el ejemplar del Trabajo Especial de Grado que nos fue entregado con anterioridad por la Dirección del Programa.

Reunidos a los diecinueve días del mes de noviembre del año dos mil dieciocho, en la sede de los Estudios de Postgrado de la Universidad Católica Andrés Bello, previa lectura y estudio del mencionado trabajo, hemos decidido convocar al estudiante con el fin de responder las preguntas que le formule el jurado. Hechas por nuestra parte las preguntas y aclaratorias correspondientes, se consideró formalizar el siguiente dictamen:

APROBADO

Hemos acordado calificar el Trabajo Especial de Grado con Veinte (20) puntos.

(Observaciones o declaratoria de recomendación)

En fe de lo cual, nosotros los miembros del jurado designado, firmamos la presente acta en Caracas, a los diecinueve días del mes de noviembre del año dos mil dieciocho.

Carolina Tovar Natera
C.I.: 12.310.796

María Barreiro Vazquez
C.I.: 3971.143



*A Argen, mi mamá, por ser mi pilar
fundamental, motivo de gran afecto,
cariño, amor y constante apoyo*

AGRADECIMIENTO

Expreso mis más sinceras gratitudes a aquellas personas que de una u otra manera han contribuido a la materialización de este trabajo de grado y poder cumplir y cerrar con broche de oro este ciclo en mi vida.

A Dios, a la Divina Pastora y a San José, motivo de gran devoción, por siempre estar presentes en mi camino iluminándome el camino y permitirme llegar hasta acá.

A mi madre, Msc. en Educación y Abogada Argen Ortiz, por sus consejos, recomendaciones y asesorías de vida.

A mi asesora, Dra. en Ing. Estructural Carolina Tovar, por su contribución valiosa y eficaz para la realización de este trabajo de grado.

A mis compañeros y amigos del postgrado; Carla Spinos, Orlando Chirinos y Tatiana Hernández, por vivir con ellos momentos gratos y haber hecho de este recorrido académico más ameno.

¡Muchas gracias por su incondicional apoyo!

ÍNDICE GENERAL

	pp.
RESUMEN	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE GRÁFICOS	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	6
1 EL PROBLEMA	6
1.1 Introducción.....	6
1.2 Planteamiento del Problema.....	6
1.3 Objetivos de la Investigación.....	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2. Objetivos Específicos.....	8
1.4 Justificación de la Investigación.....	8
1.5 Alcances y Limitaciones de la Investigación.....	10
CAPÍTULO II	11
2 MARCO TEÓRICO	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Antecedentes de la Investigación.....	11
2.3. Bases Legales.....	17
2.4 Bases Teóricas.....	19
2.4.1 Estructuras Irregulares.....	19
2.4.2 Piso Blando.....	22
2.4.3 Sistemas de Protección Sísmica.....	23
2.4.3.1 Sistema Pasivo.....	25
2.4.3.1.1 Sistemas de Disipación de Energía.....	26
2.4.3.1.1.1 Disipadores Histeréticos.....	26
2.4.3.1.1.1.1 Disipadores Metálicos.....	27
2.4.3.1.1.1.2 Disipadores Friccionantes	31
2.4.3.1.1.1.2 Disipadores Viscoelásticos.....	33
2.4.3.1.2 Aislamiento de Base.....	35
2.4.3.2 Sistema Activo.....	36
2.4.3.2.1 Amortiguadores de Masa u Oscilador	
Activo TDM.....	37
2.4.3.3 Sistemas Semi-Activos.....	39
2.4.3.4 Sistemas Híbridos.....	39
2.4.4 Métodos de Análisis para Estructuras con	
Amortiguadores o Disipadores de Energía.....	40
2.4.4.1 Método de Análisis con Integración en el	
Tiempo (Time History Analysis).....	40

2.4.5 Disipadores tipo Caja Metálica.....	41
2.4.5.1 Principio de Acción.....	43
2.4.5.2 Ventajas del Disipador de Energía tipo Caja Metálica.....	44
2.5 GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	45
CAPÍTULO III.....	43
3 MARCO METODOLÓGICO.....	43
3.1 Introducción.....	48
3.2 Consideraciones Generales.....	48
3.3 Diseño de las Fases Metodológicas.....	49
3.3 Listado de Actividades por Objetivos.....	47
3.4 Listado de Actividades por Objetivos.....	50
3.5 Modelado numérico de la estructura y de los disipadores de energía.....	51
3.5.1 Estructura y propiedades.....	51
3.6 Generación de los acelerogramas a utilizar.....	58
3.6.1 Parámetros del motor de búsqueda del PGMD.....	59
3.6.2 Generación y escogencia de los acelerogramas a utilizar.....	65
3.7 Procedimiento de diseño para la inclusión de los dispositivos de la estructura.....	73
CAPÍTULO IV.....	78
4 RESULTADOS.....	78
4.1 Introducción.....	78
4.2 Desplazamientos laterales por pisos.....	81
4.3 Derivas de entrepiso.....	84
4.4 Fuerzas cortantes.....	87
4.5 Análisis de los resultados.....	92
CAPÍTULO V.....	107
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
5.1 Introducción.....	107
5.2 Conclusiones.....	107
5.3 Recomendaciones.....	112
REFERENCIAS CONSULTADAS.....	114

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
DIRECCION GENERAL DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREA DE INGENIERIA
PROGRAMA: INGENIERIA ESTRUCTURAL

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA DE
CONCRETO REFORZADO CON PISO BLANDO INCORPORANDO
DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO CAJA METÁLICA**

Autor: Ing. Argenis López
Asesor: Dra. Carolina Tovar
Fecha: Septiembre, 2018

RESUMEN

En Venezuela es común que muchas edificaciones aporticadas presenten irregularidades en sus estructuras destacándose los pisos blandos en la planta baja; lo cual resulta muy perjudicial para la estructura durante un evento sísmico por desplazar considerablemente los entrepisos lateralmente. Una de las maneras para resolver este inconveniente es por medio del empleo de disipadores de energía, que son sistemas pasivos de protección sísmica ampliamente usados en el mundo en las edificaciones; sin embargo en el país no existen avances en la materia. El propósito de esta investigación es evaluar la respuesta sísmica de una estructura de concreto reforzado con piso blando incorporando disipadores de energía tipo Caja Metálica. El trabajo está dividido en cuatro fases metodológicas orientadas a cumplir los objetivos específicos presentados entre los cuales destacan; modular la estructura y los disipadores de energía: para ello se presenta una estructura hipotética que corresponde a una edificación aporticada de concreto reforzado de 5 niveles con piso blando en la planta baja, estableciéndose 2 configuraciones de ubicación de los disipadores de energía tipo Caja Metálica dentro de la estructura; la primera corresponde a ubicar los disipadores en los vanos externos y la segunda a ubicarlos en los vanos centrales de la estructura para evaluar su efecto. Posteriormente se analiza la edificación para obtener la respuesta de la estructura sin y con disipadores de energía tipo caja metálica bajo las 2 configuraciones descritas utilizando el método de análisis en el tiempo (Analysis Time History) por medio del programa especializado SAP 2000, donde se realizó el modelo numérico y los análisis de la estructura que abarcaron tiempos lineales y no

lineales (tipo de solución seleccionado método de integración directa Hilber-Hughes-Taylor); en el caso de los no lineales, la no linealidad abarcó sólo al disipador de energía que se modeló como “links” tipo “Multilinear plastic”. La estructura fue considerada en el rango lineal. Para evaluar los resultados en términos de sus desplazamientos laterales máximos, sus derivas de entrepiso y sus fuerzas cortantes, la estructura se sometió a una familia de 10 sismos de falla transcurrente con magnitudes entre 6 y 7,5 en la escala de Richter: 5 de fuente cercana y 5 de fuente lejana generados por la base de datos Pacific Earthquake Engineering Research Ground Motion donde se evidencia mayores desplazamientos laterales en los niveles superiores que los inferiores, no obstante las derivas de entrepiso y fuerzas cortantes los niveles inferiores resultaron más perjudiciales para la estructura tanto sin y con amortiguadores en sus dos configuraciones. Finalmente se concluye que en la estructura con piso blando los disipadores de energía tipo Caja Metálica en la planta baja se presentan los mayores porcentajes de reducción de respuesta de desplazamientos laterales, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes al incorporar los disipadores, comportamiento que se mantiene igual para las dos configuraciones adoptadas. El origen del sismo no altera el comportamiento de la estructura, la única diferencia es que los sismos de cercana generan mayor respuesta en la estructura que los sismos de fuente lejana. En los resultados obtenidos la reducción promedio de la respuesta sísmicas de la edificación irregular con piso blando incorporando los disipadores es de 33,5% para los desplazamientos laterales, 28,52% para las derivas de entrepiso y del 32,14% para las fuerzas cortantes. La configuración más apropiada para la estructura es; la configuración 2 en la dirección X que ubica los disipadores en los vanos centrales, y la configuración 1 en la dirección Y que ubica los disipadores en los vanos laterales y a su vez presenta mayor cantidad de disipadores que la configuración 2 en la mencionada dirección.

Palabras Clave: *Disipadores de Energía, Piso Blando, Caja Metálica, Estructura de concreto.*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		pp.
1	Edificación con piso blando. Fuente: Arévalo, V. (2015).....	23
2	Clasificación de los Sistemas de Protección Sísmica. Fuente: Tovar C. (2008)....	24
3	Clasificación de los Disipadores de Energía. Fuente: Tovar C. (2008).....	25
4	Disipador tipo ADAS y su ubicación en la estructura. Fuente: Trujillo, J. y otros (2014).....	27
5	Disipador tipo TADAS y su ubicación en la estructura. Fuente: Trujillo, J. y otros (2014).....	28
6	Disipador Honey-Comb. Fuente: Sánchez, M. (2010).....	29
7	Disipador tipo Unbonded Braces. Fuente: Agudelo, J. (2014).....	29
8	Disipador tipo U. Fuente: Agudelo, J. (2014).....	30
9	Disipador tipo Caja Metálica. Fuente: Tovar, C. (2008).....	31
10	Disipador Conexión SBC. Fuente: Trujillo, J. y otros (2014).....	32
11	Disipador Sistema PALL. Fuente: Trujillo, J. y otros (2014).....	32
12	Disipador Sistema EDR. Fuente: Sánchez, M, (2010).....	33
13	Disipador de fricción por golillas. Fuente: Sánchez, M, (2010).....	33
14	Disipador viscoelástico tipo VE. Fuente: Arévalo, V. (2015).....	34
15	Disipador Viscoelástico de fluido. Fuente: Trujillo, J. y otros (2014).....	35
16	Estructura sin y con aislador de base. Fuente: Sáez, I (2014).....	36
17	Principio del funcionamiento del Amortiguador de Masa TDM. Fuente: Bassotti, R. (2004).....	38
18	Principio del funcionamiento del Amortiguador de Líquido Sintonizado. Fuente: Bassotti (2004).....	39
19	Disipador de energía tipo Caja Metálica. Fuente: Tovar, C. (2008).....	41
20	Componentes del Disipador de Energía tipo Caja Metálica. a) Parte Externa. b) Parte Interna Pi invertida. c) Láminas cedentes. Fuente: Tovar, C. (2008).....	42
21	Posibles ubicaciones del disipador tipo Caja Metálica en una estructura. Fuente: Skinner et al. (1975).....	44
22	Vista de planta de la estructura a evaluar. Fuente: El Autor (2016).....	52
23	Vista Frontal de la estructura a evaluar, pórticos 1 y 4. Vigas 30x100. Fuente: El Autor (2016).....	52
24	Vista Frontal de la estructura, pórticos 2 y 3. Vigas 30x70 Fuente: El Autor (2016).....	53
25	Vista Frontal de la estructura, pórticos A y F. Vigas 30x60 Fuente: El Autor (2016).....	53
26	Vista Frontal de la estructura a evaluar, pórticos B y E. Vigas 30x70. Fuente: El Autor (2016).....	54

27	Vista Frontal de la estructura a evaluar, pórticos C y D. Vigas 30x60. Fuente: El Autor (2016).....	54
28	Disipadores ubicados en Configuración 1 Dirección X. Fuente: El Autor (2017)...	56
29	Disipadores ubicados en Configuración 1 Dirección Y. Fuente: El Autor (2017)...	57
30	Disipadores ubicados en Configuración 2 Dirección X. Fuente: El Autor (2017)...	57
31	Disipadores ubicados en Configuración 2 Dirección Y. Fuente: El Autor (2017)...	58
32	Parámetros de búsqueda del motor PGMD según el tipo de falla. Fuente: PEER (2017).....	61
33	Ubicación geográfica de los registros. Fuente: PEER (2017).....	62
34	Ejemplos de funciones de peso. Fuente: PEER (2017).....	64
35	Ejemplo de espectro promedio para registros seleccionados. Fuente PEER (2017).....	65
36	Parámetros seleccionados para sismos de fuente cercana. Fuente: PEER (2017).....	66
37	Espectro de respuesta para los sismos de fuente cercana. Fuente: PEER (2017).....	67
38	Parámetros seleccionados para sismos de fuente lejana. Fuente: PEER (2017).....	69
39	Espectro de respuesta para los sismos de fuente lejana. Fuente: PEER (2017).....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		pp.
1	Propiedades del sistema original. Fuente: El Autor (2018).....	55
2	Sismos con origen de fuente cercana generados por la base de datos PEER. Fuente: El Autor (2017).....	67
3	Sismos con origen de fuente lejana generados por la base de datos PEER. Fuente: El Autor (2017).....	71
4	Sismos con origen de fuente cercana seleccionados para analizar la estructura. Fuente: El Autor (2017).....	72
5	Sismos con origen de fuente lejana seleccionados para analizar la estructura. Fuente: El Autor (2017).....	73
6	Fuerzas y desplazamientos que experimenta el amortiguador caja metálica original. Fuente: El Autor (2018).....	76
7	Fuerzas y desplazamientos que experimenta el amortiguador caja metálica ajustado al 70%. Fuente: El Autor (2018).....	77
8	Modos de vibración de la estructura dirección X y Y. Fuente: El Autor (2018).....	79
9	Propiedades dinámicas del sistema estudiado. Fuente: El Autor (2017).....	80
10	Valores de Rigidez lateral por piso con amortiguadores (Ka), Rigidez del amortiguador (Kd) y su constante de amortiguamiento equivalente (Ce) para la Configuración 1. Fuente: El Autor (2017).....	80
11	Valores de Rigidez lateral por piso con amortiguadores (Ka), Rigidez del amortiguador (Kd) y su constante de amortiguamiento equivalente (Ce) para la Configuración 2. Fuente: El Autor (2017).....	80
12	Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X. Fuente: El Autor (2017).....	88
13	Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y. Fuente: El Autor (2017).....	89
14	Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X. Fuente: El Autor (2017).....	90

15	Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y. Fuente: El Autor (2017).....	91
16	Dimensiones para las láminas de los disipadores tipo Caja Metálica. Fuente: El Autor (2018).....	93
17	Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X. Fuente: El Autor (2018).....	100
18	Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018).....	101
19	Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X. Fuente: El Autor (2018).....	102
20	Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018).....	103
21	Porcentajes promedios de reducción de respuesta de la edificación con piso blando y regular. Fuente: El Autor (2018).....	104
22	Propiedades dinámicas efectivas del amortiguador. Fuente: El Autor (2018).....	105

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico		pp.
1	Envolvente de los ciclos de histéresis del amortiguador caja metálica original. Fuente: El Autor (2018).....	76
2	Envolvente de los ciclos de histéresis del amortiguador caja metálica ajustado al 70%. Fuente: El Autor (2018).....	77
3	Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X. Fuente: El Autor (2017).....	82
4	Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y. Fuente: El Autor (2017).....	82
5	Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X. Fuente: El Autor (2017).....	83
6	Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y. Fuente: El Autor (2017).....	83
7	Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X. Fuente: El Autor (2018).....	85
8	Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018).....	85
9	Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X. Fuente: El Autor (2018).....	86
10	Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018).....	86

11	Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura regular sin piso blando sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X. Fuente: El Autor (2018).....	94
12	Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura regular sin piso blando sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018).....	94
13	Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura regular sin piso blando sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X. Fuente: El Autor (2018).....	95
14	Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura regular sin piso blando sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018).....	95
15	Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X. Fuente: El Autor (2018).....	97
16	Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018).....	97
17	Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X. Fuente: El Autor (2018).....	98
18	Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018).....	98

INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica es un gran problema en la construcción de edificaciones, puentes, represas y otras estructuras que se desarrollen. En Venezuela, de una población estimada de 31.000.000 de habitantes, aproximadamente el 75% habita en zonas de alta peligrosidad sísmica, siendo en dichos áreas donde las construcciones cada día se incrementan más y más. En consecuencia la seguridad estructural tiene un valor importante en el desarrollo nacional al diseñar estructuras sismorresistentes.

El desempeño de una estructura cuyo diseño sismorresistente sea convencional ante un sismo dependerá de que el sistema resistente de fuerza lateral sea capaz de disipar energía de una manera estable durante gran cantidad de ciclos, causados por la aceleración del terreno. La primicia fundamental del diseño consiste en garantizar que el daño a la estructura no conlleve a su colapso, sin embargo puede representar altos costos posteriores debido a su reparación o una demolición a causa del daño irreparable. Estas consideraciones tienen ventajas económicas, permitiendo tener diseños eficientes, y también ventajas de seguridad, en cuanto a la protección de la vida humana, lo cual es prioridad en el diseño estructural (Arévalo, 2015).

Como una alternativa se han planteado sistemas de protección sísmica, cuya función es independizar el sistema de resistencia lateral, del de resistencia gravitacional, implementando dispositivos que a pesar de sufrir daño durante el evento sísmico, pueden ser reemplazados; evitando que los elementos internos importantes sufran daño y permitiendo que la edificación se ponga en funcionamiento rápidamente.

Uno estudio de sistemas de protección sísmica corresponde a elementos disipadores de energía los cuales han sido atractivos para numerosas investigadores en tiempos recientes. Los sistemas de protección sísmica han nacido como una alternativa al diseño sismorresistente convencional en recientes décadas, donde es permitido que la disipación de energía irrumpa en el rango plástico de ciertos componentes del sistema resistente a sismos de la edificación. Esto conduce a un daño en esos componentes, los cuales deben diseñarse y detallarse cuidadosamente para cumplir esa función sin alcanzar el umbral de falla estructural. El diseño convencional difícilmente garantiza que no sufran daños los elementos no estructurales ante un sismo severo, e incluso los elementos estructurales están propensos a sufrir fallas, cuya reparación puede ser dificultosa. Por ello se han propuesto diversos sistemas que localizan los fenómenos no lineales en ciertas zonas predefinidas (Bozzo y Barbat, 2000).

Un número importante de dispositivos para mejorar el desempeño en la respuesta sísmica y el control de daño en los edificios, puentes y otras estructuras han sido desarrollados mediante investigaciones que involucran evaluaciones numéricas y experimentales. Estos dispositivos pueden estar divididos en cuatro grupos: sistemas pasivos, tales como aislamiento sísmico o aisladores de base, amortiguadores de masa y disipadores de energía; y dispositivos supletorios de disipación de energía: sistemas activos, los cuales requieren la participación activa de dispositivos mecánicos cuyas características están hechas para cambiar durante la respuesta sísmica basándose en medidas de respuestas; sistemas semi-activos y sistemas híbridos, los cuales combinan los sistemas pasivos y activos de una manera tal que la seguridad del edificio no esté comprometida incluso si el sistema activo fallase. En la actualidad, la técnica de los sistemas pasivos son los ampliamente más usados en el mundo, como es el caso de la Torre Titanium (segundo rascacielos más alto de Chile) la cual no sufrió daños estructurales

en el terremoto que ocurrió en Febrero de 2010 de magnitud 8,8 grados en la escala de Richter (Long. G, 2010).

La función básica de los dispositivos pasivos de disipación de energía cuando son incorporados a la superestructura de una edificación es la de absorber una parte de la energía de entrada, para de esta manera reducir la demanda de disipación de energía en los miembros primarios estructurales y minimizar el posible daño estructural. Estos dispositivos pueden ser muy efectivos contra los movimientos inducidos por los vientos, así como también aquellos inducidos por sismos. Además, funcionan como sistemas de control de desplazamientos laterales, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes en la estructura, y además brindan protección para niveles excesivos de aceleración, representando una opción atractiva tanto para la rehabilitación de edificios existentes como para el diseño de nuevas estructuras.

En Venezuela aún no se ha extendido el uso de disipadores en edificios para la alta actividad sísmica que se presenta, indicando un bajo conocimiento que se tiene sobre el tema, sumado los altos costos que implican la adquisición, colocación y mantenimiento de estos dispositivos. Sin embargo, la norma venezolana COVENIN 1756-2001 “Edificaciones Sismorresistentes” permite el uso de sistemas de control pasivo analítica y experimentalmente justificados para reducir la respuesta sísmica, tales como los sistemas de aislamiento sísmico y disipadores de energía. Un caso conocido de aplicación práctica es de un edificio residencial ubicado en Barquisimeto en cuyo diseño se incluyeron disipadores tipo Taylor (Tovar C., 2008. p. 2). En este sentido, resulta indiscutible la necesidad de contribuir al estudio de esta tecnología.

Actualmente el análisis de las estructuras con amortiguadores apunta hacia métodos de análisis en el tiempo utilizando la integración directa. De

hecho, las versiones actuales del SAP 2000 ya cuentan con muy buenos métodos de integración y garantizan convergencia de la solución bajo ciertos parámetros (Tovar C., 2016).

En Venezuela, aparte de la poca experiencia que se tiene en estudios y uso de disipadores de energía, existen abundantes edificaciones aporricadas en concreto reforzado que poseen muchas irregularidades en sus configuraciones estructurales, entre ellas destacan los pisos blandos en la planta baja, siendo éstos un punto débil para la estructura ante un sismo por no poseer la suficiente rigidez capaz de disminuir los desplazamientos laterales, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes; y a su vez esta irregularidad resulta ser perjudicial para la vida de las personas que hacen uso de las edificaciones. (Searer y Fierro, 2004).

En este orden de ideas, expresando que la escasa experiencia que existe en el país con relación al uso de disipadores de energía y la gran utilidad que pudiese tener la incorporación de estos dispositivos en la reducción del daño de estructuras sometidas a eventos sísmicos, se proyecta el presente Trabajo Especial de Grado como aporte a las investigaciones realizadas en torno al desarrollo de la evaluación de la respuesta sísmica en estructuras de concreto reforzado incorporando disipadores de energía metálicos, finalmente este proyecto está estructurado de la siguiente forma:

El capítulo I que se refiere al Problema, contemplando el planteamiento del problema, los objetivos: general y específicos, justificación, alcances y limitaciones. En este capítulo básicamente se resalta lo perjudicial que resulta la presencia de pisos blandos en una estructura, las ventajas que poseen los disipadores de energía tipo Caja Metálica y las bondades que propician la incorporación de éstos a las estructuras con pisos blandos.

El capítulo II cuyo contenido en el Marco Teórico, el cual presenta los antecedentes de la investigación, bases legales, bases teóricas y el glosario

de términos básicos. Se destacan algunos trabajos realizados a nivel internacional y en Venezuela sobre el uso de los sistemas de protección sísmica en edificaciones, se detallan los criterios que se deben aplicar para el diseño de la edificación con los disipadores de energía, basados en la normativa internacional como en la norma venezolana para edificaciones sismorresistentes (Norma COVENIN 1756-2001 “Edificaciones Sismorresistentes”); a su vez se puntualiza la irregularidad en estructuras destacando los pisos blandos, los sistemas de protección sísmica en edificaciones haciendo énfasis en los disipadores de energía tipo Caja Metálica, y el método a utilizar en el modelado de la estructura que es el de Análisis en el Tiempo y la generación de los acelerogramas a utilizar.

El capítulo III que contiene el Marco Metodológico, donde se planteó las consideraciones generales, el diseño de las fases metodológicas, el listado de actividades por objetivo, operacionalización de objetivos y el cronograma de actividades. Se define la estructura hipotética a estudiar que corresponde a una edificación de uso residencial de concreto reforzado de 5 niveles con piso blando en la planta baja, ubicado en una zona sísmica 5 (empleando las consideraciones de la Norma COVENIN 1756-2001 “Edificaciones Sismorresistentes”). Se definen 5 fases metodológicas que precisan los planes para llevar a cabo el cumplimiento de los 4 objetivos específicos de la investigación, resaltando las actividades a realizar para cada objetivo. Se destacan los parámetros utilizados para generar los acelerogramas de los sismos creados con la base de datos PEER Ground Motion, y los sismos elegidos al azar para evaluar la estructura.

El capítulo IV que muestra los resultados definitivos obtenidos de todos los procedimientos iterativos descritos en el marco metodológico.

El capítulo V hace referencia a las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

1. EL PROBLEMA

1.1 Introducción

En este capítulo se detalla el planteamiento del problema resaltando que en Venezuela existen muchas estructuras con piso blando para una mejor adaptación a los distintos usos de la arquitectura de las edificaciones, destacando que los pisos blandos son muy perjudiciales para la estructura ante los eventos sísmicos, los objetivos: general y específicos de la presente investigación, su justificación que radica en el uso de los disipadores de energía tipo Caja Metálica para brindar protección adicional a estructuras sismorresistentes, y por último los alcances y limitaciones de la investigación.

1.2 Planteamiento del Problema

La Norma COVENIN-MINDUR 2002-88 “Criterios y Acciones mínimas para el proyecto de edificaciones” define la estructura como el conjunto de miembros y elementos cuya función es resistir y transmitir las acciones al suelo a través de las fundaciones (COVENIN-MINDUR 2002-88, 1988). En la Norma COVENIN 1756-1:2001 “Edificaciones Sismorresistentes” se puntualiza en su artículo 6.5.2: que una edificación que presente una marcada diferencia de rigideces entre niveles adyacentes será considerada una estructura irregular, conociéndose este tipo de irregularidad como piso blando (COVENIN-MINDUR 1756-2001, 2001).

En este orden de ideas, los pisos blandos son aquellos que muestran una reducción significativa en la rigidez lateral respecto a los demás pisos de la estructura. Una de las configuraciones comunes en las estructuras actuales

sobre todo en Venezuela son los pisos blandos, lo cual es considerado en la ingeniería sismorresistente muy perjudicial en lo que respecta al comportamiento global de la estructura; debido a que durante los sismos severos, o incluso a veces en los sismos moderados, en el piso blando se produce un gran desplazamiento lateral en el nivel en mención, lo cual implicaría ante un sismo un alto grado de compromiso por parte de la edificación y por ende daños importantes en sus componentes principales (Searer G. y Fierro E., 2004).

Los disipadores de energía metálicos son dispositivos que se incorporan en una estructura cuya función es disipar la energía que ha ingresado durante un sismo; su misión es concentrar y disipar la energía a través de la deformación inelástica de alguno de sus componentes, logrando la reducción de las fuerzas sísmicas, los desplazamientos laterales de los niveles, las deformaciones y los daños estructurales.

A partir de terremotos como el de Northridge (Estados Unidos, 1994) y el de Kobe (Japón 1995) se puso en evidencia algunos de los problemas asociados con el uso de sistemas estructurales tradicionales para resistir las acciones sísmicas durante sismos intensos. Como consecuencia de esto, investigadores e ingenieros centraron su atención en el uso de sistemas innovadores, tal como lo es el suministro de amortiguamiento adicional a las estructuras por medio de sistemas pasivos de disipación de energía. Se ha demostrado el buen desempeño sísmico de este tipo de sistemas en investigaciones analíticas y experimentales, así como también en los eventos sísmicos mencionados previamente.

Expuesta la situación sobre de los daños que generan los eventos sísmicos causados por la irregularidad en estructuras (piso blando), reducción de fuerzas sísmicas, aumento de amortiguamiento y sobre todo la

protección estructural de eventos sísmicos que brindan los disipadores de energía metálicos. Esto lleva a dirigir el presente Trabajo Especial de Grado a la evaluación de la respuesta sísmica de una estructura de concreto reforzado con piso blando incorporando disipadores de energía metálicos.

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la respuesta sísmica de una estructura de concreto reforzado con piso blando utilizando disipadores de energía tipo Caja Metálica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar numéricamente la estructura y los disipadores de energía.
- Obtener la respuesta de la estructura sin disipadores de energía mediante análisis en el tiempo.
- Obtener la respuesta de la estructura con disipadores de energía mediante análisis en el tiempo.
- Evaluar la respuesta de la edificación con y sin disipadores de energía en términos de sus desplazamientos laterales máximos, sus derivas y sus fuerzas cortantes.

1.4 Justificación de la Investigación

Una estructura sin disipadores de energía sobrevive a un sismo severo disipando la energía en sus elementos principales, que son los que sufren daños. Mientras que una estructura con disipadores; se comporta de manera diferente debido a que la energía es disipada por estos dispositivos reduciendo significativamente los desplazamientos laterales de los niveles, las deformaciones de los elementos y el daño estructural porque concentran los daños y deformaciones en sus componentes, por ende los elementos de

la estructura permanecen sin sufrir daños. En América Latina, países con una alta peligrosidad sísmica como México, Perú, Ecuador y Chile han manifestado avances en el uso de estos dispositivos en grandes construcciones. En el caso de Venezuela que entra en la clasificación nombrada, no posee estos avances como los países anteriores, es por ello que se necesita desarrollar investigaciones experimentales y analíticas en el desarrollo y uso de disipadores de energía (Trujillo, J. y otros, 2014).

En este trabajo se utilizarán los disipadores de energía metálicos tipo Caja Metálica, que son dispositivos metálicos histeréticos pasivos de dimensión 15x15x32 cm que brindan protección sísmica a la edificación por medio del conjunto de sus placas paralelas de acero en forma de rectangular de modo que disipan la energía inelásticamente por medio de la flexión de las láminas. Entre sus ventajas están: bajo costo en adquisición, fácil desmontaje, sencillo reemplazo una vez dañado, factibilidad constructiva y es el resultado de investigaciones realizadas en nuestro país.

Por otra parte, el uso de piso blando en nuestro país es muy frecuente sobre todo en la planta baja de todo tipo de edificaciones (residenciales, comerciales, empresariales, hospitalarias, etc.), debido a razones arquitectónicas de acceso a personas y/o vehículos, espacios abiertos para las reuniones de personas, entre otros; lo cual compromete a la edificación a una configuración tanto arquitectónica como estructural de ausencia de muros y losas y presencia columnas más altas con relación a sus pisos superiores, lo cual esta configuración resulta muy nociva para la estructura durante un sismo por sus altos desplazamientos laterales en el entrepiso y daños considerables en sus elementos por la carencia de rigidez.

Dada la situación planteada de las ventajas que se adquiere con el uso de los disipadores de energía metálicos tipo Caja Metálica, más los beneficios que le brinda a una estructura, y lo perjudicial que resulta un piso

blando en las estructuras; se pretende llevar a cabo este Trabajo Especial de Grado titulado “Evaluación de la respuesta sísmica de una estructura de concreto reforzado con piso blando incorporando disipadores de energía tipo Caja Metálica”.

1.5 Alcances y Limitaciones de la Investigación

La investigación se fundamenta en el estudio de la respuesta sísmica de una estructura irregular de concreto reforzado de baja altura, dicha irregularidad consiste en piso blando incorporando disipadores de energía metálicos tipo Caja Metálica. Se evalúa el comportamiento de la misma a través de sus desplazamientos laterales máximos, sus derivas de entrepiso y fuerzas cortantes de piso y la comparación con la respuesta obtenida de la estructura sin disipadores de energía.

Cabe destacar que se utilizará un programa especializado SAP 2000, para realizar el modelo numérico y los análisis de las estructuras sometidas a una familia de sismos. Se realizarán análisis en el tiempo lineales y no lineales, en el caso de los no lineales, la no linealidad abarcará sólo al disipador de energía, siendo la estructura considerada en el rango lineal.

Este trabajo no contempla el diseño de los miembros estructurales ni el diseño de los dispositivos, sólo evaluación de la respuesta sísmica de los modelos adoptados y la adaptación a ellos de los disipadores de energía.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

En este capítulo se examina los antecedentes relacionados a la investigación, el estado del arte de los sistemas de protección sísmica ante estas acciones, comenzando por una definición general y una clasificación básica de estos dispositivos, con una breve descripción de cada uno de ellos, para luego destacar las características y bondades que brindan los disipadores de energía metálicos tipo Caja Metálica. También se hace una breve descripción de los diferentes tipos de irregularidades presentes en las estructuras, haciendo énfasis en lo perjudicial que resulta la irregularidad de piso blando en estructuras objeto central de esta investigación.

2.2 Antecedentes de la Investigación

En este marco se hace una revisión de los trabajos previos con relación al tema en estudio para ubicarlo en la realidad de lo que se presenta y tener bases para desarrollar dicho estudio.

Tena, A. (1998) en su trabajo: “Modelado analítico de edificios con disipadores de energía. Aplicaciones en proyectos de reparación” presentado en la V Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica en México; discute los principales modelos analíticos que se han utilizado para el estudio de estructuras con elementos disipadores de energía en México, haciendo énfasis en los que trabajan con acero por histéresis del material (solera, ADAS y TADAS) realizando diferentes configuraciones en la estructura y a su

vez recomendando la aplicación de estos dispositivos en edificaciones ya existentes para su conservación.

Tena, A. concluyó que el modelo de la diagonal no lineal “equivalente” carece de una justificación sólida y que puede guiar resultados de dudosa aproximación, sobre todo cuando se utiliza en estudios paramétricos poco reflexivos en las características y balances de rigidez y resistencia que deben existir entre los contravientos y los disipadores de energía.

El trabajo de Tena, A. sirvió como orientación de la presente investigación aportando parte de las consideraciones necesarias a tomar en cuenta para realizar el modelado del disipador; las consideraciones a estudiar sirven de referencia para el dispositivo a modelar en esta investigación que es el Caja Metálica.

Tehranizadeh, M. (2000) en su trabajo: “Passive energy dissipation device for typical steel frame building in Iran” (Dispositivo de disipación de energía en estructuras típicas de acero en Irán) evaluó la eficacia de los disipadores de energía metálicos tipo ADAS mediante la comparación de la respuesta de una estructura con dichos dispositivos con la respuesta de la misma estructura sin los mismos. Además resaltó que las características de disipación de la ADAS elementos son fiables, y los dispositivos a ser más eficaces tanto en la absorción de energía como la intensidad de entrada del movimiento que aumenta. Demostró que los dispositivos ADAS poseen particularidades que los hacen adecuados para su uso de disipar energía tanto en edificios nuevos y existentes.

La investigación de Tehranizadeh, M. destacó que los parámetros interactivos estructura-dispositivo son importantes para la respuesta ante el sismo. También que los disipadores tipo ADAS son elementos confiables y tienden a ser más eficaces en la absorción de energía otorgándole a la edificación mayor resistencia ante movimientos sísmicos.

Sánchez, M. (2010) en su Trabajo de Grado titulado: “Implementación del Diseño Directo basado en desplazamientos para pórticos con disipadores de energía”, como exigencia previa a la obtención del título de Ingeniero Civil conferido por la Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. El autor, para implementar su diseño trabajó con disipadores de energía Barras de Pandeo Restringido, tipo de disipador pasivo histerético metálico (la misma clasificación del disipador tipo Caja Metálica); con el criterio de diseño adoptado en su investigación logró concluir que los mencionados dispositivos de disipación de energía absorben gran parte de las fuerzas que generan los sismos reduciendo significativamente las fuerzas cortantes en el pórtico y restringiendo el daño en la estructura. Además estas barras incrementan el amortiguamiento en el sistema, lo cual hace que se disipe una mayor cantidad de energía que en la estructura sin disipadores.

La investigación de Sánchez M., concluyó que usar otro sistema de disipación de energía, que en este caso se utilizó uno de la misma clasificación de los disipadores tipo Caja Metálica (Pasivo-Histerético-Metálico) brinda las mismas bondades a la estructura, lo cual busca dotarla de más amortiguamiento, reducción de fuerzas cortantes, desplazamientos laterales y derivas de entrepiso para otorgar más protección a los miembros estructurales de la edificación.

Arévalo, V. (2015) en su Trabajo de Grado denominado: “Análisis del comportamiento de un edificio de marcos de acero con disipadores de energía histeréticos”, presentado ante la Universidad Rafael Landívar de Guatemala para optar al título de Licenciado en Ingeniería Civil; desarrolló el análisis completo de una estructura convencional de marcos de acero con riostras concéntricas, en la cual dimensionó las piezas estructurales de la edificación obteniendo las derivas de entrepiso. Posteriormente definió las propiedades de los dispositivos disipadores tipo ADAS y se las agregó a la

edificación, para llevar a cabo el análisis de tiempo-historia en la estructura. Finalmente comparó los resultados obtenidos de la estructura con disipadores con los resultados iniciales de la estructura sin disipadores, para analizar la alteración en el comportamiento de la estructura con disipadores.

Arévalo, V. concluyó por medio de su investigación según los resultados obtenidos hubo una reducción promedio de deformación del 37% al incorporar los disipadores tipo ADAS en la estructura, una reducción promedio de esfuerzos del 50% en las columnas de los pórticos arriostrados; y en el caso de las riostras concéntricas la disminución del esfuerzos fue del 91% con los disipadores incorporados; indicando que el arriostramiento solo funciona como soporte para el disipador y pierde su función de ser rigidizador de la estructura. Posteriormente concluye que la causa de disminución de los esfuerzos y derivas de entrepiso es producto de la absorción de la carga sísmica por parte del disipador, lo cual reduce las cargas a las cuales se someterán las piezas debido a carga lateral.

La investigación de Arévalo, V. originó en el investigador un punto de inicio y a su vez de orientación para la realización del trabajo especial de grado, siendo su conclusión un piloto para generar un patrón de comportamiento en la estructura a pesar que su estructura fue analizada con acero estructural y como disipador de energía empleó el tipo ADAS.

Una vez considerado algunos aportes de trabajos realizados en otros países, se puede notar que se citaron referencias de países de América Latina (México, Ecuador y Guatemala), demostrando que existen estudios y avances en la materia. En el caso de Venezuela, no existen muchos estudios sobre el tema, pero se pueden citar los siguientes antecedentes:

Searer, G. y Fierro E. (2004) en su artículo: "Criticism of Current Seismic Design and Construction Practice in Venezuela: A Bleak Perspective" (Crítica del Diseño Sísmico Actual y Construcción práctica en Venezuela: Una Perspectiva Desolada) enfatizan que durante una visita realizada en la ciudad de Caracas, destacan que en Venezuela se utiliza una Norma sísmica con disposiciones modernas, pero muchas de las construcciones adoptan errores conceptuales en el diseño del sistemas resistentes a la fuerza, los cuales destacan: el piso blando, el piso débil, columnas cortas, viga fuerte-columna débil y excentricidades de viga en columnas; que en el momento de ocurrencia de un sismo de gran magnitud, estas configuraciones estructurales de diseño tendrán repercusiones en la seguridad de la vida de las personas que hacen uso de estas edificaciones, a menos que la filosofía de diseño de los ingenieros cambie significativamente.

La visita de Searer G. y Fierro E. hace especial énfasis que Venezuela siendo un país que a pesar de poseer una Norma Sismorresistente con grandiosas consideraciones sísmicas en su momento (año 2004), la cual sigue vigente en la actualidad; existen muchas edificaciones que poseen muchas irregularidades en sus configuraciones estructurales a lo que los autores denominan errores conceptuales en el diseño, que pueden ser perjudiciales para la vida de las personas que hacen uso de las edificaciones en el instante de ocurrencia de un sismo de gran magnitud. Destacaron que el error conceptual de diseño más abundante fueron los pisos blandos.

Tovar C. (2008) en su Tesis presentada ante la Universidad Central de Venezuela titulada: "Utilización de Disipadores de Energía para edificaciones de baja altura", para optar al título de Doctor en Ingeniería Estructural, se desarrolla el disipador de energía tipo caja metálica, quedando caracterizado por una evaluación numérica y experimental, por otro lado se concluye que la posición, número y distribución de los amortiguadores tiene gran influencia en la respuesta estructural, pero este efecto es sensible al valor del período

fundamental y al tipo de sistema estructural del edificio. Para las estructuras aporticadas de período largo conviene distribuir el amortiguamiento uniformemente en todos los entrepisos, mientras que para las estructuras de muros se obtiene mayor beneficio si el amortiguamiento se concentra en el primer entrepiso. La excitación sísmica tiene una marcada influencia en la respuesta de las estructuras con amortiguadores.

Por otra parte, Tovar C. concluyó en cuanto al disipador tipo Caja Metálica que este consiste en una caja metálica cerrada de dimensiones 15cmx15cmx32cm aproximadamente, construida con planchas de acero, en cuyo interior está contenida una serie de láminas metálicas de muy poco espesor, que tienen como función disipar la energía inelásticamente a través de su deformación por flexión. El dispositivo cumple con los siguientes requisitos: Disipación de energía para un rango de pequeños desplazamientos de entrepiso, haciéndolo ideal para estructuras de baja altura, fuerza desarrollada y controlada en un rango apropiado, proceso de disipación estable y predecible evaluado numérica y experimentalmente, rigidez importante en el plano de deformación para evitar efectos de torsión durante el principio de acción del dispositivo, factibilidad constructiva y dimensiones manejables, debido a su geometría simple y sencilla, fácil desmontaje y reemplazo una vez dañado, bajo costo.

La investigación de Tovar C., reporta la demostración numérica y experimental del uso del disipador de energía tipo Caja Metálica por medio de ensayos de laboratorio, lo cual comprueba que el dispositivo cumple a cabalidad condiciones para ser empleado como disipador de energía, aparte que es una invención creada en nuestro país y debe seguirse ampliando este campo por medio de investigaciones. Además destaca la importancia del uso de amortiguadores en los primeros niveles de la edificación dependiendo del tipo de estructural (aporticada o muro) porque son los que cumplen la función

principal del mismo que es de disipar la energía, obteniéndose mayor reducción de derivas en término medio de respuestas.

Sáez, I. (2015) en su Trabajo Especial de Grado titulado: “Evaluación del comportamiento de una edificación de acero con aisladores sísmicos tipo HDR comparado con el sistema tradicional de base fija”, presentado para la Universidad Católica Andrés Bello para optar al título de Especialista en Ingeniería Estructural; presenta la evaluación del comportamiento de una edificación hipotética destinada a un Centro Médico Asistencial, la cual fue diseñada en acero estructural con pórticos arriostrados lateralmente y modelada con aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento HDR. En su trabajo concluyó que el aislamiento sísmico mejora las expectativas del comportamiento de la estructura, tanto para “salvar vidas” como para minimizar el daño, ya que gracias al movimiento uniforme controlado por los aisladores, los componentes no estructurales y el contenido de la edificación no estarán sujetos a movimientos violentos repentinos y por lo tanto se reducirá el impacto sobre los mismos.

En el trabajo de Sáez I. se llama la atención sobre la función que cumplen otros sistemas pasivos de protección sísmica en las edificaciones y diseñadas con otro material, en este caso se trató el aislamiento sísmico sobre una estructura planteada en acero estructural; en la que los beneficios de protección de la estructura ante los eventos sísmicos son muy parecidos a los que aporta la incorporación de los disipadores de energía en las mismas.

2.3 Bases Legales

Actualmente en Venezuela no existe normativa que defina y regule el diseño e implementación de disipadores de energía metálicos. Sin embargo, la Norma COVENIN-MINDUR “Edificaciones Sismorresistentes” 1756-2001

considera en el Capítulo 8, sección 8.7; la aplicación de los dispositivos disipadores de energía titulada: “Dispositivos para reducir la respuesta sísmica”. Dicha disposición indica textualmente: “Se autoriza el empleo de sistemas de control pasivo debidamente justificados, analítica y experimentalmente para reducir la respuesta sísmica, tales como los sistemas de aislamiento sísmico y amortiguamiento” (COVENIN-MINDUR 1756-2001, 2001).

Actualmente, en Estados Unidos existen algunas organizaciones que se han dado a la tarea de normalizar el diseño de estructuras con sistemas de control pasivo; entre ellas están: Federal Emergency Management Administration (FEMA), National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP), Structural Engineers Association of Northern California (SEAONC), Applied Technology Council (ATC).

La norma FEMA 450 (2003) incluye en el capítulo 15 titulado: “Structures with damping systems”, está dedicado a las estructuras con sistemas de amortiguamiento, basándose en lo siguiente:

- Es aplicable a todo tipo de sistemas de amortiguamiento, incluyendo amortiguadores metálicos, de fricción, viscoelásticos sólidos y fluidos.
- Provee criterios mínimos de diseño y desempeño para las estructuras con amortiguadores.
- Proporciona lineamientos básicos acerca del diseño, construcción y experimentación de prototipos de disipadores de energía.

Presentados los esfuerzos anteriores es evidente que aún existe una carencia, incluso a nivel mundial, con respecto a los instrumentos normativos para el diseño de disipadores de energía y el diseño de estructuras que contengan estos sistemas. Básicamente debido a que esta es un área de

investigación aún vigente, en la que quedan muchas interrogantes por responder.

2.4 Bases Teóricas

2.4.1 Estructuras Irregulares

Una estructura es un conjunto de elementos o miembros integrados entre sí que tienen la función de soportar las cargas de la edificación y transmitir las al suelo. Éstas pueden ser de concreto reforzado, acero estructural, madera o en aislados casos de bambú. Las estructuras pueden ser regulares e irregulares.

Las estructuras regulares se caracterizan por presentar una configuración simétrica de sus elementos estructurales y otros componentes resistentes a las fuerzas laterales, careciendo de discontinuidades en cuanto a rigidez y/o resistencia.

Las estructuras irregulares se caracterizan por presentar asimetría en la configuración de sus elementos estructurales y otros componentes resistentes a las fuerzas laterales, y a su vez poseen discontinuidades en cuanto a rigidez y/o resistencias. Las estructuras irregulares se clasifican a su vez de tres (3) maneras: Irregularidades verticales, Irregularidades en planta y diafragma flexible.

La Norma COVENIN-MINDUR 1756-1-2001 Edificaciones Sismorresistentes presenta entre sus irregularidades verticales:

1. Entrepiso blando o Piso blando: irregularidad vertical de una estructura que se manifiesta cuando la rigidez lateral de algún entrepiso es menor que 0,70 veces la del entrepiso superior, o 0,80 veces el promedio de las rigideces de los tres entrepisos superiores.

2. Entrepiso débil o Piso débil: irregularidad vertical de una estructura que se manifiesta cuando la resistencia lateral de algún entrepiso, es menor que 0,70 veces la correspondiente resistencia del entrepiso superior, o 0,80 veces el promedio de las resistencias de los tres entrepisos superiores.
3. Distribución irregular de masas de uno de los pisos contiguos: irregularidad vertical de una estructura que se presenta cuando la masa de algún piso exceda 1,3 veces la masa de uno de los pisos contiguos.
4. Aumento de las masas con la elevación: irregularidad vertical de una estructura que se muestra cuando la distribución de masas de la edificación crece sistemáticamente con la altura.
5. Variaciones en la geometría del sistema estructural: se conoce cuando la dimensión horizontal del sistema estructural en algún piso excede 1,3 la del piso adyacente.
6. Esbeltez excesiva: el cociente entre la altura de la edificación y la menor dimensión en planta de la estructura a nivel de base exceda a 4.
7. Discontinuidad en el plano del sistema resistente a cargas laterales:
 - 7.1 Columnas o Muros que no continúan al llegar a un nivel inferior distinto al nivel de base.
 - 7.2 El ancho de la columna o muro en un entrepiso presenta reducción que excede el 20% del ancho de la columna o muro en el entrepiso inmediatamente superior en la misma dirección horizontal.
 - 7.3 El desalineamiento horizontal del eje de un miembro vertical, muro o columna, entre dos pisos consecutivos, supera 1/3 de la dimensión horizontal del miembro inferior en la dirección del desalineamiento.
8. Falta de conexión entre miembros verticales: se presenta cuando alguno de los miembros verticales, columnas o muros, no está

conectado al diafragma (parte de la estructura, generalmente horizontal, con suficiente rigidez en su plano, diseñada para transmitir las fuerzas a los elementos verticales del sistema resistente a sismos) de algún nivel.

9. Efecto de columna corta: consiste en una marcada reducción en la longitud libre de columnas, por efecto de restricciones laterales tales como paredes, u otros elementos no estructurales.

La Norma COVENIN-MINDUR 1756-1-2001 Edificaciones Sismorresistentes destaca como irregularidades en planta:

1. Gran excentricidad: se evidencia cuando en algún nivel la excentricidad entre la línea de acción del cortante en alguna dirección, y el centro de rigidez supera el 20% del radio de giro inercial de la planta.
2. Riesgo torsional elevado: se presenta de 2 formas; cuando el radio de giro torsional r_t en alguna dirección es inferior al 50% del radio de giro inercial r . Y; cuando la excentricidad entre la línea de acción del cortante y el centro de rigidez de la planta supera el 30% del valor del radio de giro torsional r_t en alguna dirección.
3. Sistema no ortogonal: irregularidad en planta que se evidencia cuando una porción importante de los planos del sistema sismorresistente no sean paralelos a los ejes principales de dicho sistema.

La Norma COVENIN-MINDUR 1756-1-2001 Edificaciones Sismorresistentes destaca como Diafragma flexible:

1. Cuando la rigidez en su plano sea menor a la de una losa equivalente de concreto armado de 4 cm de espesor y la relación largo/ancho no sea mayor que 4,5.
2. Cuando las plantas presenten un área total de aberturas internas que rebasen el 20% del área bruta de las plantas.

3. Cuando existan aberturas prominentes adyacentes a planos sismorresistentes importantes o, en general, cuando se carezca de conexiones adecuadas con ellos.
4. Cuando en alguna planta el cociente largo/ancho del menor rectángulo que inscriba a dicha planta sea mayor que 5.

2.4.2 Piso Blando

Son irregularidades de una estructura que se manifiesta por medio de una reducción significativa en la rigidez lateral respecto a los demás pisos de la estructura. Una de las configuraciones estructurales más frecuentes en las edificaciones actuales, principalmente de uso residencial, es aquella que presenta piso blando a nivel de planta baja, lo cual es considerado en la ingeniería sismorresistente muy perjudicial en lo que respecta al comportamiento global de la estructura; debido a que durante los sismos severos, o incluso a veces en los sismos moderados, en el piso blando se produce un gran desplazamiento lateral en el nivel en mención (Blog del Laboratorio de Ingeniería Sísmica Universidad de Costa Rica, 2011).

El piso blando ocurre en estructuras en las que uno de los pisos presenta una alta flexibilidad que impide controlar los desplazamientos laterales impuestos por los sismos, mientras que los pisos adyacentes son relativamente más rígidos. Los pisos blandos se pueden generar por:

1. Una estructura más alta en el primer piso respecto a los superiores, provocando menos rigidez y más deflexión en el primer piso.
2. Un cambio abrupto de la rigidez en un piso con respecto a otro.
3. El uso de muro de corte con una discontinuidad, en la cual las fuerzas cortantes son resistidas por muros que no llegan hasta la fundación.
4. Discontinuidad en la trayectoria de las cargas, creada por un cambio vertical u horizontal en la estructura.

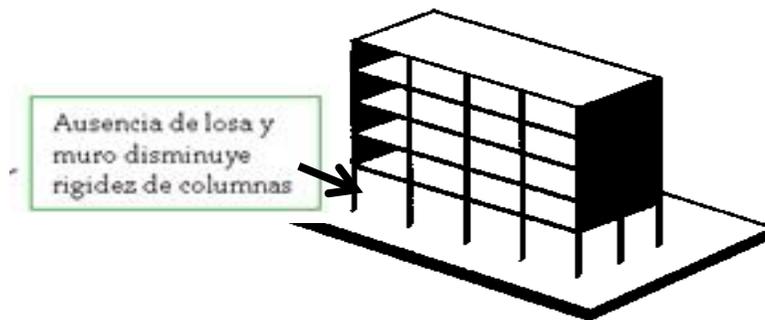


Figura 1. Edificación con piso blando.
Fuente: Arévalo, V. (2015).

En la Figura 1 se aprecia una estructura que posee piso blando en la planta baja, donde se evidencia la ausencia de losas, muros y columnas más altas que en los pisos superiores; generalmente se realiza esta configuración por razones arquitectónicas para ofrecer más espacio en ese nivel, siendo este tipo de irregularidad muy común en Venezuela tanto en edificios residenciales, empresariales y hospitalarios. Esto produce un debilitamiento de la rigidez de los elementos verticales en el nivel mencionado provocando lo que se conoce como piso blando.

2.4.3 Sistemas de Protección Sísmica

Trujillo, J. (2014) precisa que los sistemas de protección sísmica empleados en la actualidad comprenden desde simples dispositivos de control pasivos hasta avanzados sistemas completamente activos. Los sistemas pasivos son los más conocidos y estudiados que incluyen: aisladores de base o aisladores sísmicos, amortiguadores de masa u osciladores resonantes TDM y disipadores de energía. Como se muestra en la Figura 2, los sistemas de protección sísmica pueden ser clasificados en cuatro categorías: sistemas pasivos, activos, híbridos y semi-activos.



Figura 2. Clasificación de los Sistemas de Protección Sísmica

Fuente: Tovar C. (2008)

Los sistemas de control pasivo emplean dispositivos bastante simples que reducen la respuesta dinámica por medios totalmente mecánicos. Se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica, dependen únicamente de las condiciones de trabajo (o de contorno) en las que se encuentran y; son competitivos económicamente y robustos en su comportamiento. Entre los diferentes sistemas pasivos apreciados en la Figura 2 cada sistema emplea distintos enfoques para el control de la respuesta estructural y son más efectivos para diversos tipos de estructuras.

Los disipadores de energía son dispositivos pasivos de protección sísmica diseñados para absorber la mayoría de la energía sísmica, evitando así que ésta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales. Pueden ser clasificados como histeréticos o viscoelásticos como se evidencia en la Figura 3.



Figura 3. Clasificación de los Disipadores de Energía.

Fuente: Tovar C. (2008)

Los disipadores histeréticos incluyen los disipadores metálicos y los disipadores de fricción; dependen esencialmente de los desplazamientos de la estructura. Los disipadores metálicos están basados en la cedencia de los metales debido a: flexión, corte, torsión o extrusión (proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija), y fricción entre superficies.

2.4.3.1 Sistema Pasivo

Trujillo, J. (2014) define que los dispositivos pasivos son elementos de carácter reactivo, cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo en que se encuentran. Estos intervienen alterando las propiedades dinámicas de la edificación y provocado una reducción de su respuesta estructural, teniendo ventajas económicas. Los sistemas de control pasivo se pueden clasificar: control pasivo con aislamiento en la base, control pasivo con sistemas inerciales acoplados (amortiguadores de masa u oscilador resonante TDM) y control pasivo con disipadores de energía.

La disipación pasiva de energía es reconocida como un medio efectivo para defender a las estructuras de los efectos del sismo. El principio es simple: si los sismos se originan mediante una liberación de energía del suelo, los elementos que están íntimamente ligados al suelo tales como las

estructuras, absorben esta energía durante el evento y deberán liberarla de alguna manera.

2.4.3.1.1 Sistemas de Disipación de Energía

Está basada en la idea de colocar en la estructura dispositivos destinados a aumentar la capacidad de perder energía de una estructura durante un terremoto. Toda estructura disipa o elimina la energía de un sismo mediante sus deformaciones. Al colocar un dispositivo de disipación de energía en una estructura, estos van a experimentar fuertes deformaciones con los movimientos de la estructura durante el sismo. Mediante estas fuertes deformaciones se incrementa notablemente la capacidad de disipar energía de la estructura con una reducción de las deformaciones de la estructura. Estos dispositivos se conocen como disipadores de energía o amortiguadores sísmicos y pueden ser de diversas formas y principios de operación. Los más conocidos son con base en un elemento viscoso que se deforma o con unos elementos metálicos que logran la cedencia fácilmente.

2.4.3.1.1.1 Disipadores Histeréticos

Los disipadores histeréticos son aquellos que trabajan por medio del desplazamiento del entrepiso de la estructura y pueden ser de cedencia (metálicos) o friccionantes. Los dispositivos por cedencia disipan energía mediante ciclos de deformación inelástica por flexión, corte, torsión o extrusión (proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija).

Por lo general los disipadores histeréticos se comportan elásticamente para resistir las cargas laterales producidas por el viento y sismos menores, y trabajan en el rango inelástico en el caso de los sismos de alta intensidad disipando energía mediante este comportamiento. Al estar ligados a la estructura principal, las deformaciones inelásticas que se presentan durante el evento sísmico representan una forma efectiva de disipación de energía.

2.4.3.1.1.1.2 Disipador tipo TADAS (Triangular Added Damping And Stiffness [Amortiguamiento y Rigidez añadida triangular])

Está formado por un conjunto de placas trapezoidales de acero paralelas y de espesor constante. El hecho de que las placas se encuentren con un extremo empotrado y en el otro articulado, condiciona la forma trapezoidal que posibilita también una distribución global de la plastificación. La base menor de la placa se conecta al nivel de la viga a una estructura aporticada, mientras que la otra se articula con una unión a dos contravientos dirigidos a la base de los pilares del pórtico. Con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple. En la Figura 5 se evidencia el disipador tipo TADAS y su disposición en una estructura (Trujillo J, 2014).

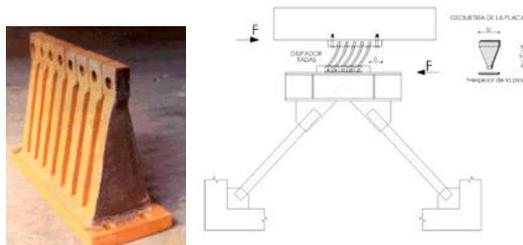


Figura 5 Disipador tipo TADAS y su ubicación en la estructura.

Fuente: Trujillo, J. y otros (2014)

2.4.3.1.1.1.3 Disipador Honey-Comb

Debido a los espacios vacíos que deja entre disipadores se le conoce genéricamente como disipador tipo panel, y se comercializa con el nombre de “Honeycomb”. Su geometría tiene como objeto una plastificación lo más uniforme posible en la zona disipativa. Su comportamiento histerético es muy estable y de forma casi rectangular, con una respuesta más próxima

a la rígida-plástica que es el caso del ADAS, la cual es más flexible. En la Figura 6 se representa el disipador Honey-Comb.



Figura 6 Disipador Honey-Comb

Fuente: Sánchez, M (2010)

2.4.3.1.1.1.4 Disipador Unbonded Braces (Barras de Pandeo Restringido)

Consiste en una diagonal de acero que fluye dentro de una sección de hormigón que la confina. Su principio básico de funcionamiento es prevenir el pandeo de Euler cuando el elemento de acero cede en compresión. La Figura 7 demuestra los disipadores tipo Unbonded Braces.



Figura 7 Disipador tipo Unbonded Braces

Fuente: Agudelo, J. (2014)

2.4.3.1.1.1.5 Disipador tipo U

Los disipadores de energía tipo U, también son llamados tipo solera porque están hechos con solera de acero comercial. Este dispositivo consta de 2 placas en forma de U, cuya sección es de 1,3 cm de espesor por 3,8 cm de ancho, el resto de sus propiedades geométricas se pueden apreciar, dichas placas están unidas entre sí a un nivel inmediato a ellas y en el otro extremo de cada una de ellas a otro nivel estructural mediante barras. Los desplazamientos relativos ocasionados por la energía sísmica en las placas en forma de U, ocasionan un movimiento semejante a las orugas de un tractor mediante el cual se disipa la energía sísmica. La Figura 8 aclara los disipadores tipo U.

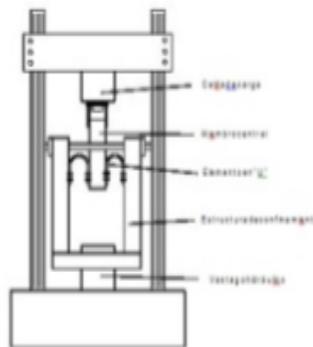


Figura 8 Disipador tipo U

Fuente: Agudelo, J. (2014)

2.4.3.1.1.1.6 Disipador tipo Caja Metálica

Este tipo de disipador metálico fue desarrollado y experimentado por la Ing. Carolina Tovar en su tesis: "Utilización de disipadores de energía en edificaciones de baja altura" para optar al título de Doctor en Ingeniería Estructural presentada ante la Universidad Central de Venezuela. Lo cual consistió con en una caja metálica cerrada de dimensiones

15cmx15cmx32cm aproximadamente, construida con planchas de acero, en cuyo interior está contenida una serie de láminas metálicas de muy poco espesor, que tienen como función disipar la energía inelásticamente a través de su deformación por flexión. En la Figura 9 se representa la descripción dada:



Figura 9 Disipador tipo Caja Metálica

Fuente: Tovar, C. (2008)

2.4.3.1.1.1.2 Disipadores Friccionantes

Los disipadores metálicos se caracterizan por tener una fricción seca entre dos metales. El principio básico de los disipadores friccionantes consiste en utilizar la deformación relativa entre dos puntos de una estructura para disipar energía a través de la fricción.

La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza por el coeficiente de rozamiento. Existen diversos dispositivos basados en la disipación por fricción. A continuación se muestran algunos de ellos:

2.4.3.1.1.1.2.1 Conexión SBC (Stotted Bolted Connection)

Este dispositivo es el más simple de todos. Consiste en una unión de dos placas paralelas de acero interconectadas entre sí a través de láminas

de bronce y pernos de alta resistencia. El deslizamiento entre placas se produce a través de los orificios ovalados. En la Figura 10 se muestra el disipador de Conexión SBC.

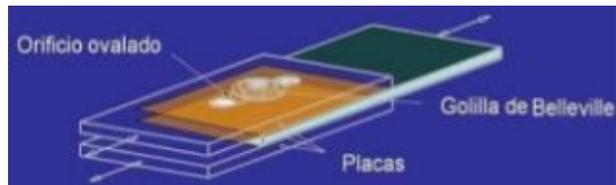


Figura 10 Disipador Conexión SBC

Fuente: Trujillo, J. y otros (2014)

2.4.3.1.1.2.2 Sistema PALL

Utiliza la deformación relativa de entrecimso y la deformación angular del paralelogramo central como medio de disipación. En la Figura 11 se representa el disipador de Sistema PALL.



Figura 11 Disipador Sistema PALL

Fuente: Trujillo, J. y otros (2014)

2.4.3.1.1.2.3 Sistema EDR (Energy Dissipating Restraint)

Este disipador pertenece a una gran familia de dispositivos friccionantes similares. El sistema utiliza resortes pretensados y topes para obtener un comportamiento de gran capacidad de disipación. En la Figura 12 se simboliza el disipador de Sistema EDR.

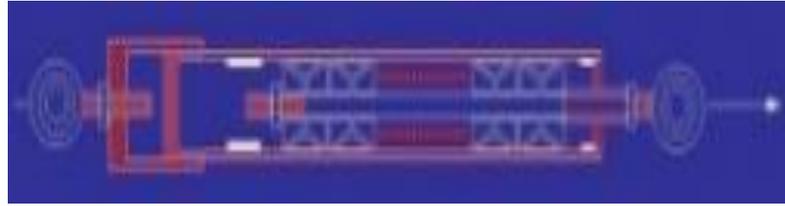


Figura 12. Disipador Sistema EDR

Fuente: Sánchez, M. (2010)

2.4.3.1.1.1.2.4 Dispositivo de fricción por golillas

En este caso la disipación se logra por la fricción producto del giro relativo entre placas metálicas. En la Figura 13 se representa el disipador de fricción por golillas.



Figura 13. Disipador de fricción por golillas

Fuente: Sánchez, M. (2010)

2.4.3.1.1.2 Disipadores Viscoelásticos

El proceso de disipación de energía de estos dispositivos es dependiente de la velocidad relativa entre los pisos de la estructura. Este agrupamiento incluye disipadores viscoelásticos sólidos y viscoelásticos líquidos. Las respuestas típicas fuerza-desplazamiento obtenidas para estos dispositivos bajo amplitud constante, condiciones cíclicas de desplazamiento controlado son provistas. En general, estos dispositivos exigen

amortiguamiento y rigidez en muchas aplicaciones siendo el comportamiento confinado al rango lineal. Esto generalmente simplifica enormemente los procedimientos de análisis requeridos. Desde que la disipación de energía ocurre, incluso para deformaciones infinitesimales los dispositivos viscoelásticos tienen potencial aplicación tanto para protección sísmica como para viento (Trujillo J, 2014).

2.4.3.1.1.2.1 Disipadores Viscoelásticos Sólidos

Los materiales viscoelásticos sólidos empleados en estructuras son usualmente copolímeros o sustancias vídriosas que disipan energía cuando están sujetas a deformaciones por corte. Un disipador viscoelástico típico (VE), el cual consiste en capas viscoelásticas entre platos de acero es mostrado en la Figura 14. Cuando son montadas en una estructura, la deformación por corte y por consiguiente la disipación de energía ocurre cuando la vibración estructural induce el movimiento relativo entre las láminas de acero exteriores y el plato central.



Figura 14 Disipador viscoelástico tipo VE

Fuente: Arévalo, V. (2014)

2.4.3.1.1.2.2 Disipador Viscoelástico de fluido

Utilizan la acción de los sólidos para mejorar el desempeño de la estructura a diversas acciones externas. Por otra parte los fluidos también pueden ser efectivamente empleados para obtener el nivel deseado de

control pasivo. Un esfuerzo significativo ha sido orientado recientemente al desarrollo de los disipadores de fluido viscoso para aplicaciones estructurales, primeramente hacia la conversión tecnológica para la milicia y la industria pesada.

La disipación de energía ocurre vía conversión de la energía mecánica al calor relacionada a la deformación del pistón y a la sustancia altamente viscosa similar a un gel de silicona. La Figura 15 describe visualmente el procedimiento antes descrito y el disipador viscoelástico de fluido

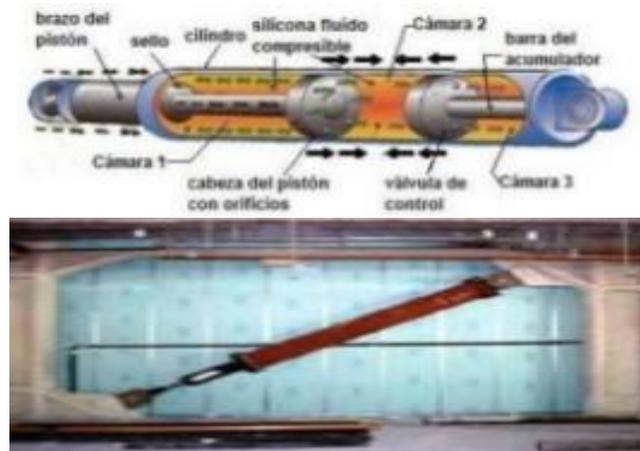


Figura 15 Disipador Viscoelástico de fluido

Fuente: Trujillo, J. y otros (2014)

2.4.3.1.2 Aislamiento de Base

Sáez, I (2015) concreta que el aislamiento de base consiste en desacoplar el movimiento del suelo del movimiento de la estructura interponiendo elementos estructurales con rigidez horizontal baja entre la edificación y la fundación, modificando la respuesta de la misma. Un sistema de aislamiento de base es aquél que proporcione una separación entre el suelo y la estructura, existiendo un cierto contacto entre ellos para poder resistir las fuerzas gravitacionales; por ende entre esa separación entre el

suelo y la estructura debe existir una unión para resistir la gravedad y las fuerzas sísmicas.

Una comparación entre el comportamiento bajo las cargas sísmicas de un edificio convencional y de uno de aislamiento de base se puede apreciar en la Figura 16.

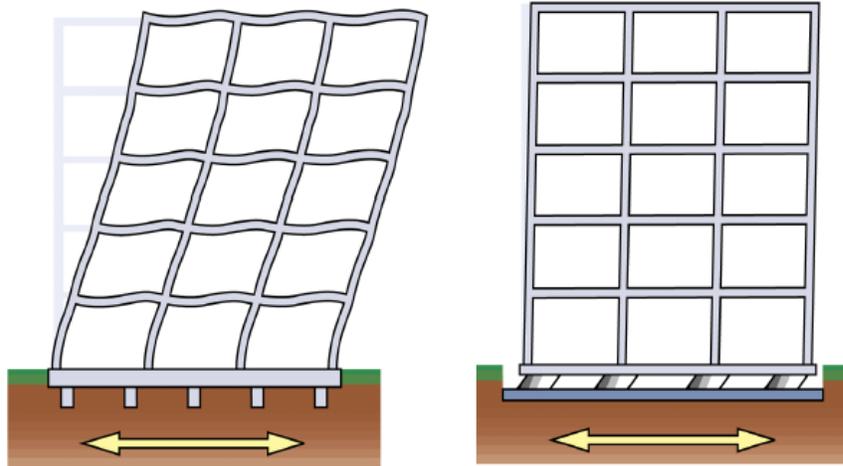


Figura 16 Estructura sin y con aislador de base

Fuente: Sáez, I. (2014)

La representación de la Figura 16 evidencia que los aisladores de base como su nombre lo indican “aislan” la estructura de los movimientos que se presentan en el suelo sobre el cual está asentado, siendo estos dispositivos los que absorben el movimiento sísmico y protegen a la estructura del mismo.

2.4.3.1 Sistema Activo

Trujillo J, (2014) detalla que un sistema activo consiste en: sensores situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa o variables de la respuesta

estructural o de ambos tipos. Sistemas controladores que se basan en las medidas de los sensores y calculan fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos. Actuadores que habitualmente son alimentados por fuentes de energía externa para ejercer fuerzas.

2.4.3.2.1 Amortiguadores de Masa u Oscilador Activo TDM

Dentro de este tipo de disipadores existen principalmente de dos tipos: Amortiguadores de masa sintonizada Tunes Mass Damper y los Amortiguadores de líquido sintonizado.

2.4.3.2.1.1 Amortiguador de Masa Sintonizada

Bassotti, R. (2004) definió que un amortiguador de masa sintonizado es un sistema capaz de absorber y aminorar las fuerzas dinámicas, reduciendo las respuestas dinámicas de las estructuras mediante el balanceo de un contrapeso colgante. Su principio de funcionamiento se basa en la oscilación de un péndulo simple. El amortiguador de masa puede ser producido generalmente en concreto armado o acero que se instala en la estructura que se quiere estabilizar.

El amortiguador de masa comienza a funcionar cuando la estructura empieza a oscilar por cualquiera de las causas mencionadas anteriormente, el oscilador de masa empieza a describir un movimiento oscilatorio en oposición a los bamboleos de la estructura, con lo que éstas se amortiguan.

Se le llama amortiguador de masa sintonizado, porque se busca que la frecuencia natural del amortiguador se sintoniza cerca de la frecuencia natural del sistema principal provocando que el amortiguador vibre en resonancia, disipando la energía absorbida a través de los mecanismos de amortiguamiento del AMS.

Los parámetros de diseño del AMS que se deben hallar para lograr la máxima eficiencia del mismo, son la relación de frecuencia (frecuencia del amortiguador/frecuencia de la estructura), la relación de amortiguamiento y la relación de masa (masa AMS/masa de la estructura). Los AMS sólo pueden ser sintonizados a una sola frecuencia estructural.

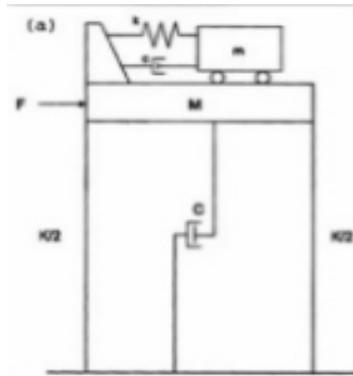


Figura 17 Principio del funcionamiento del Amortiguador de Masa TDM.

Fuente: Bassotti, R. (2004)

2.4.3.2.1.2 Amortiguador de Líquido Sintonizado

Estos dispositivos absorben la energía de la vibración por el movimiento oscilante del líquido contenido en el recipiente y la disipan a través de la fricción intrínseca del líquido y la fricción con la superficie con la superficie de las paredes. Se ha utilizado para aumentar la disipación de energía piezas cilíndricas de polietileno que flotan en el líquido. La frecuencia de estos dispositivos se ajusta con la altura del agua y la dimensión de los recipientes, se sintoniza con la frecuencia natural del edificio. Los amortiguadores de líquido sintonizado se han empleado en general en edificios de altura significativa: hoteles, centros financieros y edificios residenciales, como también en torres de control aéreo de aeropuertos y observatorios (Bassotti R., 2004). La Figura 18 muestra el principio de funcionamiento antes descrito.

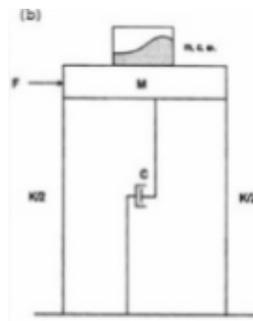


Figura 18. Principio del funcionamiento del Amortiguador de Líquido Sintonizado

Fuente: Bassotti, R. (2004)

2.4.3.3 Sistemas Semi-activos

Trujillo J. (2014) puntualiza que los sistemas de control semiactivos no aplican fuerzas en el sistema estructural, pero poseen propiedades variables que pueden ser controladas para reducir ópticamente la respuesta del sistema estructural es decir, tienen un esquema de funcionamiento muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de estos en que el control estructural se obtienen a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánica (rigidez o amortiguamiento) son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costos energéticos muy reducidos.

2.4.3.4 Sistemas Híbridos

Basado en Trujillo, J. (2014) estos sistemas emplean una combinación de dispositivos pasivos y activos con el fin de incrementar la confiabilidad y eficiencia del control estructural. Debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, los sistemas híbridos suponen importantes mejoras en relación a los sistemas activos.

En caso de fallo del componente activo y aunque menos efectiva, el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control. Los sistemas híbridos tienen requerimientos energéticos inferiores, además que estos operan con múltiples dispositivos de control logrando mayores niveles de rendimiento.

2.4.4 Métodos de Análisis para Estructuras con Amortiguadores o Disipadores de Energía

2.4.4.1 Método de Análisis con Integración en el Tiempo (Time History Analysis)

CSi, 2011 (Computer & Structures. Inc.); destaca que este método brinda un estudio completo de la respuesta de la estructura en el tiempo durante y después de la aplicación de la acción de la carga. Para hallar la respuesta de la estructura utilizando el análisis con integración en el tiempo, se debe resolver la Ecuación 1 que es la ecuación de movimiento de la estructura en función del tiempo (ecuación de equilibrio dinámico):

$$M.\ddot{u}(t) + C.\dot{u}(t) + K.u(t) = -M.r.\ddot{U}g(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Este método anuncia la evaluación lineal y/o no lineal de la respuesta dinámica estructural bajo la carga que puede variar en función del tiempo. Se resuelve usando ya sea el método de la superposición modal o el método de la integración directa. Las condiciones iniciales pueden ser establecidas por la continuación del estado estructural final del análisis anterior.

Este método se puede realizar suponiendo comportamiento elástico-lineal y deberá utilizarse no menos de cinco registros de aceleraciones horizontales, correspondientes a sismos reales o artificiales. Estos registros se deben normalizar de manera que la aceleración máxima corresponda al valor máximo esperado en el sitio. Cabe mencionar que, con el aumento del número de grados de libertad de una estructura, se hace más complejo el

cálculo del método en forma manual, es por ello que se requiere el uso de software que analizan las estructuras reales de elementos finitos no lineales.

2.4.4.1.1 Método de la integración directa

Esta metodología es válida para analizar sistemas lineales y no lineales de estructuras con amortiguamiento no clásico, no tomándose en cuenta los modos de vibración de la estructura. Aplicar éste método para obtener la respuesta de estructuras sometidas a excitaciones sísmicas supone el manejo de herramientas computacionales eficaces, ya que se requiere resolver un sistema de N ecuaciones diferenciales simultáneamente partiendo de la ecuación de movimiento (Ecuación 1).

2.4.5 Disipadores tipo Caja Metálica

Tovar, C. (2008) define que los disipadores de energía tipo Caja Metálica son mecanismos de reducción de energía sísmica pasivos tipo metálicos cuya función es dotar a la estructura de protección sísmica; éste consiste en una caja metálica cerrada de dimensiones 15cmx15cmx32cm, aproximadamente, construida con planchas de acero, en cuyo interior está contenida una serie de láminas metálicas de pequeño espesor, que tienen como función disipar la energía inelásticamente a través de su deformación por flexión. En la Figura 19 se aprecia su diseño:

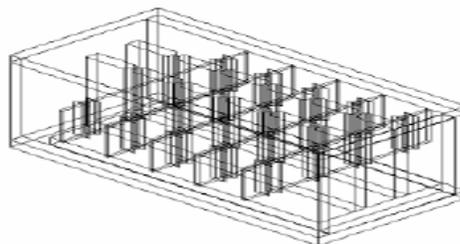


Figura 19. Disipador de energía tipo Caja Metálica

Fuente: Tovar, C. (2008)

El dispositivo tiene los siguientes componentes (Ver Figura 20):

- a. La parte externa, consiste en cinco láminas de acero de 12 mm de espesor atornilladas conformando una caja. Las láminas laterales poseen cinco ranuras de 4mm de espesor, estas ranuras tienen bordes redondeados con acabado liso. La caja tiene sólo tapa posterior.
- b. La parte interna, consiste en tres láminas de acero de 12 mm de espesor constituidas en una especie de letra “π” invertida. Las láminas verticales tienen cinco ranuras de 4mm de espesor con bordes redondeados de acabado liso. Esta pieza posee una tapa frontal.
- c. La última parte constituye el elemento disipador propiamente dicho, está conformada por cinco láminas de 3 mm de espesor que irán a través de las ranuras de las partes externa e interna anteriormente descritas.

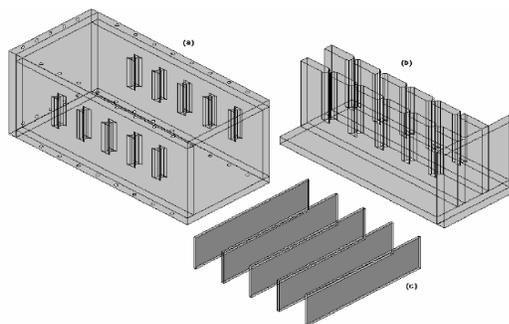


Figura 20. Componentes del Disipador de Energía tipo Caja Metálica. a) Parte Externa. b) Parte Interna Pi invertida. c) Láminas cedentes.

Fuente: Tovar, C. (2008)

2.4.5.1 Principio de Acción:

Fundamentado en la investigación de Tovar C (2008); el dispositivo se accionará a través del desplazamiento experimentado por el edificio durante un terremoto. Esta acción se traduce en una carga aplicada en el centro de la tapa frontal, que hará que la parte interna se deslice dentro de la caja. Este deslizamiento debe ocurrir con facilidad, por lo que se debe aplicar grasa en el interior del dispositivo. Cuando ocurra ese desplazamiento, las láminas se deformarán a flexión hasta sobrepasar el límite elástico del material y comenzarán a disipar la energía introducida por el sismo.

Una vez que cesa el terremoto las láminas deben ser reemplazadas ya que presentarán grandes deformaciones permanentes, para ello la caja debe desarmarse con facilidad, de allí que las uniones entre las piezas sean atornilladas. Los bordes redondeados con acabado liso de las ranuras tienen como finalidad disminuir al máximo el área de contacto entre éstas y las láminas cedentes, de esta manera en el tercio central las cargas serán transmitidas como cargas puntuales y los extremos podrán rotar libremente, comportándose como apoyos fijos, quedando entonces como vigas simplemente apoyadas que se comportarán a flexión pura en su tercio central.

Debido a la particular geometría propuesta (Caja cerrada), el disipador de energía puede ubicarse dentro del sistema estructural de la edificación en cualquiera de las cuatro formas propuestas por Skinner *et al.* (1975) mostradas en la Figura 21.

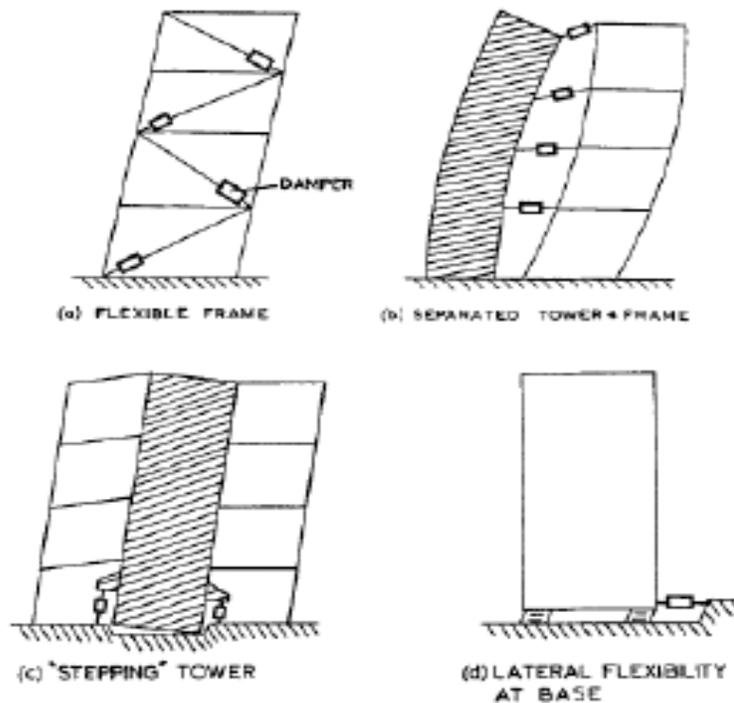


Figura 21. Posibles ubicaciones del disipador tipo Caja Metálica en una estructura.

Fuente: Skinner et al., (1975)

2.4.5.2 Ventajas del Disipador de Energía tipo Caja Metálica:

El dispositivo cumple con los siguientes requisitos: Disipación de energía para un rango de pequeños desplazamientos de entrepiso, haciéndolo ideal para estructuras de baja altura, fuerza desarrollada y controlada en un rango apropiado, proceso de disipación estable y predecible evaluado numérica y experimentalmente, rigidez importante en el plano de deformación para evitar efectos de torsión durante el principio de acción del dispositivo, factibilidad constructiva y dimensiones manejables, debido a su geometría simple y sencilla, fácil desmontaje y reemplazo una vez dañado, bajo costo (Tovar, C, 2008).

2.5 GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acción Sísmica: acción accidentada debida a la ocurrencia de sismos, la cual incorpora los efectos traslacionales y los rotacionales respecto al eje vertical.

Acelerograma: representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un sismo.

Adecuación: acciones constructivas destinadas a reducir la vulnerabilidad sísmica de una edificación, tales como: modificaciones, rehabilitación, reforzamientos, aislamiento sísmico o el uso de disipadores de energía.

Amortiguamiento: capacidad que posee un sistema o cuerpo de disipar una energía y transformarla en otro tipo de energía.

Análisis Dinámico: en sistemas elásticos es un análisis de superposición modal para obtener la respuesta estructural a las acciones dinámicas. En sistemas inelásticos es un análisis en el cual se calcula la historia en el tiempo de la respuesta estructural a las acciones dinámicas.

Concreto: mezcla de cemento Portland o de cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos.

Concreto Reforzado: concreto estructural con porcentajes mínimos de acero de refuerzo, diseñado bajo la suposición de que los dos materiales actúan conjuntamente para resistir las sollicitaciones a las cuales está sometido.

Disipador de Energía: dispositivos encargados de disminuir las acumulaciones de energía asegurándose que otros elementos de la estructuras no sean sobresolicitados, evitando sus posibles daños a la misma; y además brindan un incremento de la amortiguación a la estructura.

Disipador de Energía tipo Caja Metálica: dispositivo pasivo y metálico en forma de caja metálica de dimensiones aproximadas 15x15x32 cm., que brinda protección a la estructura ante las acciones sísmicas.

Edificación: estructura que posee diafragmas, que compatibilizan los desplazamientos horizontales de los miembros que llegan a ese nivel.

Entrepiso: espacio entre dos pisos consecutivos.

Estructura: conjunto de elementos o miembros integrados entre sí que tienen la función de soportar las cargas de la edificación y transmitir las al suelo.

Estructura Regular: estructura que se caracterizan por presentar una configuración simétrica de sus elementos estructurales y otros componentes resistentes a las fuerzas laterales, careciendo de discontinuidades en cuanto a rigidez y/o resistencia.

Estructura Irregular: estructura que se caracterizan por presentar una configuración asimétrica de sus elementos estructurales y otros componentes resistentes a las fuerzas laterales, y su vez poseen discontinuidades en cuanto a rigidez y/o resistencia.

Piso: cada uno de la plantas que integran la edificación.

Piso Blando: irregularidad vertical de una estructura que se manifiesta por medio de una reducción significativa en la rigidez lateral respecto a los demás pisos de la misma.

Respuesta Sísmica: es el conjunto de desplazamientos y fuerzas que se reflejan en una estructura al estar sujetas a acciones sísmicas.

Rigidez Lateral de un Entrepiso: resultado de dividir la fuerza cortante y la diferencia de desplazamientos laterales elásticos entre los dos pisos del entrepiso en consideración.

Sistema de Protección Sísmica: dispositivos de control que brindan la capacidad de dotar a la estructura de resguardo de sus miembros ante las acciones sísmicas.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Introducción

En este capítulo se destacan las consideraciones a tomar en cuenta para realizar la investigación, describiéndose cada fase metodológica, el listado de actividades por objetivo, propiedades de la estructura de concreto reforzado a evaluar, la incorporación de los disipadores en diferentes configuraciones, los parámetros utilizados para generar los acelerogramas de los sismos. Y finalmente el procedimiento seguido de evaluación de la estructura sin y con disipadores de energía.

3.2 Consideraciones Generales

El Trabajo Especial de Grado planteado se encuentra orientado a evaluar la respuesta sísmica de una estructura de concreto reforzado con piso blando, de baja altura, incorporando disipadores de energía tipo Caja Metálica.

Se analiza una estructura aporticada de concreto reforzado de 5 niveles, con 4 vanos en el eje X y 6 vanos en el eje Y, cuyo uso está destinado a ser residencial, ubicado en una zonificación sísmica 5, que según la Norma COVENIN COVENIN-MINDUR 1756:2001-1. *Edificaciones sismorresistentes. Articulado* (1ra Revisión: Tabla 4.1) corresponde a un coeficiente de aceleración horizontal $A_g = 0,3$. En la planta baja del entrepiso se tiene una altura de 3,5 mts., mientras que los niveles superiores los entrepisos poseen una altura de 2,9 mts. Siendo las columnas cuadradas (las esquineras y de borde de 25 cm por 25 cm, mientras que las centrales

son de 30 cm por 30 cm) y las vigas rectangulares (las centrales de 30 cm de ancho por 70 cm de alto mientras que las de borde son de 30 cm de ancho por 60 cm de alto).

3.3 Diseño de las Fases Metodológicas

El presente trabajo se enfocó en las siguientes fases metodológicas:

Primera Fase: Revisión bibliográfica y estado del arte; se trata de que los datos recolectados son en su mayoría provenientes de la información en fuentes bibliográficas y electrónicas, para obtener dicha información fueron necesarios libros, guías de diseño, la normativa vigente nacional e internacional; además de una serie de investigaciones, informes, reportes, entre otros, localizados mediante fuentes electrónicas.

Segunda Fase: Modelar numéricamente la estructura y seleccionar un modelo para los disipadores que se adapte a las condiciones del dispositivo; consiste en realizar dos modelos numéricos, uno de la estructura de concreto reforzado con piso blando de baja altura sin disipadores y el segundo un modelo de la estructura que incorpore los disipadores de energía utilizando el software SAP2000. En esta fase también se escogerán los acelerogramas a emplear para los análisis y se decidirá la ubicación de los dispositivos en el sistema.

Tercera Fase: Realizar el análisis en el tiempo de la estructura sin disipadores y obtener su respuesta, la cual será presentada en términos de los desplazamientos laterales máximos, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes que se reflejan en la estructura al estar sujetas a acciones sísmicas en función del tiempo. Estos valores servirán como patrón de comparación.

Cuarta Fase: Evaluar el comportamiento de la edificación con disipadores, a través del análisis dinámico de la misma y obtención de sus respuestas, al

igual que en la fase anterior ésta se representará en términos de los desplazamientos laterales máximos, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes. Es importante destacar que el tipo de análisis que se realizará en cada estructura es una integración en el tiempo utilizando el programa especializado SAP2000.

Quinta Fase: comparación de las respuestas obtenidas para establecer el efecto de la inclusión de los dispositivos en la estructura.

Los datos recaudados se expresarán de manera numérica, generando una base de datos para su posterior análisis e interpretación. Los resultados del programa de cálculo empleado serán clasificados, tabulados y graficados. Para los resultados obtenidos según las variables de estudio se empleará un análisis descriptivo de las tablas y gráficos elaborados.

3.4 Listado de Actividades por Objetivos

1. Modelar numéricamente la estructura y los disipadores de energía.
 - 1.1. Crear el modelo de la estructura con disipadores y sin disipadores utilizando el software SAP2000.
 - 1.2. Escoger los acelerogramas a emplear para el análisis de la estructura.
 - 1.3. Ubicar los disipadores dentro del sistema.
 - 1.4. Definir los parámetros para la integración en el tiempo (método de integración, paso de integración, otros valores de ajuste requeridos por el programa).

2. Obtener la respuesta de la estructura sin disipadores mediante análisis en el tiempo.
 - 2.1. Obtener la respuesta sísmica de la estructura sin disipadores utilizando el método de Análisis en el Tiempo.

- 2.2. Calcular los desplazamientos laterales máximos, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes de la estructura sin disipadores.
3. Obtener la respuesta de la estructura con disipadores mediante análisis en el tiempo.
 - 3.1. Obtener la respuesta sísmica de la estructura con disipadores utilizando el método de Análisis en el Tiempo.
 - 3.2. Calcular los desplazamientos laterales máximos, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes de la estructura con disipadores.
4. Evaluar la respuesta de la edificación con y sin disipadores de energía en términos de sus desplazamientos laterales máximos, sus derivas y sus fuerzas cortantes.
 - 4.1. Realizar una tabla comparativa donde se representen los valores obtenidos de: desplazamientos laterales máximos, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes tanto de la estructura sin disipadores y con disipadores (Valores calculados en el objetivo 2 y 3).
 - 4.2. Realizar gráficos de cada una de las variables.
 - 4.3. Observar y comparar los valores reflejados en las tablas y los gráficos.
 - 4.4. Redactar conclusiones de lo apreciado.

3.5 Modelado numérico de la estructura y de los disipadores de energía

3.5.1 Estructura y propiedades

A continuación se muestran las vistas de la estructura a ser evaluada:

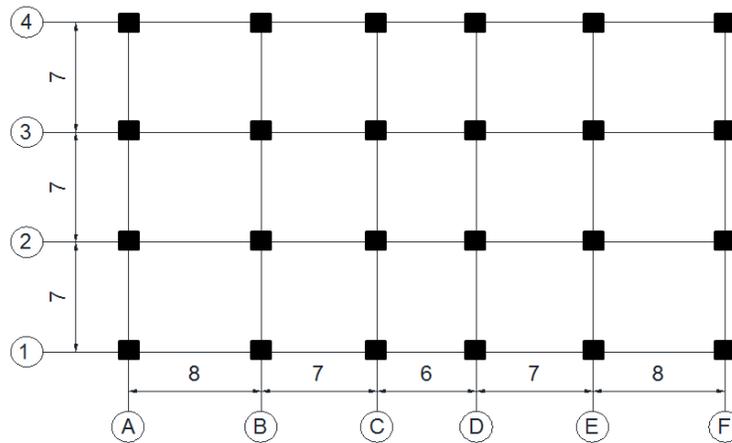


Figura 22. Vista de planta de la estructura.

Fuente: El Autor (2016)



Figura 23. Vista Frontal de la estructura, pórticos 1 y 4. Vigas 30x60

Fuente: El Autor (2016)

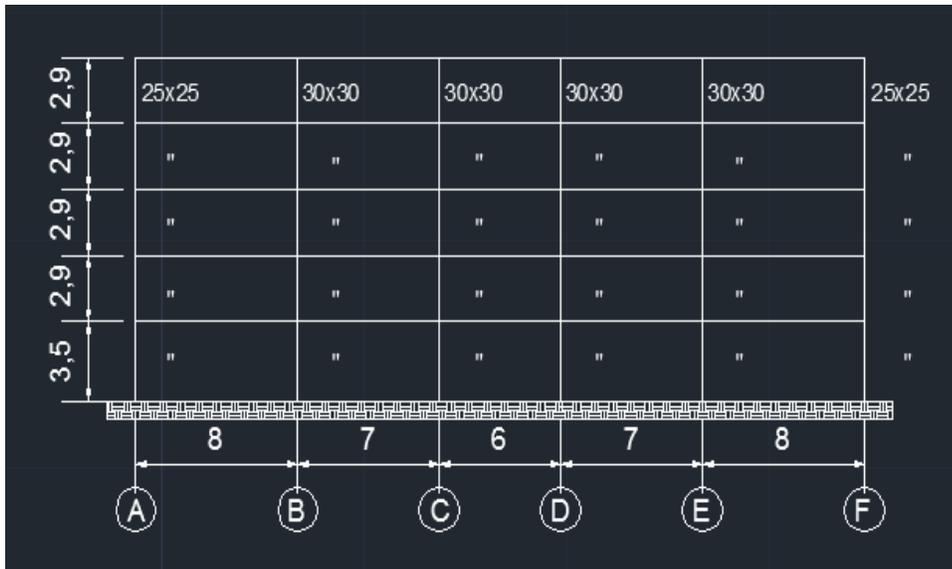


Figura 24. Vista Frontal de la estructura, pórticos 2 y 3. Vigas 30x70
Fuente: El Autor (2016)

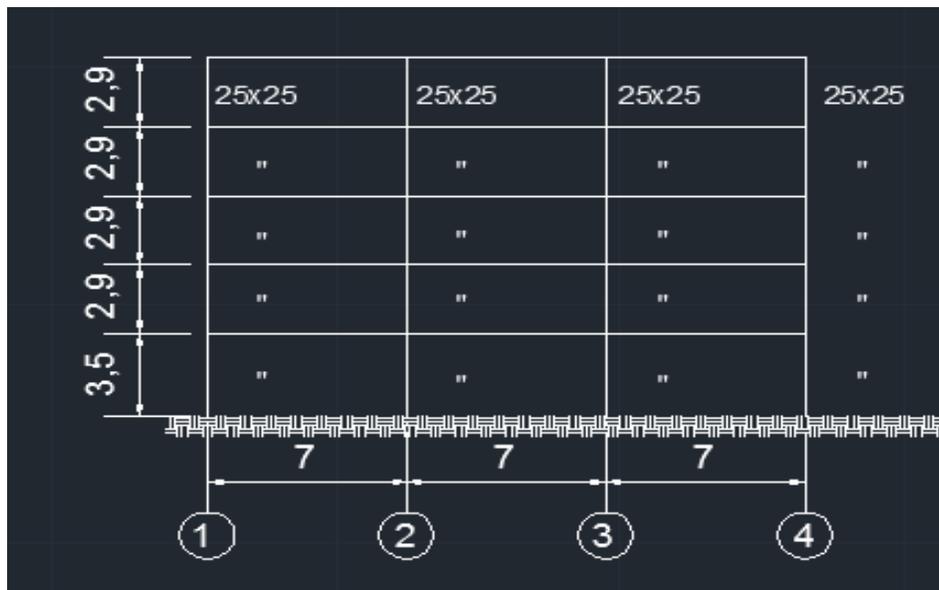


Figura 25. Vista Frontal de la estructura, pórticos A y F. Vigas 30x60
Fuente: El Autor (2016)

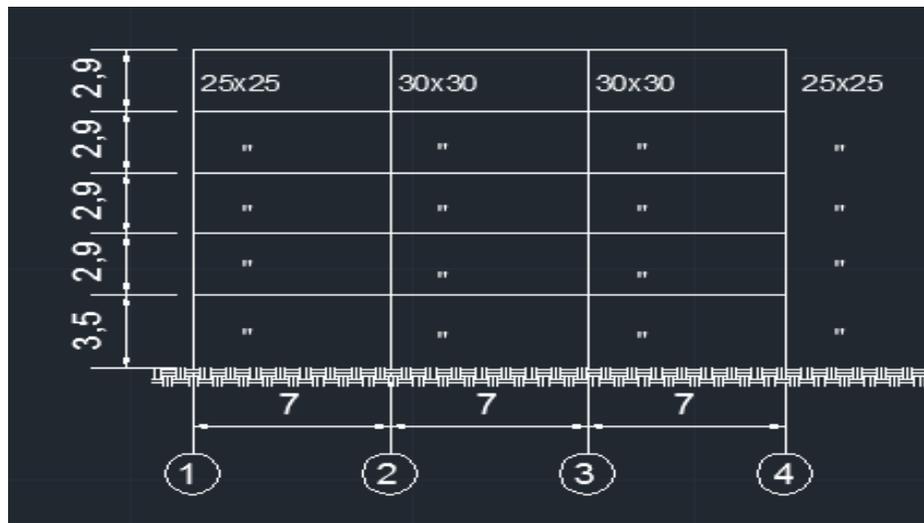


Figura 26. Vista Frontal de la estructura, pórticos B y E. Vigas 30x70
Fuente: El Autor (2016)

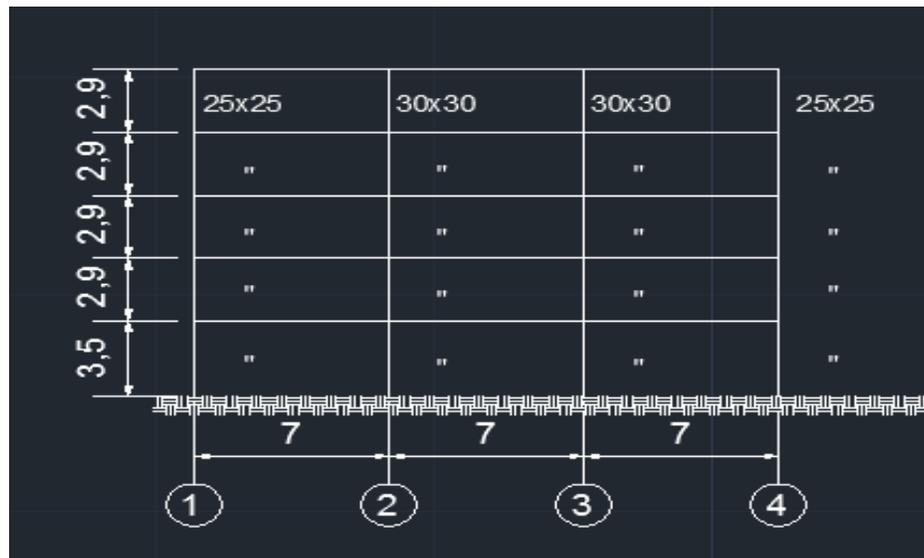


Figura 27. Vista Frontal de la estructura, pórticos C y D. Vigas 30x60
Fuente: El Autor (2016)

La estructura mostrada en las Figuras 22, 23, 24, 25, 26 y 27 es hipotética cuyas dimensiones se trabajaron hasta obtener un piso blando según lo descrito en la norma COVENIN-MINDUR 1756:2001-1.

Edificaciones sismorresistentes. Articulado (1ra Revisión). La Figura 22 muestra el plano de planta de la edificación y la elevación de uno de los pórticos en dirección longitudinal (Figuras 23 y 24). La estructura está conformada por seis pórticos en dirección transversal separados a 8, 7, 6, 7 y 8 m respectivamente y cuatro pórticos en dirección longitudinal separados a 7 m.

En el sistema resistente todas las columnas son de sección cuadrada de 25cmx25cm en los pórticos laterales y en los centrales son de 30cmx30cm, las vigas tanto en dirección longitudinal como transversal son altas de sección rectangular de 30cmx60cm en los pórticos laterales y en los pórticos centrales son de 30cmx70cm.

Para efectos de esta investigación se tomaron los pórticos longitudinales y transversales laterales de la estructura descrita anteriormente. Se modeló como un pórtico plano de cinco pisos, con periodo fundamental (T) de 1.01 seg., masas concentradas en el centro de las vigas, tomando la condición de diafragma rígido y considerando un amortiguamiento (ξ) del 5% para cada uno de los modos de vibración.

Tabla 1. Propiedades del sistema original Dirección X y Y.

Fuente: El Autor (2018)

Nivel	Masa (Kg.sg²/m)	Rigidez (Kg/m)	Período (sg)
5	40.458,72	2.976.190,48	0,44
4	67.431,19	3.649.635,04	0,48
3	67.431,19	3.649.635,04	0,55
2	67.431,19	3.649.635,04	1,00
1	67.431,19	3.355.704,70	1,01

En las Figuras 27 y 29 se aprecia gráficamente el sistema estudiado. Se consideró una resistencia para el concreto (f_c) de 280 kgf/cm^2 y un módulo de elasticidad (E) de 252671 kgf/cm^2 .

Luego se establecieron estas configuraciones para ubicar los disipadores de energía dentro de la estructura:

Para la obtención de las respuestas de las estructuras sin y con amortiguadores se utilizó el programa SAP 2000 V. 19. Los amortiguadores se modelaron como “links” tipo “Multilinear plastic”. Se realizó un análisis lineal con 10 acelerogramas generados a partir de la base de datos PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) Ground Motion Database (luego se describirá como fue su proceso de generación). Para ver el efecto de los amortiguadores las estructuras se comparan en términos de sus desplazamientos de entrepiso, cortantes por piso. Las Figuras 28, 29, 30 y 31 muestran la ubicación adoptada para los disipadores.

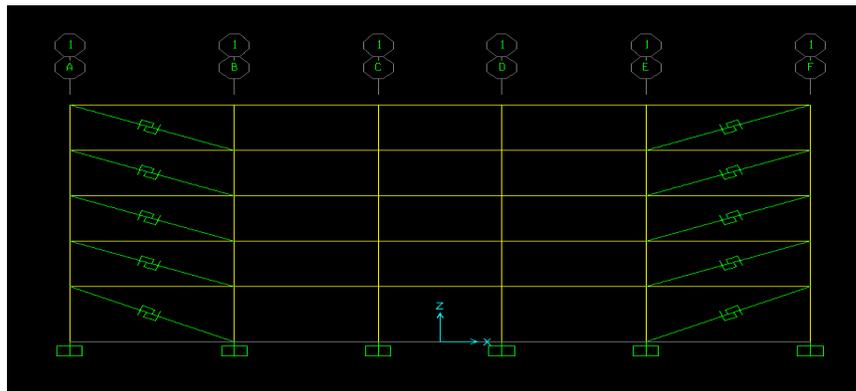


Figura 28. Disipadores ubicados en Configuración 1 Dirección X

Fuente: El Autor (2017)

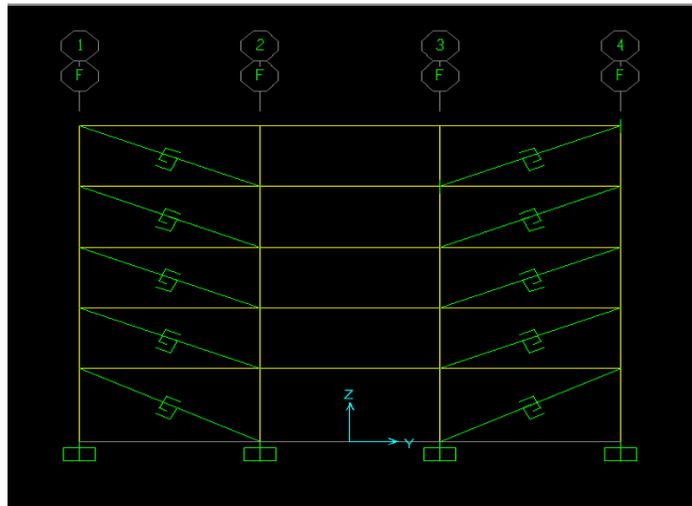


Figura 29. Disipadores ubicados en Configuración 1 Dirección Y

Fuente: El Autor (2017)

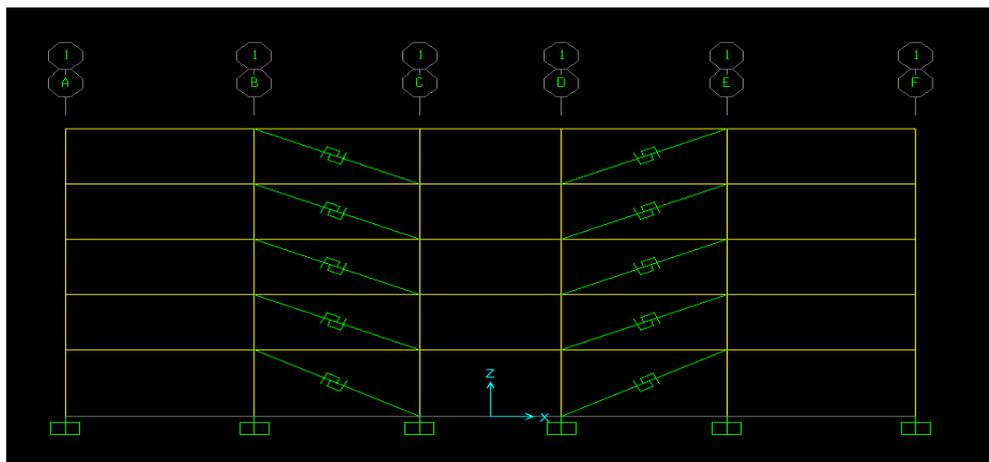


Figura 30. Disipadores ubicados en Configuración 2 Dirección X

Fuente: El Autor (2017)

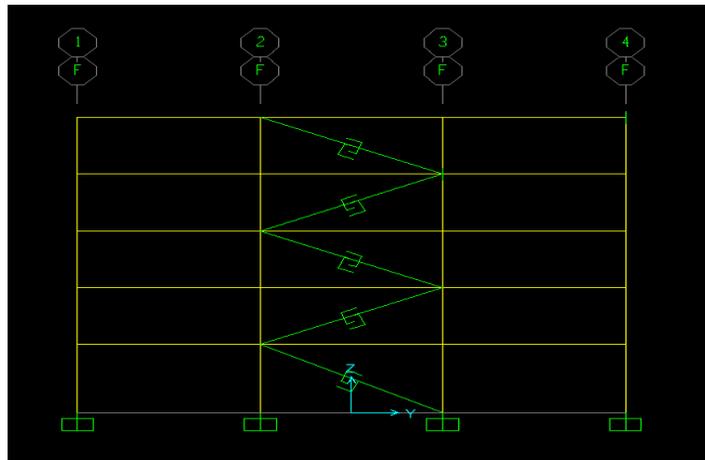


Figura 31. Disipadores ubicados en Configuración 2 Dirección Y

Fuente: El Autor (2017)

Estas configuraciones se consideraron tomando en cuenta las descritas en el capítulo IV de la tesis doctoral de Tovar, C. (2008) para evaluar la respuesta de la estructura con amortiguadores según su distribución en el sistema. En las Figuras 28 y 29 se representan la ubicación de los amortiguadores en los vanos de los extremos de la estructura tanto para la dirección X como Y respectivamente. En las figuras 30 y 31 se muestran la ubicación de los amortiguadores en los vanos centrales de la edificación tanto en la dirección X como Y respectivamente.

3.6 Generación de los acelerogramas a utilizar

Para efectuar los análisis tiempo-historia en este trabajo se dispuso de un grupo de 10 historias o registros de aceleración-tiempo que permitieron representar el sismo diseño que se deseó analizar. El proceso se inicia mediante la construcción del espectro destino o como usualmente se le conoce por su terminología en inglés, espectro “target”. Posteriormente, este grupo de registros sísmicos son adaptados según las características del espectro “target” mediante un proceso de escalatoria. Estos registros sísmicos inicialmente son seleccionados a partir de ciertas características

sísmicas particulares, tales como: magnitud, mecanismo de falla, duración del movimiento, contenido de energía, entre otros, que sean equivalentes al sismo de diseño y las características del sitio. En el proceso de escalatoria se busca que el espectro medio resultante a partir de los registros escalados se acople de la forma más cercana posible al espectro “target”.

Los movimientos del terreno para la generación de registros tiempo-historia que puedan ser utilizados en este tipo de análisis se encuentran disponibles en diferentes bases de datos de registros sísmicos obtenidos a partir de movimientos reales del terreno en diferentes localidades y que son de uso internacional. En función de esto, el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) ha desarrollado una extensa base de datos que incluye más de 3000 movimientos sísmicos del terreno obtenidos de la corteza superficial en zonas sísmicamente activas alrededor del mundo. Asimismo, esta base de datos incorpora una poderosa herramienta que permite seleccionar y escalar registros tiempo-historia para ser acoplados a un determinado espectro target. Esta base de datos se encuentra disponible en el siguiente enlace web: http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database, la cual fue utilizada en la presente investigación para efectuar la selección y proceso de escalatoria de sismos reales que son utilizados para el desarrollo de análisis tiempo-historia en los diferentes modelos de las edificaciones objeto de estudio.

3.6.1 Parámetros del motor de búsqueda del PGMD.

- **Magnitud del Sismo:** Rango de magnitud de momento, la búsqueda quedará restringida a un valor mínimo y un máximo.
- **Tipos de Mecanismo de Falla:** Inversa, Transcurrente, Normal, Normal Oblicua, Reversa, Reversa Oblicua.

- **D5-95 (segundos):** Rango de duración significativa de los registros. La duración se define como el tiempo requerido para acumular entre 5% y 95% de la intensidad total de Arias.
- **R_JB (km):** Rango distancia Joyner-Boore. Distancia horizontal más cercana a la traza de la ruptura que está proyectada verticalmente en la superficie del terreno.
- **Rx (km):** Es la coordenada horizontal del sitio respecto al tope de la ruptura. Para una falla de tipo inversa o normal, si el sitio se encuentra en el lado de la pendiente colgante, Rx, tendrá un valor positivo; y si el sitio se encuentra del lado apoyado, Rx tendrá un valor negativo. Por lo tanto, la base de datos utiliza la convención de signos para Rx para indicar la condición “colgante” en una falla de tipo inversa o normal. Para una falla de tipo transversa, no importa si Rx es positivo o negativo. (Ver Figura 32).
- **R_rup (km):** Rango de distancia más cercana al plano de ruptura. (Ver Figura 32).
- **Vs30 (m/s):** Velocidad promedio de ondas de corte de los primeros 30 metros del sitio.
- **Z1.0 (km):** Profundidad a la cual la velocidad de onda de corta alcanza 1.0 km/s en el sitio. (Ver Figura 32).
- **Z2.5 (km):** Profundidad a la cual la velocidad de onda de corta alcanza 2.5 km/s en el sitio. (Ver Figura 32).
- **Tipo de Pulso:** Característica del pulso del registro a localizar. (Registros de pulso o registro que no sea de pulso).

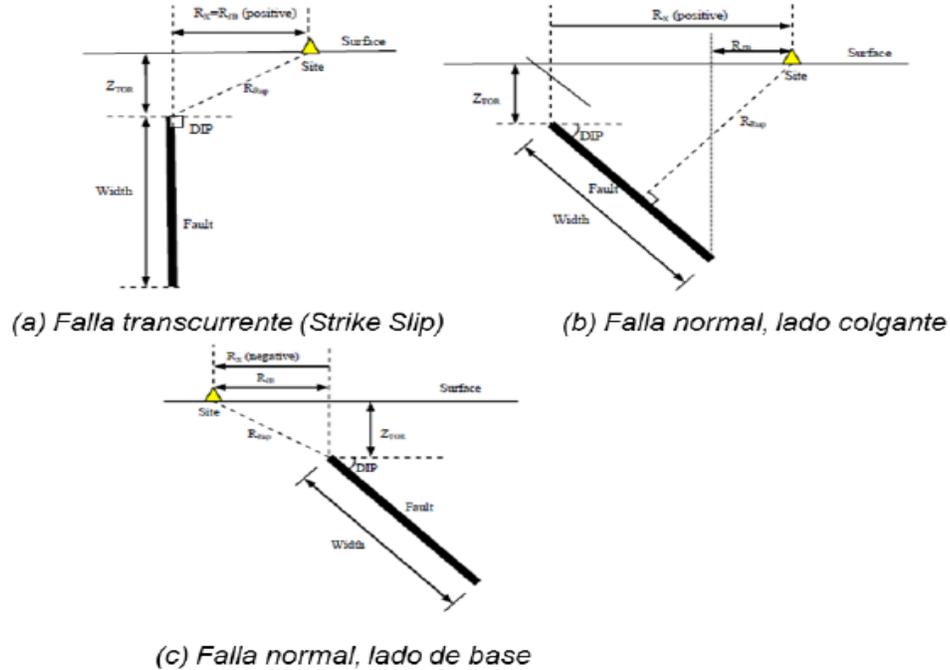


Figura 32. Parámetros de búsqueda del motor PGMD según el tipo de falla

Fuente: PEER (2017)

3.6.1.1 Parámetros adicionales utilizados en el motor de búsqueda del PGMD para espectros escalados.

Con la finalidad de seleccionar registros escalados en función de un espectro “target”, el motor de búsqueda de la base de datos del PEER posee un cuadro de diálogo que permite indicar el criterio de aceptación del registro y efectuar la búsqueda en la base de datos. Adicionalmente, es posible especificar la “función de peso” a utilizarse para escalar los registros y visualizar los registros localizados en un mapa mundial para tener la ubicación geográfica de cada registro desde un punto de vista gráfico. (Ver Figura 33).

El grado de similitud entre el espectro “target” y el espectro del registro se mide mediante el error cuadrático medio entre ambos espectros. La escalatoria de registros en la base de datos se realiza mediante aplicación de un factor lineal de escala que no modifica el contenido de frecuencia relativa de las series de aceleración/tiempo, y por lo tanto no cambia la forma del espectro de respuesta de la serie de tiempo.



Figura 33. Ubicación geográfica de los registros

Fuente: PEER (2017)

Existen dos formas de escalar los registros para acoplarlos al espectro del registro “target”. Es posible escalar el registro para acoplarlo con el espectro “target” en un rango de periodo determinado. En este método, el registro (o pares de registro) se escalan mediante un factor que minimiza el error cuadrático medio entre el espectro de los registros escalados y el espectro “target”.

Adicionalmente, es posible escalar los registros para acoplarlos con el espectro “target” en función de un periodo particular “ T (seg)”. En este esquema, el factor de escala (f) se calcula tal que los espectros de los registros se acoplan al espectro “Target” en función de un valor de periodo particular “ T (seg)”, tal como se indica en la expresión (Ecuación. 2):

$$f = \frac{SA^{target}(T)}{SA^{registro}(T)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Los parámetros adicionales utilizados en el motor de búsqueda del PGMD para espectros escalados son los siguientes:

Factor Limite: Rango de factores de escala (mínimo, máximo). El parámetro es aplicable únicamente si la opción de “escalar” está activa y la opción de “periodo particular” esta desactivada, es decir, los registros están escalados, pero no están escalados en función de un periodo individual.

Periodo (T) (segundos): Es el valor de periodo espectral “target” para el cual están escalados todos los registros. El parámetro es aplicable únicamente si la opción de “escalar” está activa y la opción de “periodo particular” está activa de igual forma, es decir, los registros están escalados, pero únicamente en función de un periodo individual.

Secuencia de Periodos: Es una secuencia de números reales de periodos (T_1, T_2, \dots, T_n) utilizados para especificar una función de peso. La secuencia de números es en orden ascendente, entre 0.01 y 10 segundos.

Peso de la Secuencia de Periodos: Es una secuencia de números reales no negativos, de pesos o ponderaciones utilizadas para especificar la función de peso. La secuencia numérica se aplica mediante correspondencia “uno a

uno” en función de la secuencia de periodos definida previamente (W1, W2,...Wn). En la base de datos del PEER, la función de peso se discretiza mediante interpolación lineal a lo largo de valores discretos de periodos en escala logarítmica. Con la finalidad de mantener suficiente exactitud, se discretiza un ciclo logarítmico a partir de 100 puntos. Por lo tanto, existen 301 puntos discretos de periodos (puntos extremos incluidos) para un rango total entre 0.01 y 10 segundos. La función de peso representa únicamente los pesos relativos asignados a diferentes periodos discretos y son normalizados en el programa tal que la suma de las funciones de peso a lo largo de los puntos discretos de periodo es igual a la unidad. (Ver Figura 34)

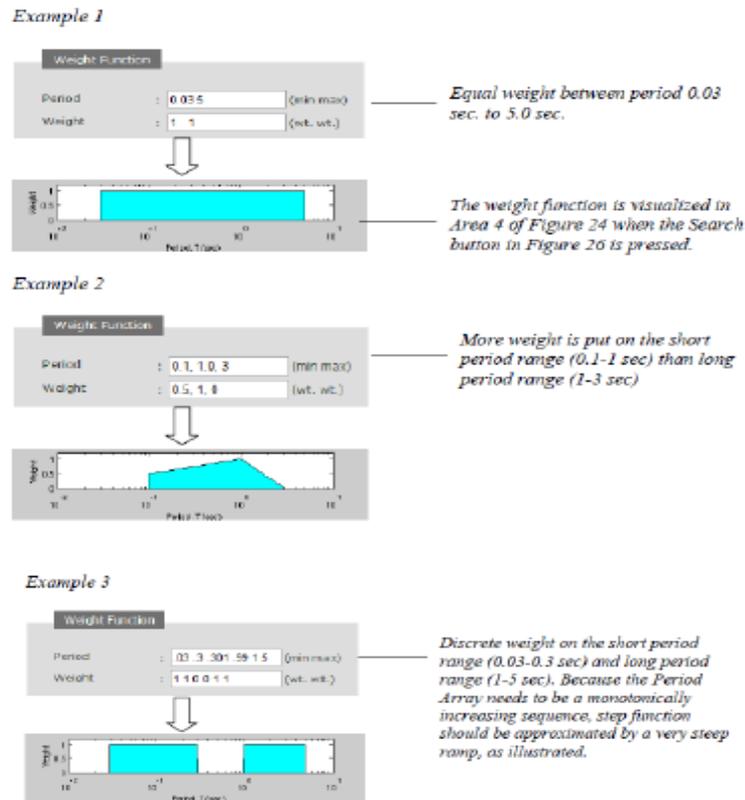


Figura 34. Ejemplos de funciones de peso

Fuente: PEER (2017)

Número Total Promediado: Especifica el número total de registros espectrales utilizados para calcular el espectro promedio. El número será transformado automáticamente al máximo posible si el número total de salida de registros es menor. (Ver Figura 35).

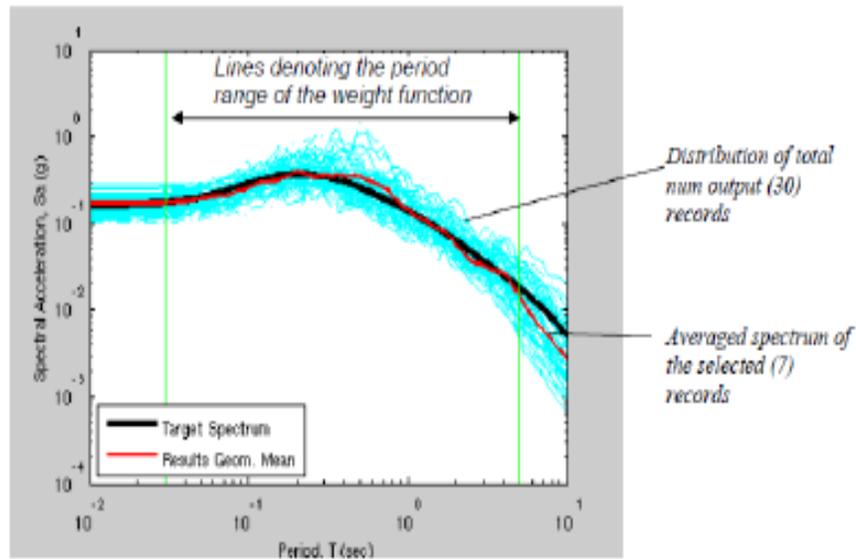


Figura 35 Ejemplo de espectro promedio para registros seleccionados.

Fuente PEER (2017)

3.6.2 Generación y escogencia de los acelerogramas a utilizar

Los registros sísmicos utilizados en los análisis tiempo-historia fueron seleccionados a partir de la base de datos del PEER según los parámetros descritos a continuación:

Para sismos cuyo origen es de fuente cercana:

- Tipo de Falla: Falla transcurrente (Strike Slip).

- Rango de magnitud en la escala de momento (min, max): 5.0 – 7.50.
- Distancia más cercana al plano de ruptura en Km. (R_rup) (min, máx.): 1.0 km – 20.0 km. (Sismo de fuente de origen cercano)
- Vs30 (m/s) (min, max): 250 m/s – 400 m/s. (Suelos duros o densos)
- Número máximo de registros: 10.
- Factor de escala (min, máx.): (0.1 – 10)
- Ordenada Espectral: RotD50
- Porcentaje de amortiguamiento: 5%
- Media del grupo de registros: Aritmética
- Método de Escalatoria: El registro se escala mediante un factor que minimiza el error cuadrático medio que se obtiene al relacionar el espectro medio de los registros escalados con el espectro “target”.

Edit Search

Load Sample Input Values Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Platfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : RSN1...RSNn

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type :

Magnitude :

R JB(km) :

R_rup(km) :

Vs30(m/s) :

D5-95(sec) :

Pulse :

Additional Characteristics:

Max No. Records : ()

Initial ScaleFactor :

Suite

Spectral Ordinate :

Damping Ratio :

Suite Average :

Scaling

Scaling Method :

MSE = Computed Weighted Mean Squared Error of record, and suite average, wrt target spectrum.

Weight Function

Used in both search and scaling when computing MSE. Values can be updated for rescaling. Intermediate points are interpolated with $W = f_{\text{sn}}(\log(T))$

Period Points : (T_1, T_2, \dots, T_n)

Weights : (W_1, W_2, \dots, W_n)

W

Period (sec)

Figura 36. Parámetros seleccionados para sismos de fuente cercana

Fuente: PEER (2017)

La Figura 36 refleja los parámetros introducidos en la base de datos del PEER para generar los sismos con origen de fuente cercana. Y la Figura

37 muestra el espectro de respuesta de los sismos generados con fuente de origen cercana.

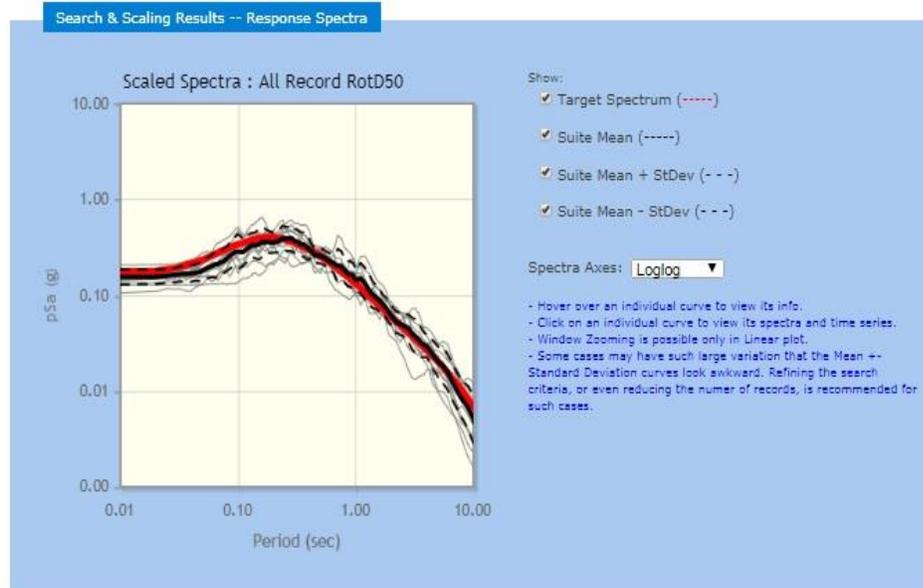


Figura 37 Espectro de respuesta para los sismos de fuente cercana

Fuente: PEER (2017)

La Tabla 2 muestra los 10 sismos con fuente de origen cercana generados con sus características correspondientes:

Tabla 2. Sismos con origen de fuente cercana generados por la base de datos PEER. Fuente: El Autor (2017)

Nombre del sismo	País	Año	Magnitud	Nombre de la estación
Imperial Valley	Estados Unidos-México	1979	6.53	Compuertas
Imperial Valley	Estados Unidos-México	1979	6.53	Parachute Test Site
Morgan Hill	Estados Unidos	1984	6.19	Gilroy Array #3
Chalfant Valley	Estados Unidos	1986	6.19	Bishop-LADWP South St
Landers	Estados Unidos	1992	7.28	Joshua Tree
Duzce	Turquía	1999	7.14	Lamont 1062
Darkfield	Nueva Zelanda	2010	7.0	DFHS
Darkfield	Nueva Zelanda	2010	7.0	LRSC
Darkfield	Nueva Zelanda	2010	7.0	RKAC
San José	Estados Unidos	2007	5.45	Ground Level

Para sismos cuyo origen es de fuente lejana:

- Tipo de Falla: Falla transcurrente (Strike Slip).
- Rango de magnitud en la escala de momento (min, max): 5.0 – 7.50.
- Distancia más cercana al plano de ruptura en Km. (R_rup) (min, máx.): 21.0 km – 50.0 km. (Sismo de fuente de origen lejano)
- Vs30 (m/s) (min, max): 250 m/s – 400 m/s. (Suelos duros o densos)
- Número máximo de registros: 10.
- Factor de escala (min, máx.): (0.1 – 10)
- Ordenada Espectral: RotD50
- Porcentaje de amortiguamiento: 5%

- Media del grupo de registros: Aritmética
- Método de Escalatoria: El registro se escala mediante un factor que minimiza el error cuadrático medio que se obtiene al relacionar el espectro medio de los registros escalados con el espectro “target”.

Edit Search

Load Sample Input Values Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : RSN1...RSNn

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type : ▼

Magnitude : min,max

R_JB(km) : min,max

R_rup(km) : min,max

Vs30(m/s) : min,max

D5-95(sec) : min,max

Pulse : ▼

Additional Characteristics:

Max No. Records : (<=100)

Initial ScaleFactor : min,max

Suite

Spectral Ordinate : ▼

Damping Ratio : ▼

Suite Average : ▼

Scaling

Scaling Method : ▼

MSE = Computed Weighted Mean Squared Error of record, and suite average, wrt target spectrum.

Weight Function

Used in both search and scaling when computing MSE. Values can be updated for rescaling. Intermediate points are interpolated with $W = f_{xn}(\log(T))$

Period Points : (T1,T2, ... Tn)

Weights : (W1,W2, ... Wn)

Figura 38. Parámetros seleccionados para sismos de fuente lejana

Fuente: PEER (2017)

La Figura 38 refleja los parámetros introducidos en la base de datos del PEER para generar los sismos con origen de fuente lejana. Y la Figura 39 muestra el espectro de respuesta de los sismos generados con fuente de origen cercana.

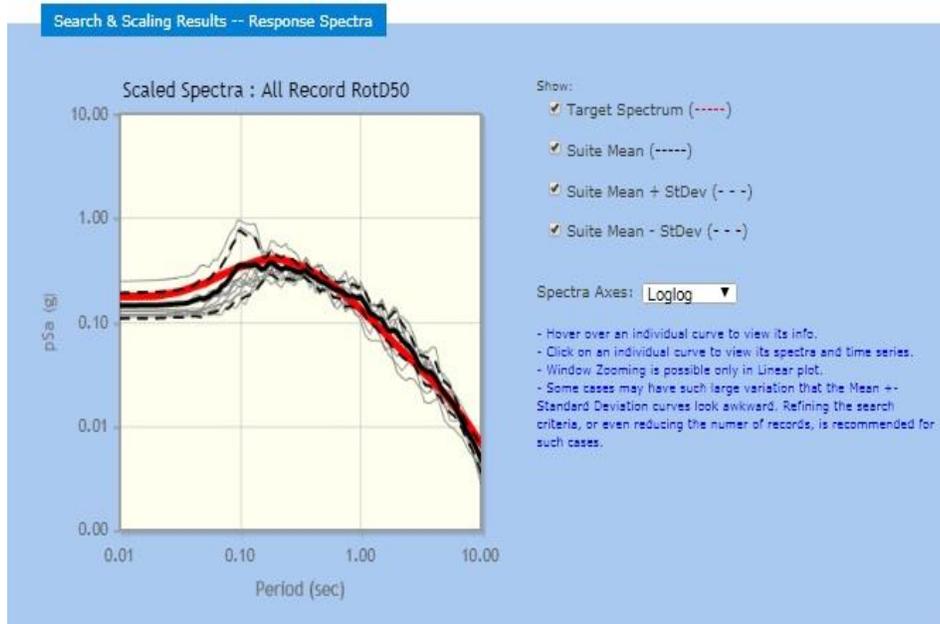


Figura 39. Espectro de respuesta para los sismos de fuente lejana

Fuente: PEER (2017)

Como se describió anteriormente la estructura fue sometida a 10 registros acelerográficos para su análisis lineal. Dichos registros partieron de la base de datos de movimientos del terreno del Pacific Earthquake Engineering Reserch Center (*PEER Ground Motion Database PGMD*), lo cual es una aplicación web interactiva que permite al usuario seleccionar grupos de series de aceleración/tiempo de movimientos del terreno que son representativos de movimientos de diseño del terreno. El usuario especifica los movimientos de diseño del terreno en términos de un espectro de respuesta “target” y las características de los movimientos sísmicos del terreno en términos de magnitud del sismo, distancia origen/sitio y otras características generales. La aplicación selecciona series de aceleración/tiempo de la base de datos PEER-NGA para diferentes mecanismos de falla que satisfagan los criterios de selección especificados

por el usuario que tengan el mejor acople con el espectro de respuesta “target”.

La Tabla 3 muestra los 10 sismos con fuente de origen lejana generados con sus características correspondientes:

Tabla 3. Sismos con origen de fuente lejana generados por la base de datos PEER. Fuente: El Autor (2017)

Nombre del sismo	País	Año	Magnitud	Nombre de la estación
Morgan Hill	Estados Unidos	1984	6.19	San Juan Bautista 24 Polk St
Landers	Estados Unidos	1992	7.28	Desert Hot Springs
Landers	Estados Unidos	1992	7.28	North Palm Springs
Kobe	Japón	1995	6.9	Abeno
Kobe	Japón	1995	6.9	Tadoka
Gul of Aqaba	Egipto-Arabia Saudita	1995	7.2	Eilat
Landers	Estados Unidos	1992	7.28	North Palm Springs Fire Sta #36
Tottori	Japón	2000	6.61	OKYH03
Tottori	Japón	2000	6.61	TTRH04
Parkfield	Estados Unidos	2004	6.0	Coalinga-Fire Station 39

Sismos seleccionados para el análisis de la estructura

Para los sismos de fuente cercana se eligieron 5 registros considerando los de mayor magnitud, seleccionando una sola estación del sismo. Los 5 registros escogidos se pueden apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4. Sismos con origen de fuente cercana seleccionados para analizar la estructura. Fuente: El Autor (2017)

Nombre del sismo	País	Año	Magnitud	Nombre de la estación
Imperial Valley	Estados Unidos-México	1979	6.53	Compuertas
Chalfant Valley	Estados Unidos	1986	6.19	Bishop-LADWP South St
Landers	Estados Unidos	1992	7.28	Joshua Tree
Duzce	Turquía	1999	7.14	Lamont 1062
Darkfield	Nueva Zelanda	2010	7.0	DFHS

Para los sismos de fuente lejana se eligieron 5 registros considerando los de mayor magnitud, seleccionando una sola estación del sismo. Los 5 registros escogidos se pueden apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5. Sismos con origen de fuente lejana seleccionados para analizar la estructura. Fuente: El Autor (2017)

Nombre del sismo	País	Año	Magnitud	Nombre de la estación
Morgan Hill	Estados Unidos	1984	6.19	San Juan Bautista 24 Polk St
Landers	Estados Unidos	1992	7.28	Desert Hot Springs
Kobe	Japón	1995	6.9	Tadoka
Tottori	Japón	2000	6.61	OKYH03
Parkfield	Estados Unidos	2004	6.0	Coalinga-Fire Station 39

3.7 Procedimiento de diseño para la inclusión de los dispositivos de la estructura

Para la inclusión de los amortiguadores propuestos en una estructura y evaluar la eficacia de los mismos, con base en la metodología presentada por Tovar, C. (2008) se estableció el siguiente procedimiento de adaptación de los amortiguadores a una estructura:

- 1.- El primer paso es analizar el sistema sin amortiguadores y determinar así la rigidez lateral (K_f) de cada piso de la estructura.

- 2.- Decidir la ubicación de los dispositivos en el edificio (ver Figuras 29, 30, 31 y 32) y considerar que el sistema de amortiguamiento adicional estará conformado por el amortiguador propiamente dicho y los elementos que lo conectarán a la estructura, en este caso brazos rígidos de acero constituidos

por perfiles tubulares de sección cuadrada, que en conjunto aportarán una rigidez adicional al sistema (K_a).

3.- Utilizando las propiedades del disipador caja metálica, obtener un amortiguador viscoso equivalente. Tomando en cuenta la rigidez elástica obtenida del ensayo (K_d) realizado por Tovar C., y determinando su constante de amortiguamiento equivalente (C_e).

4.- Establecer una relación entre la rigidez lateral de cada piso (K_f) y la rigidez del conjunto amortiguador (K_a), esta relación se denota como SR (Ver Ecuación 3)

$$SR = \frac{K_a}{K_f} \quad \text{Ecuación 3}$$

En este trabajo, según lo recomendado por Tovar, C. (2008) y tomando en consideración el período de la estructura seleccionada para el análisis, se adoptó un valor de SR cercano a 1,8.

5.- Adaptar los valores de K_d y K_a según el valor de SR seleccionado y determinar los valores de rigidez de piso de la estructura ahora con los amortiguadores incorporados.

6.- Analizar la estructura con amortiguadores y repetir los pasos 3 y 4 hasta obtener los resultados deseados para el sistema.

7.- Ajustar los amortiguadores tomando en cuenta sus propiedades elásticas.

El proceso de ajuste de los amortiguadores implica la formulación de una expresión matemática (ver Ecuación 4) que, considerando las propiedades geométricas del dispositivo, permita estimar la rigidez elástica

obtenida en el ensayo. Esto permitiría, de ser necesario, determinar unas nuevas dimensiones para el dispositivo.

Tovar, C (2008) propone la siguiente expresión:

$$Kd = \frac{N.E.b.h^3}{0,42.l^3} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde N representa el número de láminas del amortiguador, E es el módulo de elasticidad del material, b es la anchura de las láminas, h es su altura y L su longitud.

En resumen el procedimiento para la evaluación de estructuras consiste en determinar la rigidez lateral de cada piso de la estructura sin amortiguadores; definir la ubicación de los disipadores y su sistema dentro de la estructura; obtener un amortiguador viscoso equivalente; establecer una relación entre la rigidez lateral de cada piso (Kd) y la del sistema del amortiguador (Ka); adaptar los valores de Kd y Ka según la relación establecida anteriormente; analizar la estructura hasta obtener los resultados deseados para el sistema y finalmente reajustar los amortiguadores tomando en cuenta sus propiedades elásticas.

El tipo de solución seleccionado en el método de integración directa en el SAP2000 es el tiempo de integración Hilber-Hughes-Taylor, realizándose corridas de la estructura sin y con amortiguadores en la configuración 1 y 2 (ver Figuras 28, 29, 30 y 31), considerando el disipador con sus propiedades originales y ajustados al 70%, con los 5 sismos de fuente cercana seleccionados (ver Tabla 4) y los 5 sismos de fuente lejana seleccionados (ver Tabla 5), tanto para la dirección X como la dirección Y para determinar los desplazamientos laterales de cada nivel y sus

respectivas fuerzas cortantes, siendo un total de 320 corridas de la estructura en el programa indicado. El tipo de análisis para la estructura es lineal y no lineal para el disipador.

Las propiedades originales del disipador caja metálica son: rigidez elástica (Kd) de 191.400 Kgf/m y constante de amortiguamiento equivalente (Ce) igual a 4975,9 Kgf.sg/m. Para el disipador caja metálica ajustado al 70%, la rigidez elástica (Kd) es de 13.398.000 Kg/m y la constante de amortiguamiento (Ce) igual a 348.313 Kgf.sg/m. En las gráficas 1 y 2 se puede apreciar el comportamiento histerético (ciclo de histéresis) que modela al amortiguador original y ajustado al 70% respectivamente con los valores de los puntos graficados se aprecian en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6 Fuerzas y desplazamientos que experimenta el amortiguador caja metálica original. Fuente: El Autor (2018)

Desplazamiento d (mm)	Fuerza P (Ton)
-14	-1,5103
-4,162	-0,8075
0	0
4,162	0,8075
14	1,5103

Gráfico 1 Envoltente de los ciclos de histéresis del amortiguador caja metálica original. Fuente: El Autor (2018)

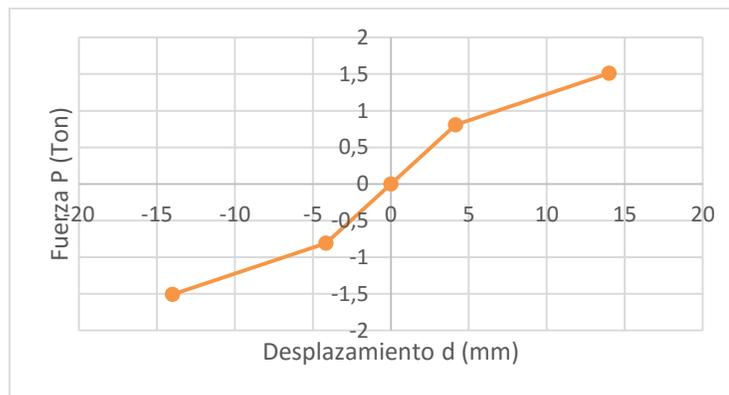
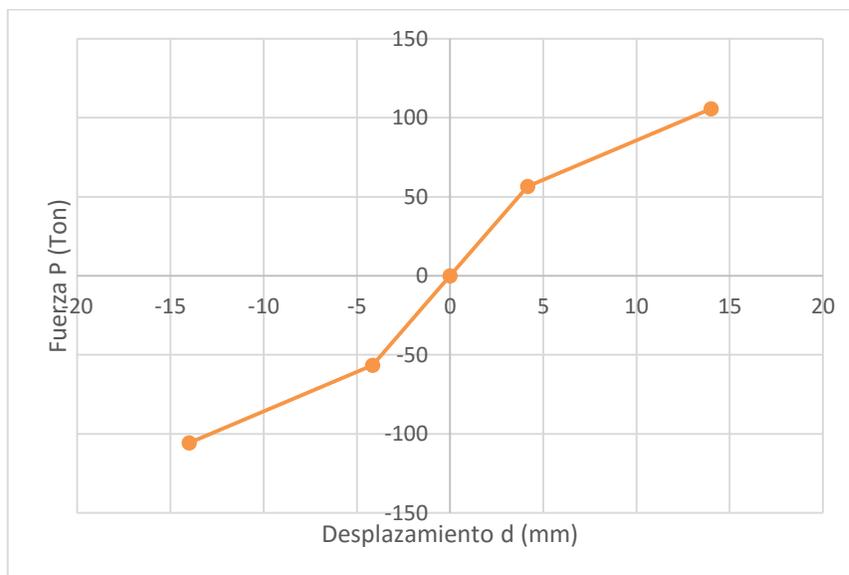


Tabla 7 Fuerzas y desplazamientos que experimenta el amortiguador caja metálica ajustado al 70%

Desplazamiento d (mm)	Fuerza P (Ton)
-14	-105,721
-4,162	-56,525
0	0
4,162	56,525
14	105,721

Gráfico 2 Envolvente de los ciclos de histéresis del amortiguador caja metálica ajustado al 70%. Fuente: El Autor (2018)



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se reflejan los resultados obtenidos para cumplir con los objetivos de la presente investigación; se llevó el análisis de un modelo de una estructura hipotética de concreto reforzado con piso blando. Primeramente se realizó un modelo de la edificación sin disipadores, para la cual se realizó un análisis mediante el método modal espectral determinando propiedades tales como: períodos y frecuencias modales de la estructura sin y con amortiguamiento. Este modelo se realizó como un dimensionamiento de la edificación. Posteriormente a la misma estructura se realizó un análisis tiempo-historia, con los registros sísmicos seleccionados generados por la base de datos PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) Ground Motion Database. Por último a la estructura se le incorporaron disipadores de energía tipo caja metálica en diferentes configuraciones, y se realizaron diversas pruebas con distintas rigideces hasta determinar la combinación de rigideces de los disipadores más favorable en el comportamiento de la estructura. Con estos modelos fue posible analizar el comportamiento de la estructura con y sin disipadores de energía.

Cabe destacar que de las Tablas 3 y 4 se eligieron 5 sismos de mayor magnitud tanto de fuente cercana y como de fuente lejana generados por la base de datos PEER para evaluar la respuesta sísmica de la estructura, en este capítulo se resumen 320 corridas de análisis realizadas en el SAP2000 para evitar la sobrecarga de información de resultados obtenidos se presentan los más significativos tanto para la fuente cercana como lejana, ellos son; para los sismos de fuente cercana están: Landers con un

aceleración pico máxima de 16,56 m/sg² y Darkfield con 16,03 m/sg²; para los sismos de fuente lejana se escogieron Tottori con una aceleración pico máxima de 12,58 m/sg² y Kobe con 12,57 m/sg².

El procedimiento descrito en la sección 3.5.3 se aplicó de forma iterativa hasta obtener niveles importantes de reducción en la respuesta de la estructura, considerados en este trabajo alrededor de un 40% para dicha reducción. Se comenzó utilizando el amortiguador con sus propiedades originales, esto es, una rigidez elástica (Kd) obtenida del ensayo realizado por Tovar C. (2008) de 191.400 kgf/m y una constante de amortiguamiento equivalente (Ce) de 4975,9 kgf.sg/m. En la Tabla 10 y 11 se muestran los valores finales adoptados para la rigidez por piso incluyendo los amortiguadores (Ka), la rigidez elástica del amortiguador (Kd) y la correspondiente constante de amortiguamiento equivalente (Ce) tanto para la configuración 1 como para la configuración 2 asumidas respectivamente (ver Imágenes 28, 29, 30 y 31). En la Tabla 8 se muestran los modos de vibración de la estructura en la dirección X y Y, y en la Tabla 9 las propiedades dinámicas del sistema estudiado resaltando los porcentajes de diferencia de rigidez lateral entre niveles, destacándose un 42,32% entre el primer y segundo entrepiso (irregularidad de piso blando; mayor a 30%)

Tabla 8. Modos de vibración de la estructura dirección X y Y.

Fuente: El Autor (2018)

Piso	Período (sg.)	Frecuencia (sg⁻¹)	Amortiguamiento
5	0,44	2,27	5%
4	0,48	2,08	5%
3	0,55	1,82	5%
2	1,00	1,00	5%
1	1,01	0,99	5%

Tabla 9. Propiedades dinámicas del sistema estudiado. Fuente: El Autor (2017)

Piso	Dirección X				Dirección Y			
	Masa (Kg.sg ² /m)	Período Fundamental (sg)	Rigidez lateral Kf (Kgf/m)	%	Masa (Kg.sg ² /m)	Período Fundamental (sg)	Rigidez lateral Kf (Kgf/m)	%
5	1.123,85	1,01	5.952.380,95	13,69	642,2	1,01	2.976.190,48	18,45
4	1.873,09		6.896.551,72	0	1.070,34		3.649.635,04	0
3	1.873,09		6.896.551,72	0	1.070,34		3.649.635,04	0
2	1.873,09		3.745.318,35	42,32	1.070,34		3.649.635,04	8,76
1	1.873,09		6.493.506,49		1.070,34		3.355.704,70	

Tabla 10. Valores de Rigidez lateral por piso con amortiguadores (Ka), Rigidez del amortiguador (Kd) y su constante de amortiguamiento equivalente (Ce) para la Configuración 1. Fuente: El Autor (2017)

Piso	Dirección X			Dirección Y		
	Ka (kgf/m)	Kd (Kgf/m)	Ce (Kgf.sg/m)	Ka (kgf/m)	Kd (Kgf/m)	Ce (Kgf.sg/m)
5	47.619.047,62	13.398.000	348.313	17.241.379,31	13.398.000	348.313
4	100.000.000,00	13.398.000	348.313	32.258.064,52	13.398.000	348.313
3	100.000.000,00	13.398.000	348.313	32.258.064,52	13.398.000	348.313
2	100.000.000,00	13.398.000	348.313	32.258.064,52	13.398.000	348.313
1	90.909.090,91	13.398.000	348.313	29.411.764,71	13.398.000	348.313

Tabla 11. Valores de Rigidez lateral por piso con amortiguadores (Ka), Rigidez del amortiguador (Kd) y su constante de amortiguamiento equivalente (Ce) para la Configuración 2. Fuente: El Autor (2017)

Piso	Dirección X			Dirección Y		
	Ka (kgf/m)	Kd (Kgf/m)	Ce (Kgf.sg/m)	Ka (kgf/m)	Kd (Kgf/m)	Ce (Kgf.sg/m)
5	47.619.047,62	13.398.000	348.313	14.705.882,35	13.398.000	348.313
4	90.909.090,91	13.398.000	348.313	27.777.777,78	13.398.000	348.313
3	90.909.090,91	13.398.000	348.313	27.777.777,78	13.398.000	348.313
2	90.909.090,91	13.398.000	348.313	27.777.777,78	13.398.000	348.313
1	83.333.333,33	13.398.000	348.313	24.390.243,90	13.398.000	348.313

4.2 Desplazamientos laterales por pisos

En esta parte los resultados son mostrados en Gráficos, reflejando los desplazamientos laterales en la dirección X y en la dirección Y de la estructura sin amortiguador, con amortiguadores en configuración 1 y en configuración 2; obtenidos por el programa SAP2000 para cada nivel de la edificación; se resumen los resultados seleccionando 2 sismos de fuente cercada y 2 sismos de fuente lejana de las Tablas 4 y 5.

Los desplazamientos de los pisos se aprecian en los Gráficos 3, 4, 5 y 6 con su correspondiente reducción al incorporar los disipadores en la estructura, tanto para la dirección X como Y con la disposición de amortiguadores en la configuración 1 como en la 2 respectivamente.

Se observa que al añadir los amortiguadores en la edificación los desplazamientos experimentan una reducción significativa. En la dirección X la reducción promedio para la configuración 1 es del 43,16%, mientras que la reducción para la configuración 2 es del 43,11%. En la dirección Y la reducción promedio para la configuración 1 es del 23,83%, y para la configuración 2 es de 14,41%.

Es importante destacar que las líneas de los sismos de Landers y Darkfield (fuente cercana) y Tottori y Kobe (fuente lejana) presentan valores muy cercanos por ende no se distinguen muy bien en los gráficos; esta situación aplica tanto para la respuesta sin amortiguamiento como con amortiguamiento.

Gráfico 3. Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X. Fuente: El Autor (2017)

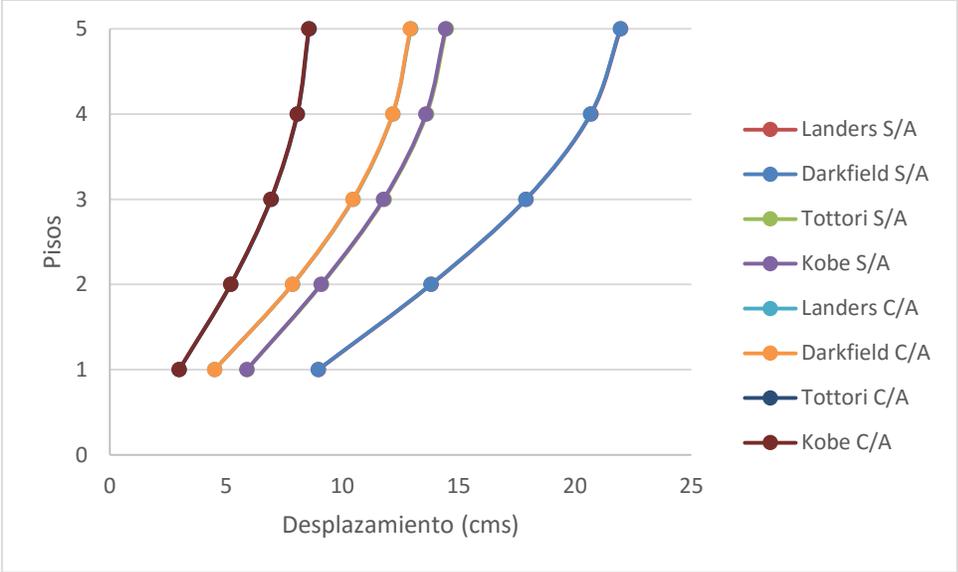


Gráfico 4. Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y. Fuente: El Autor (2017)

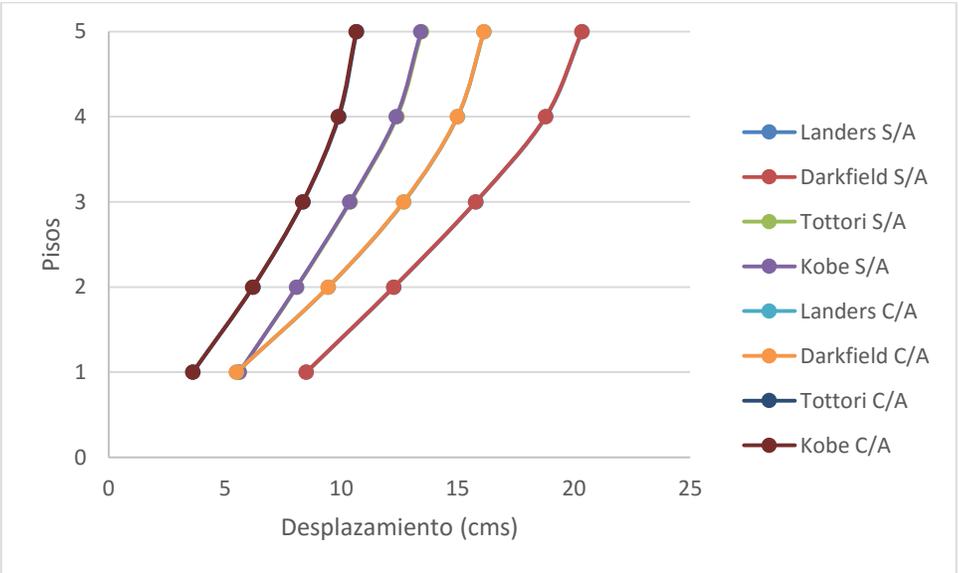


Gráfico 5. Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2

Dirección X

Fuente: El Autor (2017)

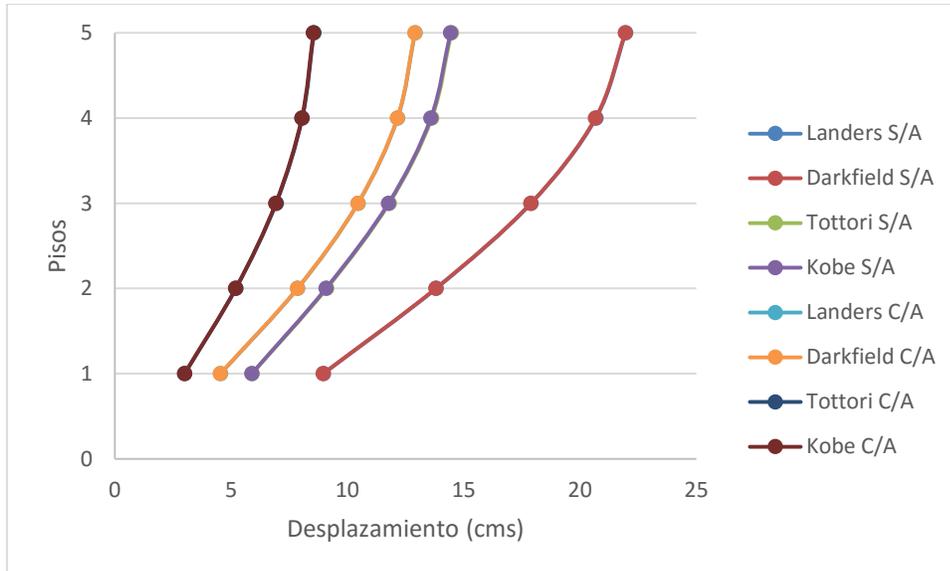
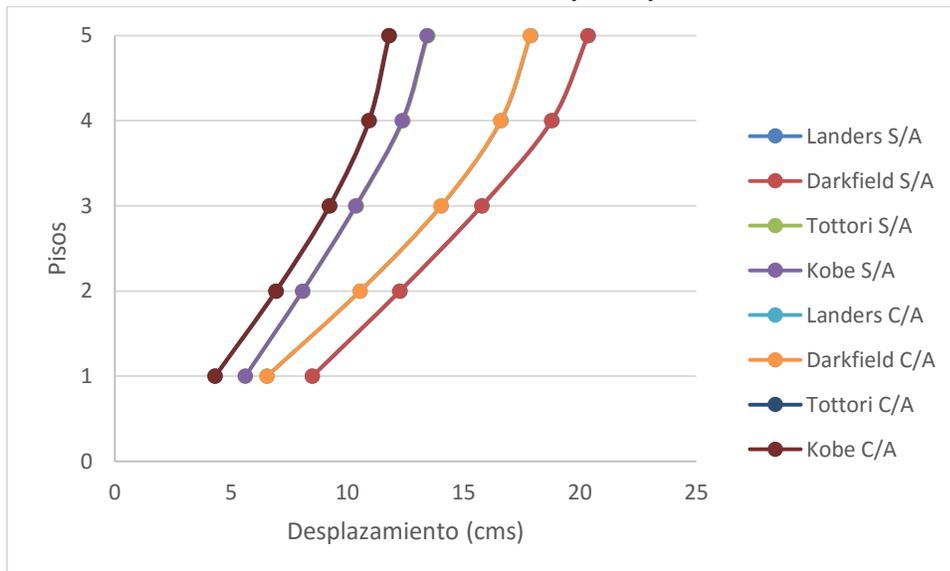


Gráfico 6. Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2

Dirección Y.

Fuente: El Autor (2017)



Haciendo una revisión de los Gráficos 3, 4, 5 y 6 se puede apreciar que al añadir los disipadores los desplazamientos laterales se reducen gradualmente desde los niveles superiores hasta los inferiores, siendo la Planta Baja (nivel con piso blando) donde existe el mayor porcentaje de reducción de respuesta, solucionando así la irregularidad en la estructura.

4.3 Derivas de entrepiso

En esta parte los resultados son mostrados en Gráficos, reflejando los derivas de entrepiso en la dirección X y en la dirección Y de la estructura sin amortiguador, con amortiguadores en configuración 1 y en configuración 2; obtenidos por el programa SAP2000 para cada entrepiso de la edificación; se resumen los resultados seleccionando 2 sismos de fuente cercada y 2 sismos de fuente lejana de las Tablas 4 y 5.

Las derivas de entrepiso se aprecian en la Gráficos 7, 8, 9 y 10 en la estructura con piso blando sin amortiguadores y añadiendo los disipadores en la estructura, tanto para la dirección X como la dirección Y con la disposición de amortiguadores en la configuración 1 como en la 2 respectivamente. Es importante destacar que las líneas de los sismos de Landers y Darkfield (fuente cercana) y Tottori y Kobe (fuente lejana) presentan valores muy cercanos por ende no se distinguen muy bien en los gráficos; esta situación aplica tanto para la respuesta sin amortiguamiento como con amortiguamiento.

Se observa que al incluir los dispositivos las derivas experimentan una reducción importante. En la dirección X la reducción promedio para la configuración 1 es del 39,03%, mientras que la para la configuración 2 es del 39,3%. En la dirección Y la reducción promedio para la configuración 1 es del 17,73%, y para la configuración 2 es de 10,17%.

Gráfico 7. Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X

Fuente: El Autor (2018)

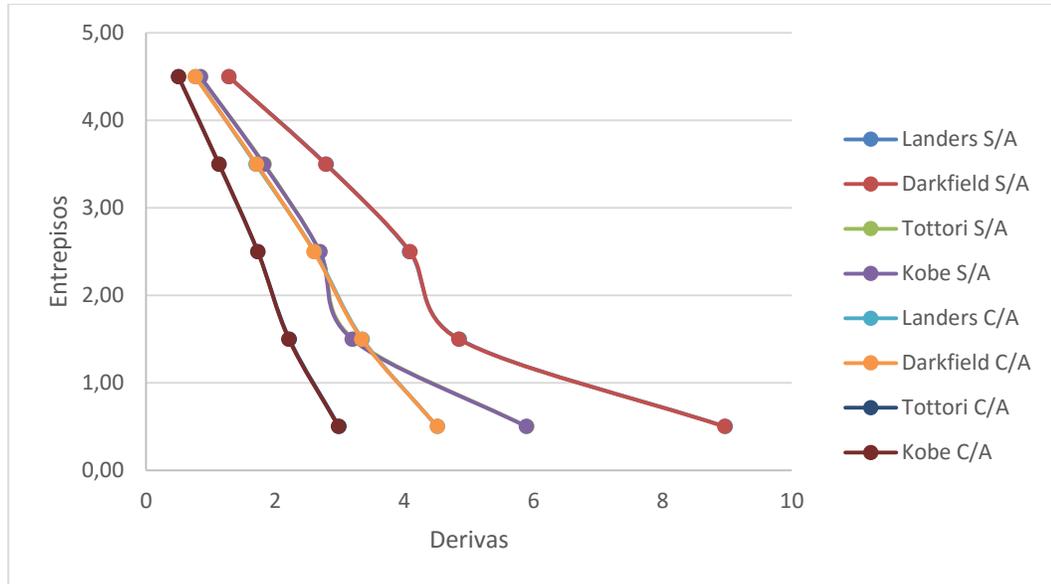


Gráfico 8. Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y

Fuente: El Autor (2018)

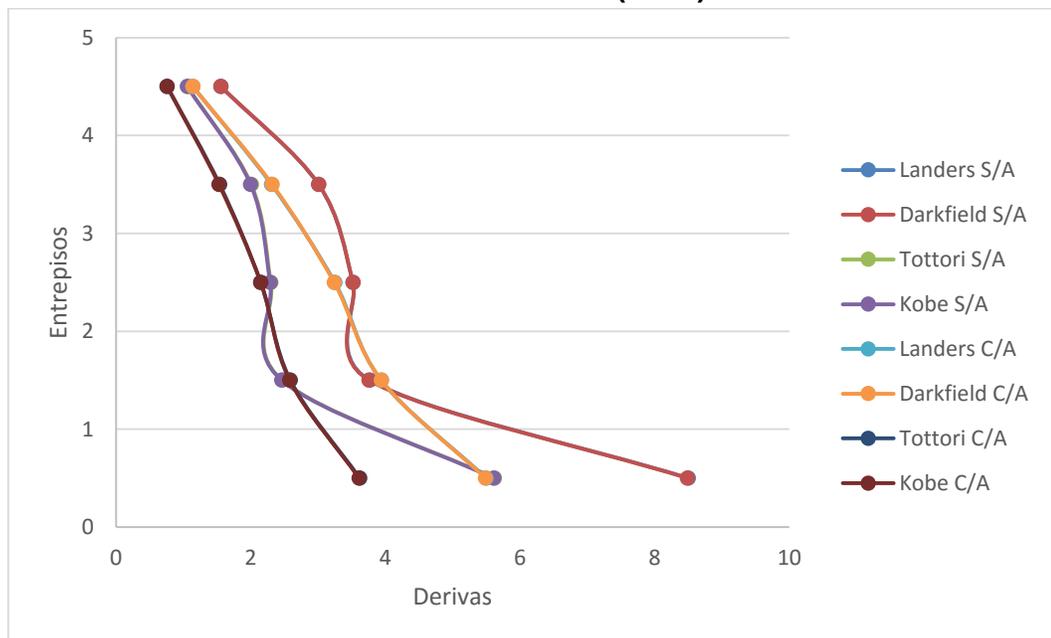


Gráfico 9. Valores obtenidos para las derivas de entrepisos de la estructura sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X.
Fuente: El Autor (2018)

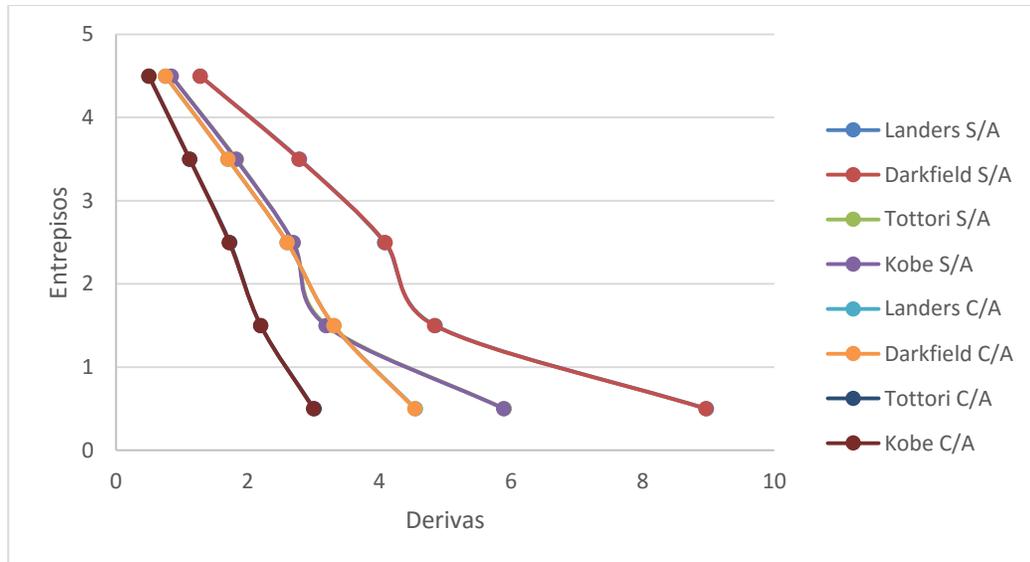
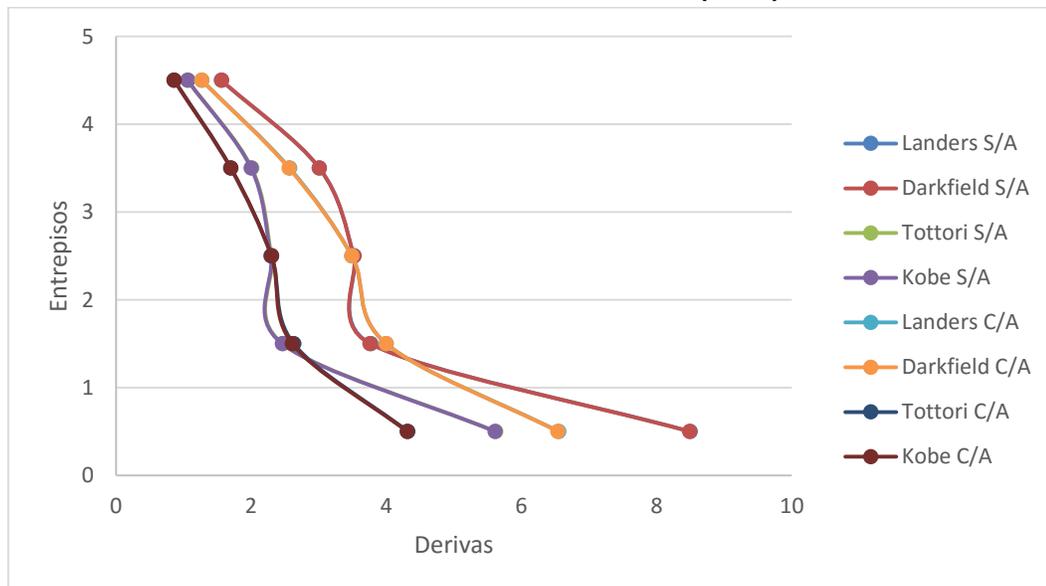


Gráfico 10. Valores obtenidos para las derivas de entropiso de la estructura sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y.
Fuente: El Autor (2018)



Es fundamental apreciar que en la Planta Baja (entrepiso 1-0) donde existe la irregularidad de piso blando en ambas configuraciones de las dos direcciones es donde se evidencia el mayor porcentaje de reducción de

repuesta, demostrando la efectividad del dispositivo y solventando el problema en el nivel en cuestión. Cabe mencionar que en el entrepiso del nivel 1 y 2, existe un aumento de la deriva al incorporar los disipadores, esto se debe a que los desplazamientos en el primer nivel son muy grandes con relación a los niveles siguientes, que las dimensiones en las que fueron utilizadas no disminuyen o reducen la deriva en ese nivel de entrepiso, sin embargo la configuración 2 de la dirección X escapa a esta realidad, de lo cual se deduce que esta configuración resulta más favorable para la estructura.

4.4 Fuerzas cortantes

En esta parte los resultados son mostrados en Tablas, reflejando las fuerzas cortantes en la dirección X y en la dirección Y de la estructura sin amortiguador, con amortiguadores en configuración 1 y en configuración 2; obtenidos por el programa SAP2000 para cada nivel de la edificación; se resumen los resultados seleccionando 2 sismos de fuente cercada y 2 sismos de fuente lejana de las Tablas 4 y 5.

Las fuerzas cortantes se aprecian en las Tablas 12, 13, 14 y 15 con su correspondiente porcentaje de reducción al incorporar los disipadores en la estructura, tanto para la dirección X como la dirección Y con la disposición de amortiguadores en la configuración 1 como en la 2 respectivamente. Se observa que al incorporar los disipadores en la estructura las fuerzas cortantes experimentan una reducción considerable. En la dirección X la reducción promedio para la configuración 1 es del 41,54%, mientras que la para la configuración 2 es del 41,86%. En la dirección Y la reducción promedio para la configuración 1 es del 22,42%, y para la configuración 2 es de 14,54%.

Tabla 12. Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1

Dirección X

Fuente: El Autor (2017)

Edificación con amortiguadores en Configuración 1 Dirección X					
Origen de la fuente	Sismo	Piso	S/A.	C/A.	% Reducción
Cercana	Landers	5	48,77	24,82	49,12
		4	96,78	54,68	43,50
		3	130,93	83,46	36,26
		2	155,68	106,76	31,43
		1	164,03	85,02	48,17
	Darkfield	5	48,73	24,33	50,07
		4	96,68	54,62	43,50
		3	130,80	83,36	36,26
		2	155,51	106,64	31,43
		1	163,86	84,93	48,17
Lejana	Tottori	5	31,66	16,37	48,31
		4	63,74	36,23	43,17
		3	86,34	55,35	35,89
		2	103,02	70,76	31,31
		1	107,99	56,33	47,84
	Kobe	5	31,56	16,32	48,28
		4	63,55	36,14	43,13
		3	86,09	55,23	35,85
		2	102,73	70,60	31,28
		1	107,68	56,20	47,81

Tabla 13. Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1

Dirección Y

Fuente: El Autor (2017)

Edificación con amortiguadores en Configuración 1 Dirección Y					
Origen de la fuente	Sismo	Piso	S/A.	C/A.	% Reducción
Cercana	Landers	5	49,92	36,39	27,10
		4	97,34	74,05	23,93
		3	125,59	103,71	17,42
		2	136,67	125,79	7,96
		1	150,86	100,99	33,06
	Darkfield	5	49,85	36,35	27,08
		4	97,22	73,97	23,92
		3	125,45	103,60	17,42
		2	136,54	125,66	7,97
		1	155,37	100,89	35,07
Lejana	Tottori	5	33,96	24,28	28,50
		4	65,01	49,17	24,37
		3	82,85	68,53	17,28
		2	90,50	82,84	8,47
		1	102,80	66,52	35,29
	Kobe	5	33,96	24,24	28,63
		4	64,92	49,06	24,43
		3	82,64	68,35	17,29
		2	90,26	82,58	8,50
		1	101,54	66,31	34,69

Tabla 14. Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X
Fuente: El Autor (2017)

Edificación con amortiguadores en Configuración 2 Dirección X					
Origen de la fuente	Sismo	Piso	S/A.	C/A.	% Reducción
Cercana	Landers	5	48,77	24,55	49,67
		4	96,78	54,35	43,84
		3	130,93	83,16	36,48
		2	155,68	105,99	31,92
		1	164,03	84,67	48,38
	Darkfield	5	48,73	24,52	49,68
		4	96,68	54,29	43,84
		3	130,80	83,07	36,49
		2	155,51	105,88	31,92
		1	163,86	84,58	48,38
Lejana	Tottori	5	31,66	16,18	48,89
		4	63,74	36,01	43,52
		3	86,34	55,16	36,12
		2	103,02	70,25	31,80
		1	107,99	56,10	48,05
	Kobe	5	31,56	16,14	48,85
		4	63,55	35,92	43,47
		3	86,09	55,04	36,07
		2	102,73	70,10	31,77
		1	107,68	55,97	48,02

Tabla 15. Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2

Dirección Y.

Fuente: El Autor (2017)

Edificación con amortiguadores en Configuración 2 Dirección Y					
Origen de la fuente	Sismo	Piso	S/A.	C/A.	% Reducción
Cercana	Landers	5	49,92	40,61	18,64
		4	97,34	81,78	15,99
		3	125,59	111,92	10,89
		2	136,67	131,25	3,96
		1	150,86	119,72	20,64
	Darkfield	5	49,85	40,56	18,63
		4	97,22	81,72	15,95
		3	125,45	111,83	10,86
		2	136,54	131,29	3,85
		1	155,37	119,59	23,03
Lejana	Tottori	5	33,96	27,24	19,79
		4	65,01	54,40	16,32
		3	82,85	73,95	10,74
		2	90,50	86,53	4,39
		1	102,80	78,96	23,19
	Kobe	5	33,96	27,20	19,89
		4	64,92	54,30	16,36
		3	82,64	73,76	10,75
		2	90,26	86,26	4,43
		1	101,54	78,74	22,46

Haciendo una revisión de las Tablas 12, 13, 14 y 15 se puede apreciar que al añadir los disipadores las fuerzas cortantes se reducen gradualmente desde los niveles superiores hasta los inferiores, siendo la Planta Baja (nivel con piso blando) donde existe el mayor porcentaje de reducción de respuesta, solucionando así en la estructura la irregularidad presente.

4.5 Análisis de los resultados

Estos resultados permiten deducir que la incorporación de los disipadores en la estructura analizada conlleva a un beneficio significativo en la misma al reducir su respuesta sísmica, conviene considerar esta propuesta como una opción para readecuaciones futuras según este tipo de sistemas.

Para lograr las reducciones obtenidas el tamaño de las láminas de los disipadores se hace uso de la ecuación 4 descrita en el punto 7 de la sección 3.5.3 del capítulo III, para lo cual se mantuvo sus valores originales en algunos parámetros involucrados, tales como: la base (b), la longitud de las láminas (l), el número de láminas (N) empleado, el ancho y alto de la pieza externa o caja, quedando como variable a modificar el espesor (h) de las mismas. De esta manera se llega a los resultados mostrados en la Tabla 16, donde se puede interpretar que para un valor de rigidez elástica (K_d) igual a 13.398.000 kgf/m, una Constante de amortiguamiento equivalente (C_e) igual a 384.313 Kgf.sg/m que son requeridos para todos los niveles del pórtico, se propone un número de láminas (N) igual a 5 y un espesor (h) de 12,7mm (1/2”), originalmente se tienen 5 láminas de 3.1mm (1/8”) de espesor, esto significa que podría ensancharse las aberturas de la caja dos tercios más hasta albergar el espesor antes indicado (1/2”) para las láminas.

Tabla 16. Dimensiones para las láminas de los disipadores tipo Caja Metálica.

Fuente: El Autor (2018)

Kd (Kgf/m)	Ce (Kgf.sg/m)	N	b (mm)	h (mm)	l (mm)
13.398.000	348.313	5	50	12,7	126

Para culminar también surge la pregunta: ¿Los disipadores de energía tipo Caja Metálica brindan la seguridad estructural deseada y confiable a las estructuras con piso blando? Para responderla, en primera instancia se evidencia en la Tabla 6 que al incorporar los disipadores o amortiguadores la rigidez lateral del nivel donde se presenta el piso blando en la estructura se incrementa con la adición del conjunto diagonales y disipador, por lo cual aparentemente desaparece la irregularidad. Para reforzar esta deducción, se llevó a cabo el mismo proceso iterativo realizado en la estructura con piso blando, sólo que esta vez se modeló la misma estructura sin contener ningún tipo de irregularidad, incorporando los mismos disipadores con iguales características estudiadas y en las configuraciones descritas.

Los desplazamientos de los pisos de la estructura regular se aprecian en las Gráficas 11, 12, 13 y 14 sin y con los disipadores, tanto para la dirección X como la dirección Y con la disposición de amortiguadores en la configuración 1 como en la 2 (ver Imágenes 28, 29, 30 y 31) respectivamente

Se observa que al añadir los amortiguadores en la edificación los desplazamientos laterales experimentan una reducción significativa. En dirección X la reducción promedio para la configuración 1 es del 34,35%, mientras que la para la configuración 2 es del 34,21%. En la dirección Y la reducción promedio para la configuración 1 es del 13,62%, y para la configuración 2 es de 6,98%.

Gráfica 11. Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura regular sin piso blando sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X

Fuente: El Autor (2018)

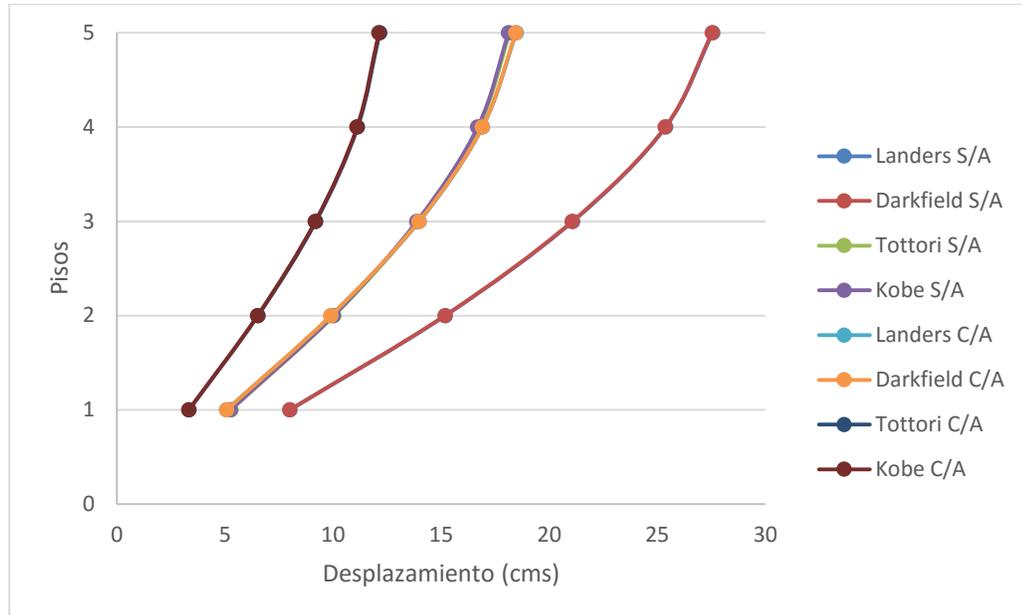


Gráfico 12. Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y

Fuente: El Autor (2018)

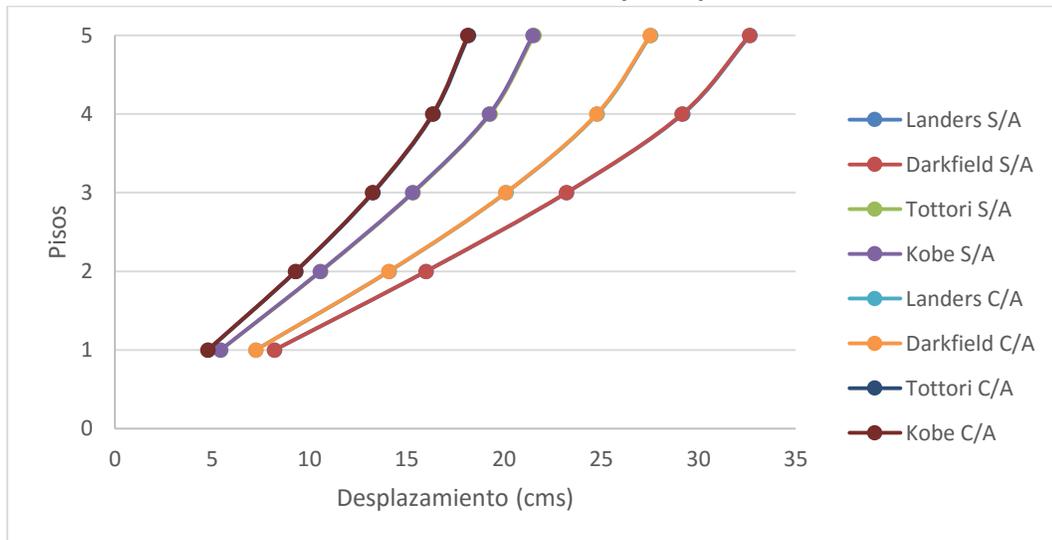


Gráfico 13. Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X
Fuente: El Autor (2018)

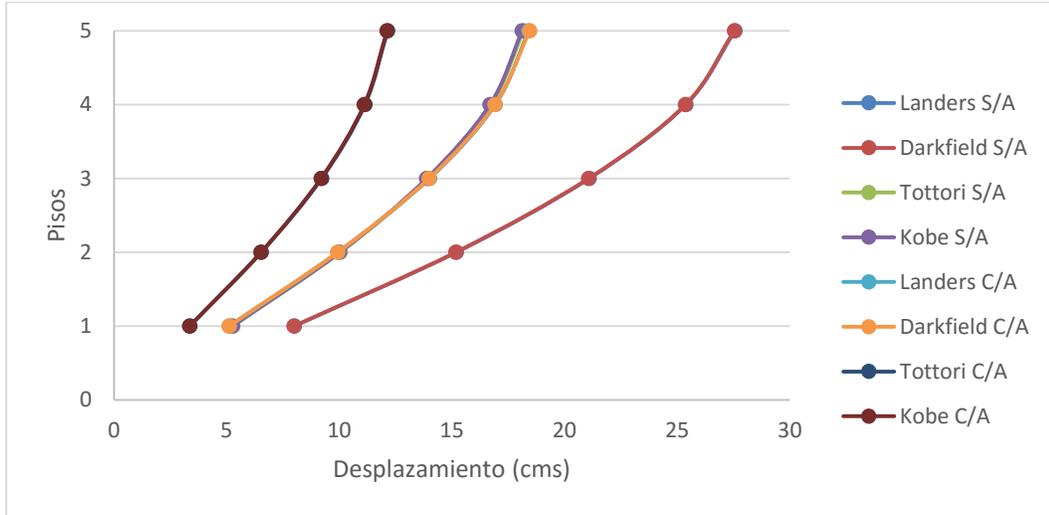
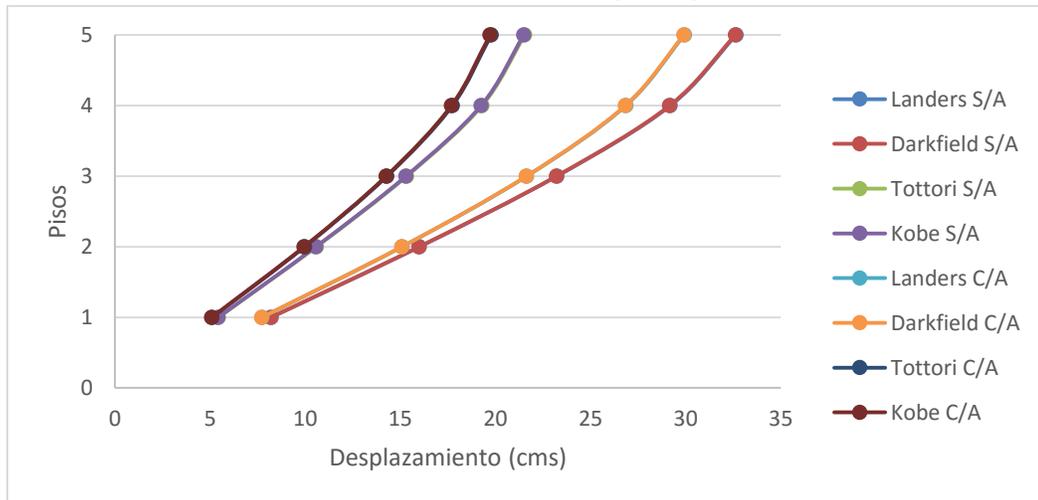


Gráfico 14. Valores obtenidos para los desplazamientos de pisos (cm) de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y.
Fuente: El Autor (2018)



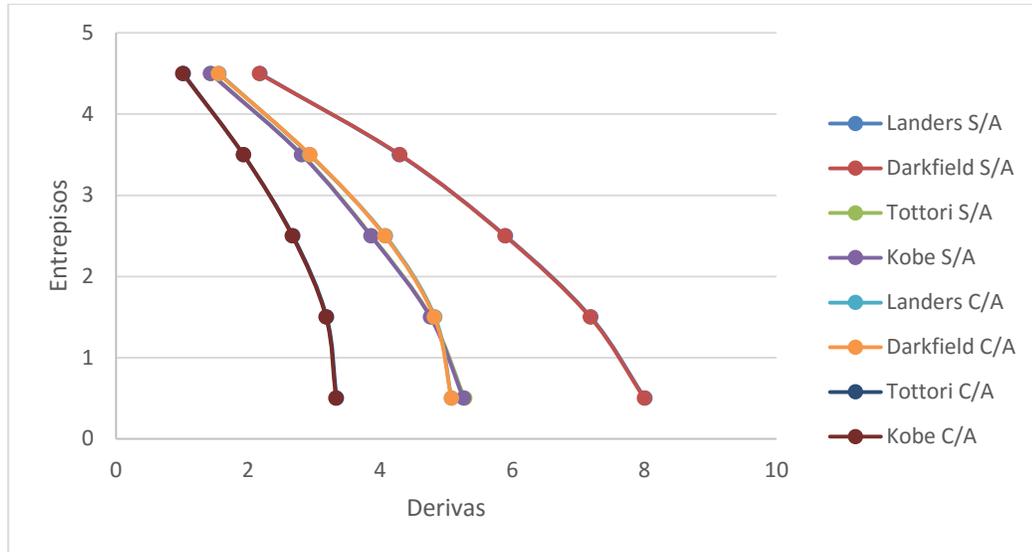
De las Gráficas 11, 12, 13 y 14 correspondientes a los valores de respuestas de la edificación regular obtenidos con y sin los amortiguadores, se aprecia que los desplazamientos laterales se reducen sin embargo la reducción es gradual desde los niveles inferiores hasta los superiores en el eje Y, mientras que en el eje X va desde los niveles superiores hasta los inferiores, en ambos ejes los porcentajes no difieren mucho en cada nivel, contrario a lo observado en la estructura con piso blando.

Las derivas de entrepiso se aprecian en las Gráficas 15, 16, 17 y 18 de la estructura regular sin disipadores y añadiendo los disipadores en la estructura, tanto para la dirección X como la dirección Y con la disposición de amortiguadores en la configuración 1 como en la 2 respectivamente.

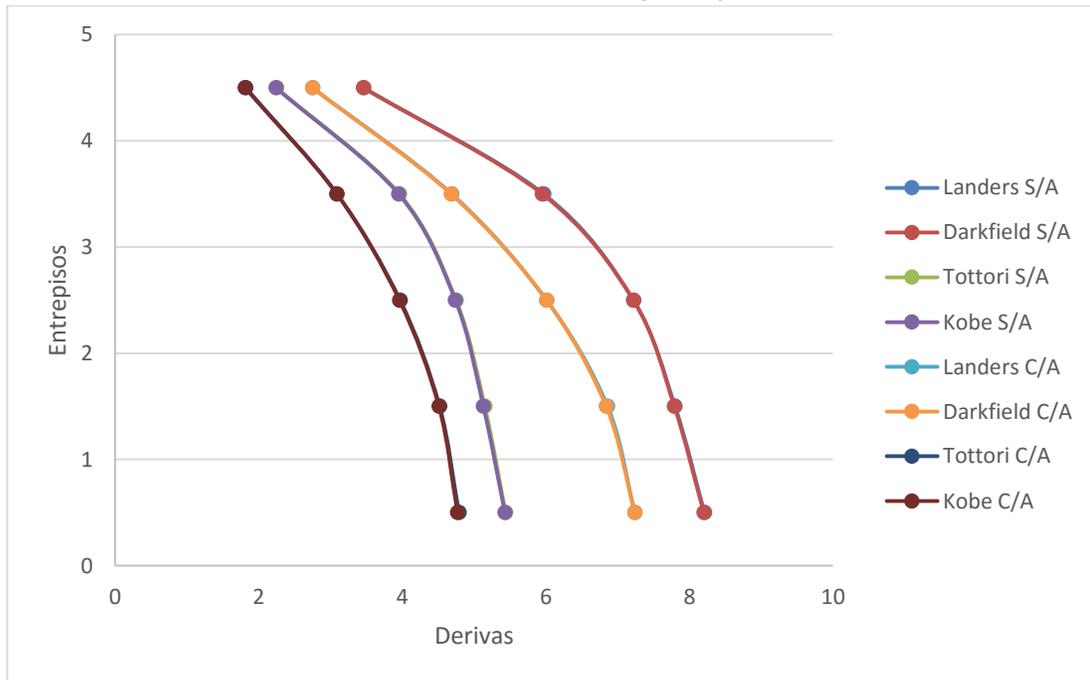
Se observa que al incluir los dispositivos las derivas experimentan una reducción importante. En la dirección X la reducción promedio para la configuración 1 es del 32,18%, mientras que la para la configuración 2 es del 32,46%. En la dirección Y la reducción promedio para la configuración 1 es del 16,42%, y para la configuración 2 es de 8,74%.

Es importante destacar que las líneas de los sismos de Landers y Darkfield (fuente cercana) y Tottori y Kobe (fuente lejana) presentan valores muy cercanos por ende no se distinguen muy bien en los gráficos; esta situación aplica tanto para la respuesta sin amortiguamiento como con amortiguamiento.

Gráfica 15. Valores obtenidos para las derivas de entepiso de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X
Fuente: El Autor (2018)



Gráfica 16. Valores obtenidos para las derivas de entepiso de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y
Fuente: El Autor (2018)



Gráfica 17. Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X
Fuente: El Autor (2018)

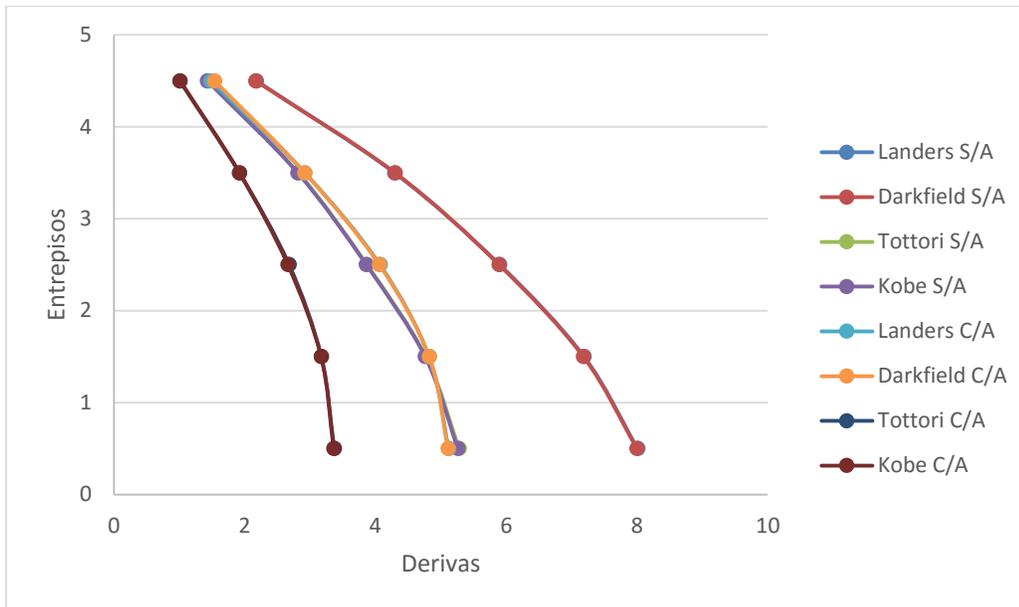
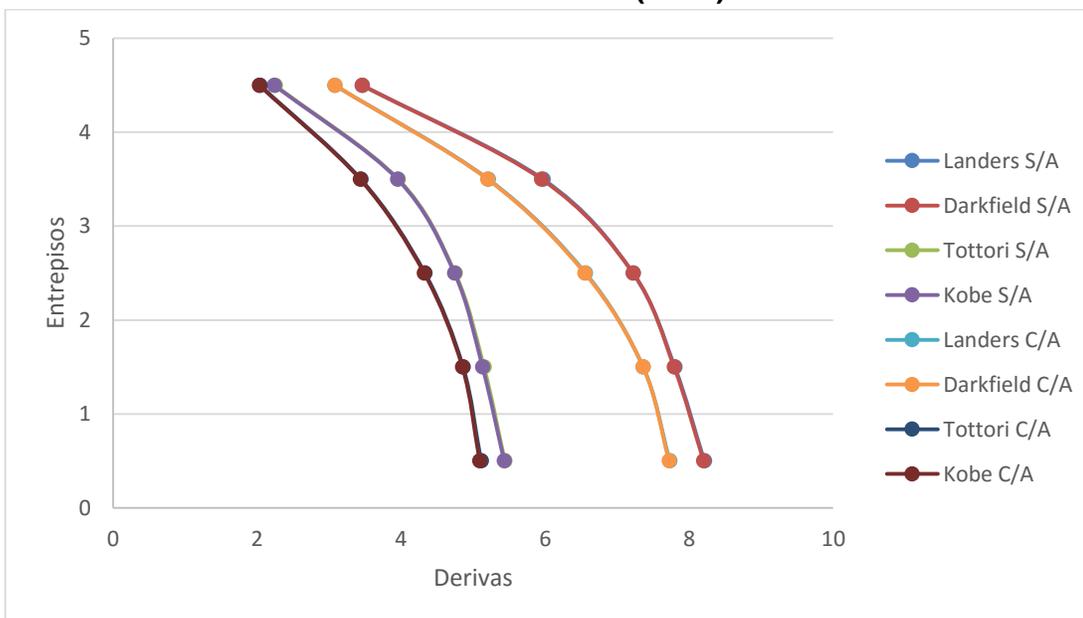


Gráfico 18. Valores obtenidos para las derivas de entrepiso de la estructura regular sin y con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y.
Fuente: El Autor (2018)



De las Gráficas 15, 16, 17 y 18 correspondientes a los valores de respuestas de la edificación regular obtenidos con y sin los amortiguadores, se aprecia que las derivas de entrepiso se reducen sin embargo la reducción es gradual desde los niveles inferiores hasta los superiores en la dirección Y, mientras que en la dirección X va desde los niveles superiores hasta los inferiores, en ambos ejes los porcentajes no difieren mucho en cada nivel.

Las fuerzas cortantes se aprecian en las Tablas 17, 18, 19 y 20 con su correspondiente porcentaje de reducción al incorporar los disipadores en la estructura, tanto para la dirección X como la dirección Y con la disposición de amortiguadores en la configuración 1 como en la 2 respectivamente.

Se observa que al incorporar los disipadores en la estructura las fuerzas cortantes experimentan una reducción considerable. En la dirección X la reducción promedio para la configuración 1 es del 36,85%, mientras que la para la configuración 2 es del 37,15%. En la dirección Y la reducción promedio para la configuración 1 es del 16,21%, y para la configuración 2 es de 9,47%.

Es importante destacar que las líneas de los sismos de Landers y Darkfield (fuente cercana) y Tottori y Kobe (fuente lejana) presentan valores muy cercanos por ende no se distinguen muy bien en los gráficos; esta situación aplica tanto para la respuesta sin amortiguamiento como con amortiguamiento.

**Tabla 17. Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección X.
Fuente: El Autor (2018)**

Edificación sin piso blando con amortiguadores en Configuración 1 Dirección X					
Origen de la fuente	Sismo	Piso	S/A.	C/A.	% Reducción
Cercana	Landers	5	110,63	61,84	44,10%
		4	151,47	94,41	37,67%
		3	194,30	129,45	33,38%
		2	230,24	154,04	33,10%
		1	255,82	166,96	34,74%
	Darkfield	5	110,49	61,77	44,09%
		4	151,31	94,32	37,66%
		3	194,09	129,32	33,37%
		2	230,00	153,88	33,10%
		1	255,55	166,79	34,73%
Lejana	Tottori	5	74,67	40,77	45,40%
		4	100,20	62,00	38,12%
		3	128,31	85,25	33,56%
		2	152,80	101,38	33,65%
		1	168,47	109,89	34,77%
	Kobe	5	74,53	40,66	45,44%
		4	99,90	61,79	38,15%
		3	127,93	85,00	33,56%
		2	152,39	101,08	33,67%
		1	168,00	109,57	34,78%

Tabla 18. Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 1 Dirección Y.
Fuente: El Autor (2018)

Edificación sin piso blando con amortiguadores en Configuración 1 Dirección Y					
Origen de la fuente	Sismo	Piso	S/A.	C/A.	% Reducción
Cercana	Landers	5	127,89	104,55	18,25%
		4	195,23	159,79	18,15%
		3	238,11	192,72	19,06%
		2	252,31	218,84	13,27%
		1	261,97	232,27	11,34%
	Darkfield	5	127,75	104,44	18,25%
		4	195,00	159,63	18,14%
		3	237,84	192,51	19,06%
		2	252,04	218,60	13,27%
		1	261,69	232,02	11,34%
Lejana	Tottori	5	84,55	68,80	18,63%
		4	129,64	105,15	18,89%
		3	158,10	127,28	19,49%
		2	166,81	144,51	13,37%
		1	173,63	153,47	11,61%
	Kobe	5	84,30	68,59	18,64%
		4	129,33	104,84	18,94%
		3	157,71	126,92	19,52%
		2	166,36	144,11	13,37%
		1	173,23	153,05	11,65%

Tabla 19. Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección X. Fuente: El Autor (2018)

Edificación sin piso blando con amortiguadores en Configuración 2 Dirección X					
Origen de la fuente	Sismo	Piso	S/A.	C/A.	% Reducción
Cercana	Landers	5	110,63	61,00	44,86%
		4	151,47	93,84	38,05%
		3	194,30	128,95	33,63%
		2	230,24	153,61	33,28%
		1	255,82	167,20	34,64%
	Darkfield	5	110,49	60,94	44,85%
		4	151,31	93,74	38,05%
		3	194,09	128,81	33,63%
		2	230,00	153,45	33,28%
		1	255,55	167,03	34,64%
Lejana	Tottori	5	74,67	40,22	46,14%
		4	100,20	61,62	38,50%
		3	128,31	84,91	33,82%
		2	152,80	101,10	33,84%
		1	168,47	110,05	34,68%
	Kobe	5	74,53	40,11	46,18%
		4	99,90	61,41	38,53%
		3	127,93	84,66	33,82%
		2	152,39	100,80	33,85%
		1	168,00	109,72	34,69%

Tabla 20. Valores obtenidos para las fuerzas cortantes de pisos (Tnf) de la estructura con los amortiguadores dispuestos en configuración 2 Dirección Y. Fuente: El Autor (2018)

Edificación sin piso blando con amortiguadores en Configuración 2 Dirección Y					
Origen de la fuente	Sismo	Piso	S/A.	C/A.	% Reducción
Cercana	Landers	5	127,89	115,09	10,01%
		4	195,23	172,19	11,80%
		3	238,11	210,04	11,79%
		2	252,31	235,06	6,84%
		1	261,97	246,81	5,79%
	Darkfield	5	127,75	114,94	10,03%
		4	195,00	172,00	11,79%
		3	237,84	209,82	11,78%
		2	252,04	234,81	6,84%
		1	261,69	246,55	5,79%
Lejana	Tottori	5	84,55	75,69	10,48%
		4	129,64	113,34	12,57%
		3	158,10	138,70	12,27%
		2	166,81	155,27	6,92%
		1	173,63	162,98	6,13%
	Kobe	5	84,30	75,47	10,47%
		4	129,33	113,00	12,63%
		3	157,71	138,31	12,30%
		2	166,36	154,83	6,93%
		1	173,23	162,53	6,18%

Las Tablas 17, 18, 19 y 20 correspondientes a los valores de respuestas de fuerzas cortantes de cada nivel de la edificación regular obtenidos con y sin los amortiguadores, se aprecia que las fuerzas cortantes se reducen siendo la reducción de manera gradual desde los niveles superiores hasta los inferiores tanto en la dirección X como en la dirección Y.

En la Tabla 21 se pueden visualizar los porcentajes promedios de reducción de respuesta de la estructura con piso blando y regular para los desplazamientos, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes.

Tabla 21. Porcentajes promedios de reducción de respuesta de la edificación con piso blando y regular.
Fuente: El Autor (2018)

	Estructura con piso blando				Estructura regular			
	Dirección X		Dirección Y		Dirección X		Dirección Y	
	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 1	Conf. 2
Desplazamientos	43,16	43,11	23,83	14,41	34,35	34,21	13,62	6,98
Derivas de entrepiso	39,03	39,30	17,73	10,17	32,18	32,46	16,42	8,74
Fuerzas cortantes	41,54	41,86	22,42	14,54	36,85	37,15	16,21	9,47

Indiscutiblemente la tabla 21 responde contundentemente la pregunta: ¿Los disipadores de energía tipo Caja Metálica brindan la seguridad estructural deseada y confiable a las estructuras con piso blando?, se puede evidenciar que en la estructura con piso blando los disipadores suministran un mayor porcentaje de reducción de respuesta tanto en los desplazamientos laterales, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes que en la estructura regular (sin piso blando), demostrando sobretodo mayores porcentajes de reducción de respuesta en la planta baja de la misma que es donde se presenta la irregularidad de piso blando; esto se debe al ángulo de inclinación en que van dispuestos los disipadores, al presentar mayor ángulo mayores son las propiedades del amortiguador (Rigidez del amortiguador efectivo K_{eff} y Constante de amortiguamiento efectivo $C_{d\ eff}$), en la planta

baja se presenta más ángulo de inclinación con relación a los pisos superiores debido a que en ese nivel la altura de entrepiso es mayor. Lo antes descrito se resume en la Tabla 22 donde refleja las propiedades dinámicas efectivas del amortiguador (amortiguador inclinado en la estructura) y las propiedades dinámicas originales del amortiguador (amortiguador sin inclinar): Rigidez del amortiguador (K_d) y su constante de amortiguamiento equivalente (C_e)

Tabla 22. Propiedades dinámicas efectivas del amortiguador
Fuente: El Autor (2018)

Dirección	Configuración	K_d (Kgf/m)	C_e (Kgf.sg/m)	Ángulo de inclinación del amortiguador	Amortiguador (Nivel)	K_{eff} (Kgf/m)	$C_{d\,eff}$ (Kgf.sg/m)
X	1	13.398.000	348.313	23,63°	P.B.	15.962.612,63	414.985,99
	2	13.398.000	348.313	19,93°	1, 2, 3, 4	15.159.428,74	394.105,32
	1	13.398.000	348.313	26,57°	P.B.	16.748.946,75	435.428,61
	2	13.398.000	348.313	22,5°	1, 2, 3, 4	15.696.733,38	408.073,83
Y	1	13.398.000	348.313	26,57°	P.B.	16.748.946,75	435.428,61
	2	13.398.000	348.313	22,5°	1, 2, 3, 4	15.696.733,38	408.073,83
	1	13.398.000	348.313	26,57°	P.B.	16.748.946,75	435.428,61
	2	13.398.000	348.313	22,5°	1, 2, 3, 4	15.696.733,38	408.073,83

En todos los casos se evidencia que para la dirección X resultó un mayor porcentaje de reducción de respuesta, siendo la configuración 2 la más favorable debido a la ubicación céntrica de los dispositivos en los pórticos centrales, ya que dichos pórticos son los más desfavorables porque reciben más solicitaciones por consiguiente mayores sus respuestas y los disipadores presenta más capacidad de absorber toda esa energía disipándola. Y en el caso de la dirección Y la combinación más favorable es la configuración 1 debido a que esta configuración presenta mayor número de disipadores que la configuración 2, lo cual dota a la estructura de mayor poder disipador.

La colocación de disipadores tipo Caja metálica en una edificación altera el comportamiento de esta frente a un sismo. Según los resultados del análisis no lineal de tiempo-historia, los disipadores modifican la deformación, traduciéndose en una deriva de piso significativamente menor respecto a la edificación sin los dispositivos. Estos resultados se determinaron mediante un análisis tiempo-historia, lo cual este procedimiento puede considerarse más preciso respecto al método lineal, cumpliéndose así el logro del objetivo de la investigación que es evaluar el comportamiento de una estructura con los disipadores de energía tipo Caja Metálica, lo cual fue evaluada la estructura con suficientes registros sísmicos estableciendo los valores pertinentes necesarios más críticos para el diseño.

La metodología empleada permitió observar claramente la diferencia de comportamiento entre el caso con disipadores y el caso sin éstos tanto en la estructura irregular como regular. Es posible observar la gran amplitud de la deformación que la edificación sufre en el caso convencional sin disipadores; por el contrario al adicionar los disipadores no solo disminuye, como se cita anteriormente, sino que se aminora con el tiempo, lo cual es un indicador que el disipador fluyó y está trabajando.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Introducción

En este trabajo se analizó una estructura aporticada de concreto reforzado con piso blando en la planta baja, a la cual se le añadieron disipadores de energía tipo Caja Metálica en 2 configuraciones, siendo evaluada la estructura sin y con disipadores en ambas disposiciones bajo una familia de registros sísmicos de fuente cercana y fuente lejana generados con la base de datos digital Pacific Earthquake Engineering Research Ground Motion utilizando el Método de Integración en el Tiempo (Analysis Time History), para obtener las respuestas de la edificación en base a desplazamiento laterales y fuerzas cortantes de cada nivel y sus derivas de entrepiso.

A continuación se presenta con mayor detalle las conclusiones recabadas de la investigación realizada.

5.2 Conclusiones

- Se modeló numéricamente una estructura hipotética aporticada de concreto reforzado considerando en la planta baja la irregularidad de piso blando definido en la norma COVENIN-MINDUR 1756:2001-1. *Edificaciones sismorresistentes. Articulado* (1ra Revisión); y los disipadores de energía se dispusieron en dicha estructura bajo 2 configuraciones (ver Figuras 28, 29, 30 y 31). Siendo la configuración 1: disponer de amortiguadores en los vanos laterales de la estructura en ambas direcciones; y la configuración 2: ubicarlos en los vanos centrales en ambas direcciones.

- La respuesta de la estructura sin disipadores de energía mediante el método de análisis en el tiempo (Analysis Time History) para los 10 registros sísmicos: 5 de fuente cercana (ver Tabla 4) y 5 de fuente lejana (ver Tabla 5) generados con la base de datos digital Pacific Earthquake Engineering Research Ground Motion fue la siguiente:
 - Los desplazamientos laterales en el nivel 5 resultaron ser más perjudiciales por ser de mayor magnitud, y en orden descendente de los niveles los desplazamientos disminuyen respectivamente. Este comportamiento se mantuvo constante para los sismos de fuente cercana como lejana, tanto ambas direcciones.
 - Las derivas de entrepiso en la planta baja fueron la de mayor dimensión, y en los niveles superiores en orden ascendente las derivas fueron disminuyendo. Este comportamiento se evidenció tanto en los sismos de fuente cercana como lejana en ambas direcciones.
 - Las fuerzas cortantes fueron más grandes en la planta baja, y conforme se asciende de niveles van disminuyendo las fuerzas cortantes. Esto ocurrió tanto en los sismos de fuente lejana como cercana.

- La respuesta de la estructura con disipadores de energía en sus 2 configuraciones mediante el método de análisis en el tiempo (Analysis Time History) para los 10 registros sísmicos: 5 de fuente cercana (ver Tabla 4) y 5 de fuente lejana (ver Tabla 5) generados con la base de datos digital Pacific Earthquake Engineering Research Ground Motion fue la siguiente:
 - Los desplazamientos laterales en el nivel 5 resultaron ser más perjudiciales por ser de mayor magnitud, y en orden descendente de los niveles los desplazamientos disminuyen

respectivamente. Este comportamiento se mantuvo constante para los sismos de fuente cercana como lejana, tanto ambas direcciones y en las 2 configuraciones.

- Las derivas de entrepiso en la planta baja fueron la de mayor dimensión, y en los niveles superiores en orden ascendente las derivas fueron disminuyendo. Este comportamiento se evidenció tanto en los sismos de fuente cercana como lejana en ambas direcciones y configuraciones
 - Las fuerzas cortantes fueron más grandes en el primer piso, le sigue el segundo piso, luego la planta baja y finalmente el cuarto y quinto piso respectivamente. Esto ocurrió tanto en los sismos de fuente lejana como cercana, en ambas direcciones y configuraciones.
-
- Al evaluar la respuesta de la edificación con y sin disipadores de energía en términos de sus desplazamientos laterales máximos, sus derivas y sus fuerzas cortantes se obtuvo que:
 - Los desplazamientos laterales fueron reducidos prácticamente en la misma proporción al incorporar los disipadores de energía tipo Caja Metálica tanto para los sismos de fuente cercana como lejana, evidenciándose el mayor porcentaje de reducción en la planta baja de la estructura. En la dirección X se obtuvo mayor reducción que en la dirección Y.
 - Las derivas de entrepiso se reducen en la misma proporción al añadir los disipadores de energía tipo caja metálica, presentando el mismo comportamiento tanto en los sismos de fuente cercana como lejana. Se aprecia que el mayor porcentaje de reducción está presente en la planta baja. En la dirección X se alcanzó mayor reducción que en la dirección Y.

- Las fuerzas cortantes se reducen en la misma razón cuando se agregan los disipadores, sólo que las mayores reducciones se presentan en el último piso y la planta baja tanto en las direcciones X y Y para los sismos de fuente cercana como lejana.

- Los desplazamientos laterales en el nivel 5 resultó ser el más perjudicial por presentar mayores valores de desplazamiento, y en orden descendiente de los niveles los desplazamientos van decreciendo, este comportamiento se mantuvo constante tanto para los sismos de fuente cercana como de fuente lejana, tanto en la estructura con piso blando como en la regular, sin disipadores y con disipadores en sus 2 configuraciones en ambas direcciones.

- Los derivas de entrepiso en la planta baja resultó ser el más perjudicial por presentar mayores valores de deriva, y en orden ascendente de los entrepiso las derivas van decreciendo, este comportamiento se mantuvo constante tanto para los sismos de fuente cercana como de fuente lejana, tanto en la estructura con piso blando como en la regular, sin disipadores y con disipadores en sus 2 configuraciones en ambas direcciones.

- Las fuerzas cortantes en la planta baja resultaron ser las más perjudiciales por presentar mayores valores, y en orden ascendente de los niveles las fuerzas cortantes van decreciendo, este comportamiento se mantuvo constante tanto para los sismos de fuente cercana como de fuente lejana, tanto en la estructura con piso blando como en la regular, sin disipadores y con disipadores en sus 2 configuraciones en ambas direcciones.

- Todos estos resultados fueron obtenidos por medio del método de integración en el tiempo (Analysis Time History) utilizando el programa especializado SAP 2000, donde se realizó el modelo numérico y los análisis de la estructura sometida a la familia de 10 sismos seleccionados. Los análisis abarcaron tiempos lineales y no lineales (tipo de solución seleccionado fue el método de integración directa Hilber-Hughes-Taylor), en el caso de los no lineales, la no linealidad abarcó sólo al disipador de energía que se modeló como “links” tipo “Multilinear plastic”. La estructura fue considerada en el rango lineal.
- Los sismos de fuente cercana fueron más perjudiciales para la estructura que los de fuente lejana, evidenciándose mayores valores de desplazamiento lateral, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes en la estructura sin disipadores y con disipadores en sus 2 configuraciones en ambas direcciones.
- La escogencia de los 10 sismos generados en la base de datos Pacific Earthquake Engineering Research Ground Motion fue de falla transcurrente con relación a su magnitud, seleccionándose los de mayor magnitud a partir de 6 grados en la escala de Richter tanto para los sismos de fuente cercana como lejana.
- Según los resultados obtenidos la reducción promedio de la respuesta sísmicas de la edificación irregular con piso blando incorporando los disipadores es de 33,5% para los desplazamientos laterales, 28,52% para las derivas de entrepiso y del 32,14% para las fuerzas cortantes siendo la configuración 2 en el eje X y la configuración 1 en el eje Y las que mejor responden en la edificación.

- Cuando se utilizan los amortiguadores en la estructura, el mayor valor de amortiguamiento se obtiene cuando el dispositivo se ubica en la planta baja. La utilización de un mayor número de amortiguadores, ubicando dispositivos por cada entrepiso y manteniendo constante la suma de las constantes “C” de amortiguamiento, incrementa notablemente el amortiguamiento en la estructura.
- La reducción de los desplazamientos laterales, derivas de entrepiso y fuerzas cortantes son indicadores de una disminución en el daño de los elementos posterior a un sismo, debido a que el disipador incurre en el rango plástico, logrando disipar energía, y permitiendo que los miembros estructurales se mantengan en el rango elástico.
- Los disipadores tipo Caja Metálica requieren el cambio de las láminas una vez que hayan soportado un evento sísmico de gran magnitud, porque son esas piezas las encargadas de disipar la energía y requieren estar operativas para un próximo evento telúrico.
- Es importante destacar que el piso blando se ubica entre los niveles 0 y 1 (planta baja) tanto en los ejes X y Y, cuyas rigideces laterales de ambos pisos difieren en más de 30% con relación a los pisos superiores; y al añadir los amortiguadores en la edificación prácticamente se elimina la irregularidad de piso blando.

5.3 Recomendaciones

- Evaluar la respuesta sísmica de una estructura con otra irregularidad incorporando los disipadores tipo Caja Metálica.
- Es importante generar en las instituciones educativas, hospitalarias, gubernamentales y/o edificaciones con valores históricos un plan de readecuación de dichas estructuras incorporando sistemas de control

sísmico debido al alto riesgo sísmico latente en el país y a la alta vulnerabilidad que presentan dichas edificaciones, aparte que sería una alternativa más económica la incorporación de estos disipadores en estructuras que no cumplen con la normativa sismorresistente actual en Venezuela.

- Es necesario crear una norma nacional o una adaptación de una norma extranjera para las condiciones de Venezuela que regule el tema de estructuras con disipadores de energía o aisladores sísmicos. Esto en vistas a que en el futuro estos sistemas de protección se conviertan en opciones viables normadas en nuestro país para el diseño de estructuras y para la reparación de estructuras existentes.
- Es imprescindible contar con una plataforma digital nacional de registros sísmicos parecida a la base de datos PEER Ground Motion, para poder generar una base de datos con los acelerogramas más reales de los eventos sísmicos más importante que sucedan en el futuro, y tenerlos a disposición para su aplicación en la ingeniería estructural en Venezuela.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Agudelo, J. (2014). *Aisladores y Disipadores Sísmicos*. Artículo disponible en: [<http://estructurando.net/2014/10/14/aisladores-y-disipadores-sismicos/>]. Consulta: Agosto 25, 2016. Hora: 9:00 pm.
- Arévalo, V. (2015). *Análisis del comportamiento de un edificio de marcos de acero con Disipadores de energía histeréticos*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Rafael Landívar. Guatemala.
- Bassotti, R. (2004). *Control de vibraciones torsionales en estructuras sismorresistentes*. Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Estructural. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina.
- Bozzo L. y Barbat A. (2000), “*Diseño sismorresistente de edificios. Técnicas convencionales y avanzadas*”, Editorial Reverté S.A, Barcelona-España.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de Estructuras 4ª Edición*. Editorial Pearson.
- COVENIN-MINDUR 1756:2001-1. *Edificaciones sismorresistentes. Articulado* (1ra Revisión). Caracas: Fondonorma.
- COVENIN-MINDUR 2002-88 “*Criterios y Acciones mínimas para el proyecto de edificaciones*”. Caracas: Fondonorma.
- CSi Computers & Structures INC (2011). *Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*. California, EEUU.
- Guanchez, E. (2017). *Influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento de sistemas de fundación de edificaciones regulares de concreto armado*. Trabajo especial de grado para optar al título de Especialista en Ingeniería Estructural. Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela.
- Long. G. (2010). *Recuperación y Reconstrucción Business Chile*.
- Pacific Earthquake Engineering Research Ground Motion (PEER). Base de datos de registros sísmicos. Disponible en: [http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database]. Consulta: Agosto 10, 2017. HORA: 8:25 pm.

- Sáez, I. (2015). *Evaluación del comportamiento de una edificación de acero con aisladores sísmicos tipo HDR comparado con el sistema tradicional de base fija*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.
- Sánchez, M. (2010). *Implementación del diseño directo basado en desplazamientos para pórticos con disipadores de energía*. Trabajo de Grado. Universidad Técnica Particular de Loja. Ecuador.
- Searer G. y Fierro E. (2004). *Criticism of Current Seismic Design and Construction Practice in Venezuela: A Bleak Perspective*. Earthquake Engineering Research Institute. Estados Unidos. Artículo disponible en PDF.
- Skinner R., Kelly J., and Heine A. (1975), "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* Vol. 3, 287-296.
- Tehranizadeh, M. (2000). *Passive energy dissipation device for typical steel frame building in Iran*. Trabajo de Investigación. Irán.
- Trujillo, J. y otros (2014). *Disipadores de Energía*. Trabajo de pregrado presentado a la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Perú. Documento en línea disponible en: [<http://es.slideshare.net/deibyrequenamarclo/disipadores-de-enrgia-en-pdf>]. Consulta: Agosto 22, 2016. Hora: 8:30 pm.
- Tovar, C. (2008). *Utilización de Disipadores de Energía en edificaciones de baja altura*. Tesis doctoral. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Universidad de Costa Rica. Blog del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (2011). *¿Qué es el daño estructural?*. Artículo en línea disponible en: [<http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=25>]. Consulta: Octubre 16, 2016. Hora: 4:25 pm.