

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

**"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN EDIFICIO DE MARCOS DE ACERO CON
DISIPADORES DE ENERGÍA HISTERÉTICOS"**

TESIS DE GRADO

VIRGILIO DE JESÚS ARÉVALO LACAYO
CARNET 10481-10

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, DICIEMBRE DE 2015
CAMPUS CENTRAL

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

**"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN EDIFICIO DE MARCOS DE ACERO CON
DISIPADORES DE ENERGÍA HISTERÉTICOS"**

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA

POR
VIRGILIO DE JESÚS ARÉVALO LACAYO

PREVIO A CONFERÍRSELE
EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, DICIEMBRE DE 2015
CAMPUS CENTRAL

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. EDUARDO VALDES BARRIA, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

DECANO: MGTR. JOSE CARLOS RICARDO VELA SCHIPPERS
VICEDECANO: MGTR. JORGE ANTONIO GUILLEN GALVAN
SECRETARIA: MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA
DIRECTORA DE CARRERA: MGTR. ELSA GUILLERMINA CABRERA ROMERO

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

ING. BYRON RENÉ PAIZ ARAGÓN

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

MGTR. JORGE RAFAEL RECINOS UMAÑA

MGTR. JOSE CARLOS GIL RODRIGUEZ

ING. OSMAN CARRILLO SOTO

Guatemala, Agosto 2015

Ingeniera Karen Morales
Secretaria de Facultad
Facultad de Ingeniería

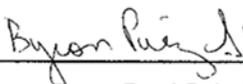
Estimada Ingeniera Morales

Por este medio me es grato saludarle y, desearle toda clase de éxitos en sus labores diarias.

El motivo de la presente es informarle que he revisado el informe final de tesis titulado: **"Análisis del comportamiento de un edificio de marcos de acero con disipadores de energía histeréticos"** del estudiante Virgilio de Jesús Arévalo Lacayo quien se identifica con el número de carné 1048110. Después de haber revisado el informe final y de acuerdo con los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar doy como aprobado dicho trabajo de tesis.

Sin otro particular, me suscribo de Ud.

Atentamente,

f. 
 

Byron René Paiz Aragón
Ingeniero Civil
Asesor de tesis



Universidad
Rafael Landívar
Tradición Jesuita en Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
No. 0230-2015

Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante VIRGILIO DE JESÚS ARÉVALO LACAYO, Carnet 10481-10 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 02200-2015 de fecha 18 de noviembre de 2015, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

**"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN EDIFICIO DE MARCOS DE ACERO CON
DISIPADORES DE ENERGÍA HISTERÉTICOS"**

Previo a conferírsele el título de INGENIERO CIVIL en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, al día 1 del mes de diciembre del año 2015.



MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA, SECRETARÍA
INGENIERÍA
Universidad Rafael Landívar

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su amor, su apoyo incondicional y su ayuda a través de estos años.

A la Universidad Rafael Landívar, por ser mi casa de estudios, por brindarme una educación integral, y darme las herramientas más importantes para mi desarrollo profesional y personal.

A la Fundación Jorge Toruño, por la confianza puesta en mí, y por darme el apoyo necesario para concluir mis estudios, y sobre todo por apoyar la educación como fuente de desarrollo para el país.

A mis catedráticos, compañeros y amigos, por formar parte de este camino, y llenarlo de experiencias y enseñanzas inolvidables.

A la familia Cabrera Jerez, en especial a Miguel Ángel y Sandra por su apoyo, ayuda, y su sincero cariño en estos años.

Al Ing. Byron Paiz, por su valiosa asesoría y ayuda para llevar a cabo este trabajo de investigación.

A todas aquellas personas, que han formado parte de este camino, las palabras no son suficientes para expresar mi más sincero y profundo agradecimiento.

ACTO QUE DEDICO A:

A Dios Todopoderoso, por darme el don de la vida, y bendecirme tanto, en especial con la oportunidad de culminar esta importante meta.

A nuestra Madre la Virgen María, por cubrirme con su manto y protegerme desde el cielo todos los días de mi vida.

A mis padres, Virgilio Efraín Arévalo Fernández (Q.E.P.D), por enseñarme el valor del trabajo, y por ser ejemplo de vida; y María Auxiliadora Lacayo Pineda de Arévalo por ser una guía y una mujer incansable, y por su constante lucha por sacar adelante a sus hijos. A ambos por su amor incondicional, y por guiarme en todo momento.

A mis hermanos, Pedro Efraín, María Auxiliadora y Joaquín Haroldo, por su apoyo, su consejo y cariño, y por ser un ejemplo en mi vida.

A mis abuelitos, Pablo Lacayo Parrales y María Pineda Manning (Q.E.P.D); y José Efraín Arévalo (Q.E.P.D) y María Teresa Fernández Hall de Arévalo (Q.E.P.D) por sus consejos y sus enseñanzas a lo largo de mi vida.

A mis padrinos, Fernando Guzmán y Ana María Arévalo de Guzmán, por ser siempre guías en el camino de la Fe, y por todo su apoyo.

A María Fernanda Cabrera Jeréz, por su incondicional apoyo, e inmenso cariño, y por ser siempre mi fuente de inspiración, y recorrer junto a mí este camino.

RESUMEN EJECUTIVO

En caso de un terremoto, todo edificio debe disipar la energía inducida por el movimiento del terreno, por medio de sus elementos estructurales. Para proteger de daños severos a los componentes de una edificación es posible implementar dispositivos con el objetivo específico de disipar la energía proveniente de un sismo, conocidos como sistemas de protección sísmica. El principal objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento de una estructura con disipadores de energía. En este trabajo fueron desarrollados de forma teórica varios temas relacionados con la disipación de energía en edificaciones, y todo lo tratado se resumió en un ejemplo de aplicación, implementando disipadores de energía por histéresis de metales.

Primero se realizó el análisis completo de una estructura convencional de marcos de acero con riostras concéntricas. Se describió el procedimiento de análisis, según lo descrito en la normativa guatemalteca AGIES NSE-10. Por medio de este análisis se dimensionó las piezas estructurales de la edificación, y se obtienen las derivas de piso, las cuales deben cumplir los mínimos establecidos por la normativa. Posteriormente se definieron las propiedades de los dispositivos disipadores y se agregaron a la edificación, para llevar a cabo el análisis de tiempo-historia en la estructura.

Los resultados obtenidos se compararon con los resultados iniciales de la estructura sin disipadores, para analizar la alteración en el comportamiento de la estructura con disipadores. Todo el modelado tridimensional de la edificación se realizó con el programa de computadora ETABS v9.7, de la compañía norteamericana Computers and Structures Inc.

ÍNDICE

1. PRESENTACIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos:.....	3
1.4. Alcances	4
2. CONCEPTOS GENERALES	5
2.1. Disipación de Energía en Edificaciones	5
2.2. Sistemas de Control de la Respuesta Dinámica.....	9
2.3. Sistemas Pasivos de Control de Vibraciones	12
2.4. Clasificación de los disipadores pasivos de energía	14
2.4.1. Aislamiento en la Base	14
2.4.2. Sistemas Inerciales Acoplados.....	15
2.4.3. Disipadores de Energía.....	17
3. DISPOSITIVOS TIPO ADAS	23
3.1. Descripción general	23
3.2. No Linealidad del dispositivo disipador	25
3.3. Mecanismo Estructural de Disipación	27
3.4. Modelaje matemático	29
3.4.1. Modelo Bilineal	30
3.4.2. Determinación de la Rigidez lateral de los dispositivos ADAS.....	32
3.4.3. Propiedades lineales del disipador	36
4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	38
4.1. Análisis de estructuras sin disipadores de energía.....	38
4.1.1. Grados de libertad de una edificación	39
4.1.2. Ductilidad	41

4.2.	Análisis Modal Espectral	42
4.2.1.	Espectro de respuesta sísmico.....	43
4.3.	Normativa Guatemalteca - AGIES.....	44
4.3.1.	Zonificación y características sísmicas.....	45
4.3.2.	Parámetros para modelar la respuesta sísmica.....	46
4.4.	Método de la carga sísmica equivalente	47
4.4.1.	Cortante basal al límite de cedencia.....	48
4.4.2.	Espectro genérico de diseño de AGIES NSE	50
4.5.	Calibración del análisis modal.....	51
4.6.	Derivas últimas máximas tolerables	51
4.6.1.	Valores máximos de deriva de piso.....	52
4.7.	Análisis de estructuras con disipadores de energía	52
4.8.	Método de la diagonal equivalente.....	53
4.9.	Análisis lineal dinámico para edificios con disipadores.....	54
4.9.1.	Incremento en el amortiguamiento	56
4.10.	Análisis Tiempo-Historia	57
4.10.1.	Análisis Tiempo-Historia en ETABS	59
4.10.2.	Acelerograma.....	60
5.	EJEMPLO DE APLICACIÓN	63
5.1.	Planteamiento del Problema	63
5.2.	Análisis Modal Espectral	66
5.2.1.	Construcción del espectro de diseño según AGIES NSE2-2010 ...	67
5.2.2.	Determinación del coeficiente sísmico.....	70
5.2.3.	Calibración del análisis modal espectral.....	71
5.2.4.	Deriva máxima	72
5.2.5.	Combinaciones de carga.....	73

5.3.	Modelo sin disipadores	74
5.4.	Análisis tiempo-historia	78
5.4.1.	Selección de Acelerogramas	78
5.5.	Modelo con disipadores	84
5.5.1.	Disipadores empleados	84
5.5.2.	Modelo bilineal aplicado	87
5.5.3.	Ubicación de los disipadores	88
6.	RESULTADOS.....	92
6.1.	Análisis lineal Modal Espectral	92
6.1.1.	Edificio sin disipadores	93
6.2.	Análisis no-lineal Tiempo Historia	93
6.2.1.	Edificio sin disipadores	93
6.2.2.	Edificio con disipadores.....	94
6.2.3.	Comparación de deformación.....	98
6.2.4.	Comparación de esfuerzos.....	103
6.2.5.	Absorción de energía	111
6.2.6.	Ciclos de histéresis de los disipadores	112
6.3.	Implicaciones de Costos	114
6.4.	Discusión de resultados	115
7.	CONCLUSIONES.....	117
8.	RECOMENDACIONES	119
9.	REFERENCIAS.....	121
10.	ANEXOS	125
10.1.	Glosario	125
10.2.	Construcción del espectro genérico de diseño según AGIES	129
10.3.	Modelaje en ETABS.....	134

10.3.1.	Análisis modal espectral.....	134
10.3.2.	Definición de disipadores ADAS para un análisis no-lineal.....	137
10.3.3.	Análisis tiempo-historia.....	139
10.3.4.	Resultados de análisis tiempo-historia	141
10.4.	Adecuación de los Acelerogramas mediante PRISM	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Balance de energía en una edificación	8
Figura 2-2 Efectos de los sistemas de disipación de energía en las curvas fuerza-deformación de una estructura.....	9
Figura 2-3 Comportamiento de un edificio con aislamiento de base	10
Figura 2-4 Sistemas de control de respuesta	11
Figura 2-5 Edificio con disipadores	13
Figura 2-6 Sistema de aislamiento	14
Figura 2-7 Aislador de neopreno zunchado.....	15
Figura 2-8 Sistema Inercial Acoplado.....	16
Figura 2-9 Sistema de Disipación	17
Figura 2-10 Disipador viscoelástico.....	19
Figura 2-11 Disipador TADAS.....	21
Figura 2-12 Disipador tipo Panal.....	22
Figura 3-1 Dispositivo histerético metálico tipo ADAS	24
Figura 3-2 Dispositivo ADAS usado para pruebas	25
Figura 3-3 Diagrama Esfuerzo-Deformación del Acero	26
Figura 3-4 Diagrama Esfuerzo-Deformación del Concreto	26
Figura 3-5 Curva de histéresis de disipadores ADAS.....	27
Figura 3-6 Dispositivo ADAS en arreglo tipo chevron.....	28
Figura 3-7 Detalle de disipador ADAS.....	29
Figura 3-8 Ciclo de histéresis de un dispositivo con comportamiento elastoplástico	30
Figura 3-9 Ciclo de histéresis de un dispositivo con comportamiento bilineal.....	31
Figura 3-10 Deformación de un dispositivo ADAS.....	32

Figura 3-11 Comparación entre geometría real de disipador ADAS y geometría idealizada por Whittaker.....	33
Figura 3-12 Rigidez Efectiva y Amortiguamiento Efectivo	36
Figura 3-13 Curva típica fuerza-deformación de un dispositivo con comportamiento bilineal.....	37
Figura 4-1 Modos de vibración de un sistema de tres grados de libertad.....	41
Figura 4-2 Oscilador simple sujeto a movimiento de apoyo	43
Figura 4-3 Zonificación sísmica para la República de Guatemala	45
Figura 4-4 Ejemplificación del método estático	47
Figura 4-5 Acelerograma	61
Figura 5-1 Vista en elevación del edificio	64
Figura 5-2 Vista en planta del edificio	65
Figura 5-3 Diagrama de Metodología empleada	66
Figura 5-4 Espectro de Respuesta para la Ciudad de Guatemala.....	68
Figura 5-5 Vista 3D del modelo a analizar.....	74
Figura 5-6 Deformación de la estructura por carga gravitacional	75
Figura 5-7 Deformación de la estructura por carga sísmica	75
Figura 5-8 Secciones de marco arriostrado en sentido X.....	76
Figura 5-9 Secciones de marco arriostrado en sentido Y	77
Figura 5-10 Acelerogramas originales Managua 1972	82
Figura 5-11 Acelerogramas adecuados de Managua 1972	82
Figura 5-12 Comparación de espectros de respuesta.....	83
Figura 5-13 Geometría del disipador ADAS usado.....	84
Figura 5-14 Modelo bilineal del disipador ADAS de Acero A-36.....	88
Figura 5-15 Ubicación de los disipadores.....	89

Figura 5-16 Deformación de la estructura con disipadores por carga gravitacional	91
Figura 5-17 Deformación de la estructura con disipadores por carga sísmica.....	91
Figura 6-1 Comparación de deformación en X.....	96
Figura 6-2 Comparación de deformación en Y	96
Figura 6-3 Comparación de deformación en X.....	99
Figura 6-4 Comparación de deformación en Y	99
Figura 6-5 Deformación de edificación sin disipadores en X	101
Figura 6-6 Deformación de edificación con disipadores en X.....	101
Figura 6-7 Deformación de edificación sin disipadores en Y	102
Figura 6-8 Deformación de edificación con disipadores en Y	102
Figura 6-9 Ubicación de elementos críticos.....	103
Figura 6-10 Resumen de diseño de columna crítica edificio sin disipadores	104
Figura 6-11 Resumen de diseño de columna crítica edificio con disipadores.....	105
Figura 6-12 Resumen de diseño de riostra crítica edificio sin disipadores	108
Figura 6-13 Resumen de diseño de columna crítica edificio con disipadores.....	109
Figura 6-14 Energía de entrada vs energía disipada por el dispositivo en X	111
Figura 6-15 Energía de entrada vs energía disipada por el dispositivo en Y	111
Figura 6-16 Ciclo de histéresis de un disipador de 6 placas en sentido X.....	112
Figura 6-17 Ciclo de histéresis de un disipador de 6 placas en sentido Y	112
Figura 6-18 Ciclo de histéresis de un disipador de 12 placas en sentido X	113
Figura 6-19 Ciclo de histéresis de un disipador de 12 placas en sentido Y	113
Figura 10-1 Definición del espectro de respuesta en ETABS.....	134
Figura 10-2 Definición de casos de espectro de respuesta	136
Figura 10-3 Definición del disipador	137
Figura 10-4 Definición de propiedades del disipador.....	138

Figura 10-5 Asignación de Panel-Zone	139
Figura 10-6 Definición de función Tiempo-historia	140
Figura 10-7 Casos de análisis Tiempo-historia.....	140
Figura 10-8 Gráfica de análisis Tiempo-historia	141
Figura 10-9 Ingreso del registro en el programa	142
Figura 10-10 Registro sísmico	143
Figura 10-11 Espectro de respuesta	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Derivas últimas máximas tolerables	51
Tabla 5-1 Propiedades Acero A36	63
Tabla 5-2 Características del edificio	65
Tabla 5-3 Coeficientes y factores para diseño de sistemas sismorresistentes	67
Tabla 5-4 Datos usados para la construcción del Espectro de Respuesta	68
Tabla 5-5 Resultados del Espectro de Respuesta.....	69
Tabla 5-6 Solución del sismo estático	71
Tabla 5-7 Solución del sismo dinámico	72
Tabla 5-8 Peso de los elementos estructurales.....	77
Tabla 5-9 Sismos de Control para la Selección de registros	79
Tabla 5-10 Evento seleccionado para el análisis.....	80
Tabla 5-11 Factores de escala aplicados a acelerogramas.....	81
Tabla 5-12 Geometría del disipador	84
Tabla 5-13 Propiedades mecánicas del disipador	85
Tabla 5-14 Propiedades del disipador en función del número de placas.....	87
Tabla 6-1 Derivas de la estructura sin disipadores.....	93
Tabla 6-2 Derivas de la estructura sin disipadores (R=6).....	94
Tabla 6-3 Derivas de la estructura con disipadores.....	95
Tabla 6-4 Deformaciones máximas de la estructura con disipadores.....	95
Tabla 6-5 Derivas de la estructura con disipadores.....	97
Tabla 6-6 Deformaciones máximas.....	98
Tabla 6-7 Comparación de resultados de diseño de columnas en X.....	106
Tabla 6-8 Comparación de resultados de diseño de columnas en Y	107

Tabla 6-9 Reducción en relación D/C de columnas.....	107
Tabla 6-10 Comparación de resultados de diseño de riostras en X	110
Tabla 6-11 Comparación de resultados de diseño de riostras en Y	110
Tabla 10-1 Nivel mínimo de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño	130
Tabla 10-2 Coeficiente de Sitio F_a (Tabla 4-2).....	130
Tabla 10-3 Coeficiente de Sitio F_v (Tabla 4-3).....	131

1. PRESENTACIÓN

1.1. Introducción

En áreas de alta actividad sísmica, como Guatemala, es necesario tomar consideraciones adicionales en el diseño de cualquier estructura para garantizar la seguridad de las personas que la habitan, estas son definidas según diferentes normativas específicas de cada país, y a su aplicación es lo que se conoce como diseño sismorresistente. En estos casos es necesario, además del sistema que soporta las cargas gravitacionales debidas al uso y al peso propio, diseñar un sistema de resistencia lateral, o sea aquel que funcionará durante un evento sísmico. En muchos casos ambos sistemas (de resistencia gravitacional y lateral), son un sistema global capacitado para ambas funciones.

En el diseño sismorresistente convencional el desempeño de una estructura durante 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.

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.

1.2. Justificación

La ubicación geográfica de Guatemala en un área altamente sísmica, y su trayectoria socioeconómica, se conjugan en una alta vulnerabilidad frente a eventos sísmicos de gran magnitud. Esto es posible comprobarlo a lo largo de la historia, siendo uno de los eventos más significativos el terremoto 1976, que representó cuantiosas pérdidas humanas y económicas; pero también es importante mencionar eventos más recientes como los de 2007 y 2012, que afectaron mayormente el departamento de San Marcos; o ir más hacia el pasado, hasta 1773, donde los conocidos como Terremotos de Santa Marta, tuvieron consecuencias significativas y conllevaron al traslado de la Ciudad Capital, al Valle de la Ermita o de la Asunción, ubicación actual de la Ciudad de Guatemala.

En la actualidad se cuenta en el país con una serie de normas de seguridad estructural que son un requisito legal para las construcciones, y que contemplan todos los aspectos a tomar en cuenta en cualquier diseño de una edificación. Aunque el diseño convencional tiene grandes ventajas, también presenta algunos inconvenientes, los cuales son el reto de nuevas técnicas de diseño aplicadas en la actualidad en numerosos países del mundo. Sin embargo el desarrollo de técnicas no convencionales para el diseño de estructuras, no ha tenido un significativo desarrollo en el país.

En este trabajo de investigación se llevó a cabo una metodología de análisis aplicable a estructuras de mediana altura de acero con disipadores de energía. Enfocándola, no solo a la protección de la vida humana, sino además en la protección de la infraestructura física, con el objetivo de permitir una habitación inmediata, o por lo menos rápida, posterior a un evento sísmico; esto se logró implementando disipadores de energía como parte del sistema de resistencia lateral de la estructura.

1.3. Objetivos:

Generales:

Evaluar el comportamiento de una estructura de marcos de acero con disipadores metálicos histeréticos de energía, tipo ADAS (Added Damping and Stiffness), como una alternativa al diseño sismorresistente convencional.

Específicos

1. Comprender las implicaciones del diseño sismorresistente convencional y aplicar los aspectos fundamentales para el análisis de una estructura, y los requisitos impuestos por la normativa nacional.
2. Utilizar un software comercial de computadora para realizar el análisis estructural de un edificio, convencional y con disipadores de energía.
3. Llevar a cabo una metodología práctica para el análisis de una estructura con disipadores de energía y describir los pasos necesarios, aplicando los conceptos más importantes del diseño sismorresistente.
4. Realizar un análisis comparativo entre una estructura convencional y una estructura con disipadores; determinando la influencia de éstos en el comportamiento de una edificación ante la acción de un sismo.

1.4. Alcances

El tema de la disipación de energía en edificaciones es muy amplio y existe una gran cantidad de sistemas orientados a brindar resultados óptimos frente a sismos, por lo que esta investigación está enfocada a los sistemas pasivos de control de vibraciones, y con mayor énfasis a los disipadores de tipo histeréticos o de plastificación de metales, como una alternativa aplicable en el territorio guatemalteco. Entre estos sistemas pasivos, se consideró para el ejemplo el disipador ADAS (Added Damping and Stiffness, por sus siglas en inglés), debido a que existe una significativa cantidad de información disponible sobre este disipador, y a su simplicidad de funcionamiento respecto a otros sistemas.

El contenido del documento está orientado principalmente a estudiantes de ingeniería civil y a personas interesadas en el tema de disipadores de energía, por lo que los temas tratados son explicados de forma clara y concisa, de acuerdo a las competencias de una licenciatura. Esto además implica tratar conceptos básicos de diseño sismorresistente de edificios convencionales, para tener un punto de partida para analizar una estructura técnicamente válida, a la cual le sean implementados disipadores de energía.

Es importante destacar que no se lleva a cabo una optimización demasiado rigurosa de piezas del edificio, debido a que el objetivo de este trabajo no es el diseño del edificio como tal, sino el análisis de la influencia del uso de disipadores en una estructura, la cual cumpla con las condiciones de servicio y resistencia pertinentes.

2. CONCEPTOS GENERALES

2.1. Disipación de Energía en Edificaciones

Un evento sísmico de gran magnitud genera una significativa cantidad de energía, la cual es trasladada a las estructuras mediante el movimiento del suelo. Esto ocasiona que las edificaciones vibren, y deban disipar esa energía de entrada por medio de esfuerzos internos, rozamiento, rotura y deformaciones plásticas (Villareal y Oviedo, 2008). Generalmente en una estructura sismorresistente, la disipación de energía sísmica, ocurre en puntos específicos en las vigas y en las columnas (las cuales también forman parte del sistema de resistencia gravitacional); estos puntos se conocen como rotulas plásticas dúctiles, las cuales son regiones de daño concentrado del marco rígido, el cual frecuentemente es irreparable. Este comportamiento es aceptable debido a los beneficios económicos que tiene en el costo de la estructura, además de prevenir el colapso de la misma, y garantizar la protección de la vida de las personas que la habitan, todo lo anterior bajo los estándares convencionales de diseño sismorresistente. En resumen, es posible decir que la sobrevivencia de un edificio frente a un evento sísmico dependerá de la capacidad de su sistema estructural para disipar, por medio de la deformación, la energía de entrada de un sismo. Este comportamiento, en términos generales se conoce como ductilidad.

Cuando sucede un evento sísmico, la estructura inicia su trabajo de comportamiento elástico lineal como primera reacción al movimiento (sufre deformaciones no permanentes) pero cuando la intensidad del sismo aumenta de forma que vence la resistencia inicial, la estructura empieza a trabajar en el rango inelástico, lo cual representa una segunda línea de defensa a la estructura (Espejel, 2013). Como se describió anteriormente, este comportamiento es el que se cataloga como dúctil. La única forma relativamente confiable de depender de la ductilidad de las estructuras, es disminuyendo significativamente su resistencia máxima probable mediante la utilización de factores de resistencia menores a la unidad y amplificando las cargas

esperadas durante su vida útil mediante la utilización de factores de carga mayores a la unidad.

Sin embargo, existen situaciones en donde las características del diseño convencional no son aplicables. En el caso que una estructura deba permanecer funcional después de un sismo, como es el caso de obras esenciales como por ejemplo hospitales o edificios públicos, estas consideraciones no serán necesariamente apropiadas. Para estos casos la estructura podría ser diseñada con suficiente resistencia para que la acción inelástica sea prevenida o sea mínima; sin embargo esto resultaría en costos muy elevados. Esta problemática se ha traducido en grandes esfuerzos de la ingeniería estructural, para dar con alternativas a las metodologías tradicionales de diseño. Además, el daño a una estructura posterior a un sismo, puede representar grandes costos de reparación, o inclusive ser irreparable; lo cual significa la pérdida del capital invertido en la construcción de la edificación.

Dentro de estas alternativas, se han desarrollado técnicas de diseño que incorporan sistemas de protección sismorresistente en la estructura, con el propósito de estos sistemas es el de concentrar la fuerza en puntos de alta rigidez, que puedan ser reemplazados en caso de un evento sísmico. Esto lo logran mediante la reducción de la respuesta global de la estructura, o en otras palabras la vibración de la misma. Estos sistemas pueden ser sistemas de aislamiento sísmico o dispositivos suplementarios de disipación de energía.

Una edificación sometida a la acción de un sismo es un sistema vibratorio que se compone por diferentes elementos, que pueden simplificarse de la siguiente manera:

- Los elementos de inercia, que están asociados a la aceleración del sistema, y tiene la función de almacenar y liberar energía cinética.
- Los elementos de rigidez, que están asociados a las deformaciones o desplazamiento de la estructura, y tiene la función de almacenar y liberar energía potencial.

- Los elementos de disipación que son asociados a la velocidad y al desplazamiento, representan la pérdida de energía del sistema (Espejel, 2013).

La energía de respuesta de un sistema vibratorio corresponde a la suma de las energías particulares de cada uno de los elementos. Esta suma de energías será igual a la energía externa que provoca cualquier excitación, como por ejemplo un sismo, para lograr el equilibrio. La energía que la estructura debe disipar mediante la plastificación del material puede disminuirse si se adiciona sistemas de reducción de respuesta con una alta capacidad de disipar energía, lo cual reduce el daño de los elementos estructurales, y lo concentra en dispositivos que pueden reemplazarse.

La primicia básica de funcionamiento de los sistemas de reducción de vibraciones, es mejorar el desempeño estructural de una edificación absorbiendo una porción de la energía de entrada causada por el sismo, evitando que los elementos estructurales disipen esta energía. La base para la innovación tecnológica en el ámbito de las estructuras, es el conocimiento y comprensión de la ley de conservación de energía.

$$E = E_K + E_s + E_h + E_d \quad (1)$$

Donde:

E Energía de entrada del evento sísmico

E_k Energía cinética

E_s Energía de deformación elástica recuperable

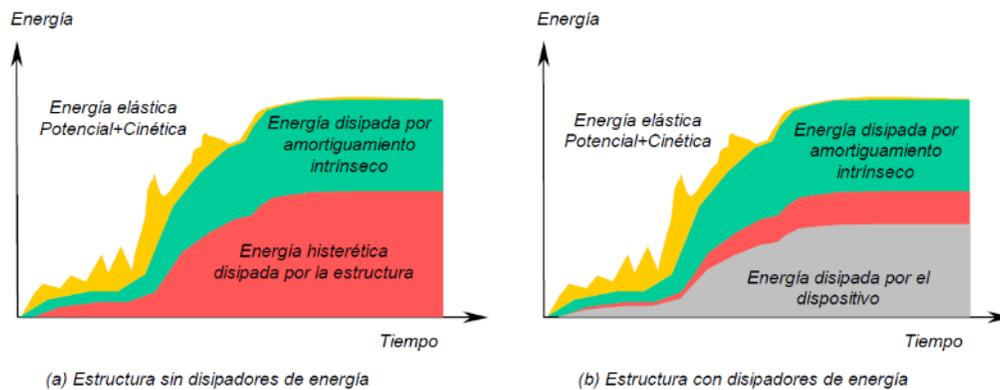
E_h Energía irrecuperable, disipada por el sistema estructural a través de la inelasticidad

E_d Energía disipada por los dispositivos de amortiguamientos suplementarios

En la ecuación (1) se presenta la expresión de la conservación de la energía, en la cual se desglosa todos los tipos de energía involucrados en la vibración de un

edificio a causa de un sismo. La energía de entrada (E) representa el trabajo hecho por la fuerza de corte total en la cimentación debido al desplazamiento del terreno y contiene el efecto de las fuerzas de inercia de la estructura. En el diseño convencional, el desempeño aceptable de la estructura, está acompañado de deformaciones inelásticas, lo cual incrementa la energía irrecuperable. La ocurrencia de deformaciones modifica la energía de entrada, reduciendo la aceleración y las deformaciones en regiones alejadas a las rotulas plásticas. En la figura 2-1, se muestra una descomposición de la energía asociada a una edificación durante un sismo, y una comparación de una estructura convencional con una que tiene disipadores de energía (Reyes y Rubiano, 2,002).

Figura 2-1 Balance de energía en una edificación



Fuente: Reyes y Rubiano (2002)

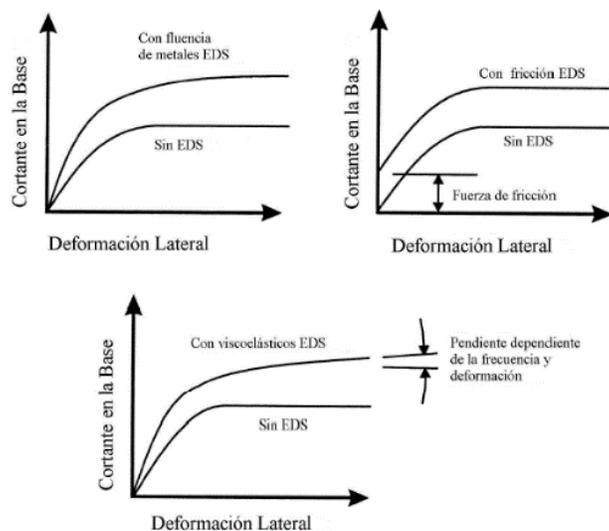
Ya que en una estructura convencional, el daño ocurrido en las rotulas plásticas, puede representar altos costos en reparación, o hasta condiciones irreparables; los sistemas suplementarios de disipación de energía, resultan una opción muy atractiva. En estos sistemas, dispositivos mecánicos se incorporan en los marcos del edificio, lo cual permite disipar energía a lo largo de toda la altura de la estructura. Esta energía es disipada por fluencia de metales, fricción por deslizamiento, movimiento de un pistón o un plato con un fluido viscoso. En términos

de la ecuación de conservación de la energía, citada anteriormente, la función del dispositivo es reducir la energía irrecuperable disipada por el sistema estructural mediante las rotulas plásticas

2.2. Sistemas de Control de la Respuesta Dinámica

Durante un evento sísmico, una cantidad finita de energía entra a la estructura a causa del movimiento del terreno. Esta energía de entrada es transformada en energía cinética y energía potencial (deformación), ambas deben ser absorbidas o disipadas convirtiéndolas en otro tipo de energía, por ejemplo a través del calor. En un sistema ideal, sin amortiguamiento, las vibraciones existirían de forma infinita, sin embargo en los casos prácticos la estructura es la que disipa esta energía y proporciona dicho amortiguamiento. El desempeño estructural puede ser mejorado si una porción de la energía de entrada es absorbida por algún tipo de dispositivo suplementario, y no por la estructura misma (Villareal y Oviedo, 2008).

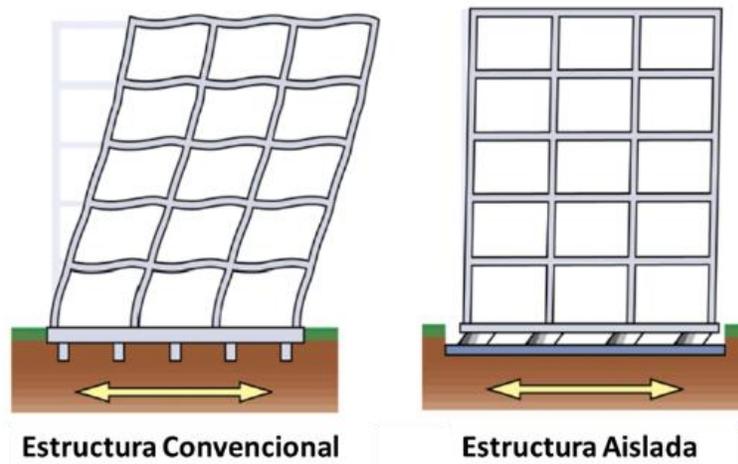
Figura 2-2 Efectos de los sistemas de disipación de energía en las curvas fuerza-deformación de una estructura



Fuente: Villareal y Oviedo (2008)

Los sistemas de control de la respuesta dinámica son un conjunto de elementos incorporados a una estructura con la función de reducir y controlar las vibraciones de la misma frente a un evento sísmico. El objetivo de este sistema es absorber parcialmente la energía sísmica que ingresa al sistema mediante la adición de un elemento con una alta capacidad de disipar energía, lo cual se traduce en una alta efectividad para reducir la amplitud de la vibración.

Figura 2-3 Comportamiento de un edificio con aislamiento de base



Fuente: FEMA 451 (2006)

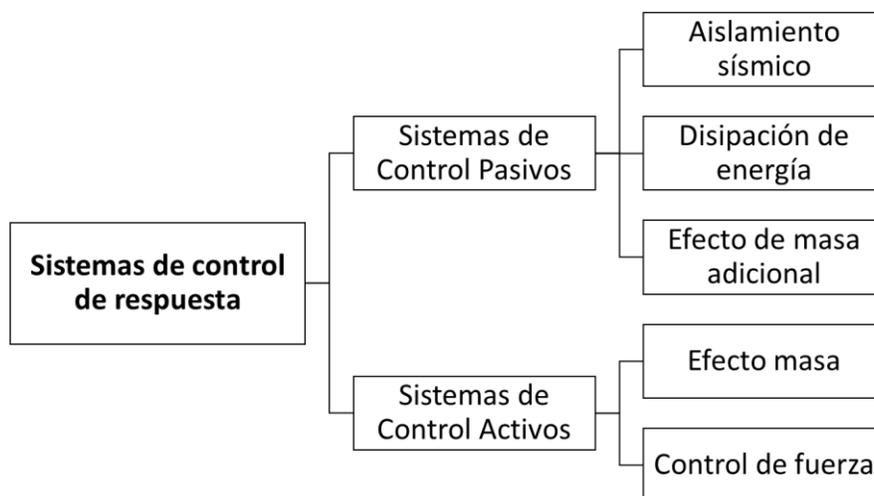
La adición de sistemas de disipación de energía incrementa la resistencia y/o rigidez de la estructura. El fin básico de estos dispositivos es reducir y controlar las vibraciones de un edificio provocadas principalmente por solicitaciones sísmicas. El principio de funcionamiento de estos sistemas es ensamblar en la estructura un sistema mecánico que absorba una parte de la energía que llega a todo el sistema originada por un sismo, en el caso del uso de disipadores; o instalar dispositivos que desacoplen a la estructura del movimiento del terreno, como es el caso de los aisladores sísmicos.

Algunas de las ventajas de utilizar disipadores de energía en estructuras son que:

- Concentran el daño en puntos y elementos identificados y fácilmente reemplazables, posterior a un sismo de gran intensidad.
- Aumentan la rigidez de la edificación, protegiendo además los elementos no estructurales (ventanas y cielos falsos).

Las técnicas de control de la respuesta sísmica se pueden clasificar según la forma en que el sistema maneja la energía impuesta por el sismo, su absorción y disipación. En la figura 2-4, se representa una clasificación general donde se enfoca en dos sistemas de control de respuesta sísmica: activos y pasivos, la cual fue planteada por el ISO 3 2010, (International Standard 'Basis for design of structures - Seismic action on structures').

Figura 2-4 Sistemas de control de respuesta



Fuente: ISO 3010 (2012)

Ambos sistemas de control de vibraciones, activos y pasivos, se diferencian en que los sistemas de control activo necesitan de energía externa para funcionar, al incluir sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, entre otros; por el contrario los sistemas de control pasivo, actúan debido a la energía que el mismo sismo aplica a la estructura. Estos dos tipos pueden combinarse para obtener mejores resultados, mezclando por ejemplo sistemas de disipación de energía con aisladores.

2.3. Sistemas Pasivos de Control de Vibraciones

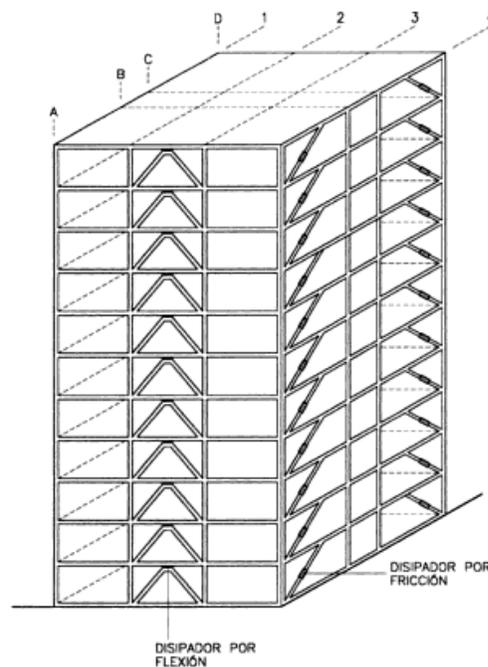
Son llamados pasivos porque son elementos con un carácter reactivo, cuya respuesta no es controlable y dependen únicamente de las condiciones de trabajo a las que se ven sometidas; al contrario que los activos, no necesitan una fuente externa de energía eléctrica para su funcionamiento y se basan en sistemas con respuesta inercial a la acción sísmica. Abarcan distintos tipos de materiales y dispositivos que mejoran el amortiguamiento, rigidez y resistencia de una estructura. Los dispositivos pasivos son efectivos para resistir cargas laterales, tanto para la acción del viento, como para la acción sísmica. En la figura 2-5 se muestra un edificio con una distribución típica de disipadores de energía pasivos.

Son sistemas que intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio, provocando una reducción de su respuesta estructural. Esto puede ser alcanzado por la conversión de energía cinética en calor, o por la transferencia de energía entre modos de vibración. El primer método incluye dispositivos que operan en base a principios tales como la fricción, fluencia de metales, transformaciones de fase en metales, deformaciones de sólidos viscoelásticos o fluidos. El segundo método incluye la incorporación de osciladores adicionales, que actúan como disipadores de vibraciones dinámicas.

Los sistemas de control pasivo ofrecen grandes ventajas, entre las que se cuentan:

- Requieren procedimientos más sencillos para la verificación del estado del dispositivo, para su mantenimiento y reemplazo durante la vida útil de la estructura.
- Utilizan menos componentes adicionales que intervienen en la respuesta de la edificación ante una excitación externa.
- La sencillez en los procedimientos de análisis y diseño estructurales.
- No necesitan una fuente de energía externa para su funcionamiento frente a la acción de sismos.

Figura 2-5 Edificio con disipadores



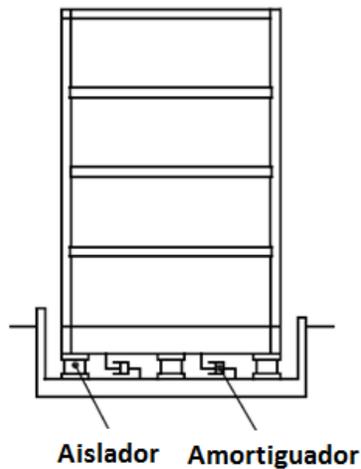
Fuente: Bozzo (2000)

2.4. Clasificación de los disipadores pasivos de energía

2.4.1. Aislamiento en la Base

Esta técnica se basa en desacoplar la estructura del movimiento del suelo, protegiéndola del efecto de los sismos. El aislamiento se logra mediante el uso de dispositivos flexibles al movimiento horizontal, pero rígidos al desplazamiento vertical; estos son ubicados entre los cimientos y la superestructura de la edificación. Tienen el efecto de alargar el período fundamental de la estructura, con lo cual desacopla parcialmente la estructura del movimiento del terreno y limita la entrada de energía.

Figura 2-6 Sistema de aislamiento



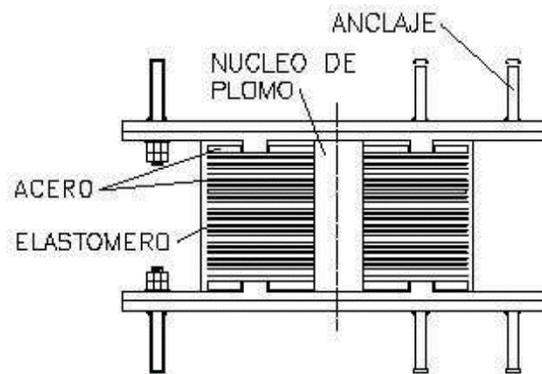
Fuente: ISO 3010 (2012)

En general, los componentes básicos del aislamiento de base son: los elementos flexibles que alargan el período natural del edificio; un mecanismo de disipación (amortiguador) para controlar la deflexión de esos elementos flexibles en un nivel práctico y un mecanismo que provea a la edificación la rigidez necesaria para limitar

las vibraciones de la estructura sometida a las cargas frecuentes de vientos o sismos de baja magnitud.

Uno de los dispositivos usados para el aislamiento basal son los aisladores de neopreno zunchado, los cuales intercalan placas delgadas de acero en un bloque cúbico o cilíndrico de neopreno. Su rigidez vertical aumenta significativamente, manteniendo su flexibilidad lateral; esto permite que brinden de flexibilidad al edificio pero al mismo tiempo en que su capacidad de disipación sea baja. Además de este tipo, también existen aisladores de base por fricción, de movimiento pendular, entre otros.

Figura 2-7 Aislador de neopreno zunchado



Fuente: Oviedo y Villarreal (2008)

2.4.2. Sistemas Inerciales Acoplados

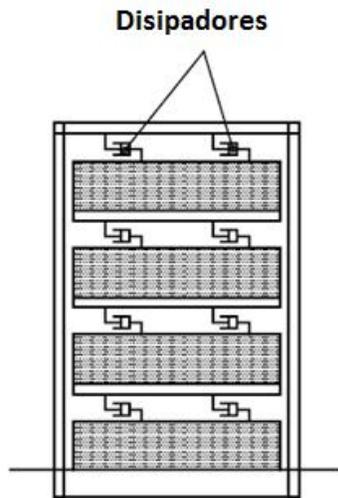
También son conocidos como sistemas de efecto-masa, y consisten en amortiguadores de masa sintonizada, los cuales utilizan una o varias masas de gran magnitud colocadas en la parte superior de la estructura. Tiene el propósito de reducir la respuesta de una estructura ante cargas dinámicas. Los valores de la masa se determinan para que la frecuencia natural de vibración del dispositivo se acerque sensiblemente a la frecuencia fundamental de la estructura.

2.4.3. Disipadores de Energía

Un disipador de energía tiene el propósito de incrementar el amortiguamiento interno de una estructura, mediante la incorporación de amortiguadores suplementarios en la estructura ubicados en lugares estratégicos. Estos sistemas emplean el desplazamiento relativo entre pisos (deriva), que ocurre en las estructuras durante excitaciones sísmicas o de viento, y tienen el objetivo de eliminar o disminuir la disipación de energía histerética en las conexiones viga-columna de la estructura. Estos desplazamientos o derivas de la estructura causan el desplazamiento del amortiguador haciendo que este trabaje. Pueden ser usados independientemente o conjuntamente con otros sistemas, como por ejemplo combinados con aisladores de base.

Los disipadores de energía se pueden clasificar de forma general en disipadores histeréticos y disipadores viscoelásticos.

Figura 2-9 Sistema de Disipación



Fuente: ISO 3010 (2012)

Los disipadores histeréticos dependen del desplazamiento y se basan en la plastificación de metales por flexión, cortante o extrusión. Estos cambian la energía de entrada del sismo en energía térmica a través de la histéresis plástica de metal o energía friccional.

Los disipadores viscoelásticos, los cuales transforman la energía de entrada del sismo en energía térmica por medio de la deformación de un líquido viscoso o un material visco elástico. Dependen fundamentalmente de la velocidad y pueden ser sólidos viscoelásticos, fluidos conducidos a través de orificios, o fluidos viscoelásticos

a. Disipadores viscoelásticos

Son dispositivos con un comportamiento visco-elástico, es decir cuyo comportamiento similar al de un sólido elástico, pero al mismo tiempo posee las propiedades de los fluidos viscosos. Debido a ambas propiedades, son capaces de regresar a su forma original después de sufrir deformación, también disipan una cierta cantidad de energía por calor. Utilizan la resistencia viscosa, que opera en función de la velocidad, y aprovechan la deformación de corte de materiales basados en polímeros altamente viscosos (Avilés, 2001). Son similares en forma y funcionamiento a los amortiguadores de un automóvil.

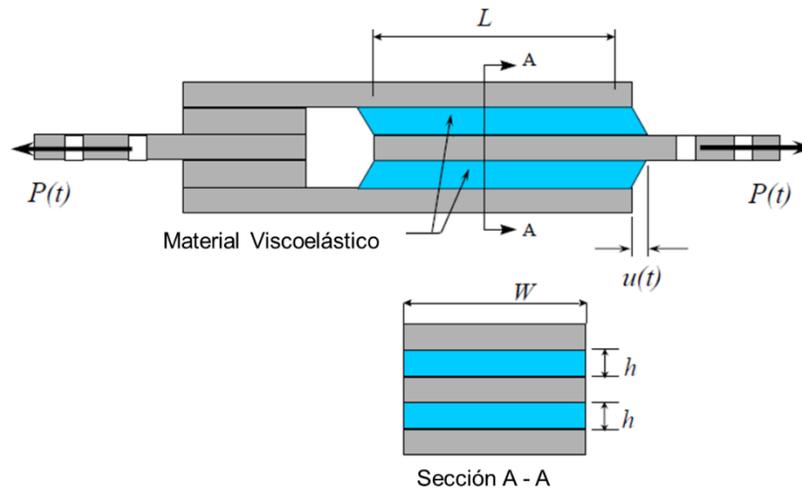
Los disipadores viscoelásticos presentan algunas ventajas frente a los disipadores histeréticos:

- Funcionan para niveles de vibración muy pequeños.
- Su implementación no cambia significativamente los períodos de vibración, lo cual permite linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelación y análisis más sencillos.

Por el contrario, entre sus desventajas se cuenta que es necesario una gran cantidad de dispositivos para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural para reducir significativamente la respuesta ante un sismo. Por otro lado la poca

variación del período fundamental no evita el comportamiento resonante, y además los materiales de los que están fabricados son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación.

Figura 2-10 Disipador viscoelástico



Fuente: FEMA 451 (2006)

Aparte de los disipadores viscoelásticos, también existen disipadores de fluido viscoso, los cuales tienen un comportamiento similar. Esencialmente son mecanismos llenos de un fluido con la capacidad de mantenerse en funcionamiento durante grandes períodos de tiempo sin mantenimiento y disipan energía aplicando una fuerza resistiva a un desplazamiento finito, que actúa en la dirección opuesta al movimiento de entrada. El valor de esta fuerza resistiva varía con respecto a la velocidad traslacional del disipador en cualquier punto en el tiempo, esto debido a que su comportamiento se rige por las leyes de la mecánica de fluidos.

b. Disipadores histeréticos

Este tipo de dispositivos utilizan la plasticidad de los metales, por lo que también se conocen como de plastificación de metales. El material más utilizado ha sido el acero, sin embargo se ha diversificado, usando por ejemplo cobre, o aleaciones con diferentes metales. Estos mecanismos poseen una gran capacidad de amortiguamiento a partir de un volumen relativamente pequeño del dispositivo. Los efectos de amortiguamiento de este tipo de dispositivos varían con el nivel de sismicidad y también con la relación de la fuerza total de los amortiguadores instalados en la estructura respecto al peso total de la misma, el efecto de amortiguamiento varía con la amplitud de la vibración de la estructura (Gatica, 2012).

Estos dispositivos ofrecen una gran capacidad de amortiguamiento, lográndolo debido a que sus formas geométricas inducen a que la fluencia se presente en gran parte o en la totalidad del dispositivo metálico, variando su efecto de amortiguamiento con la amplitud de la respuesta o vibración.

Entre las ventajas más importantes que tienen estos disipadores están:

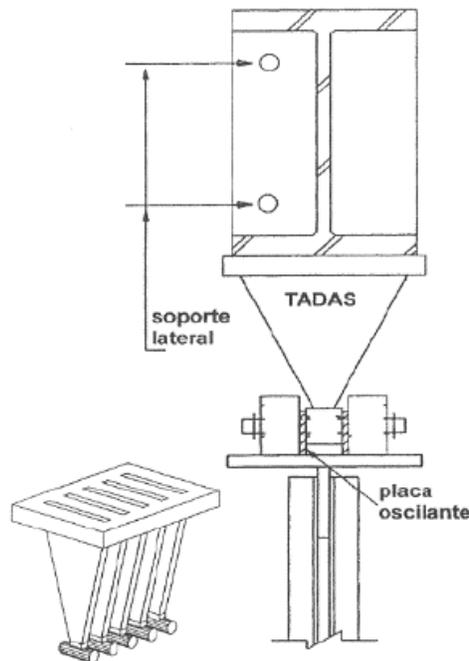
- Su instalación y reposición son relativamente económicas, y no se deterioran en largos períodos de tiempo, lo cual los hace altamente confiables.
- Se basan en la capacidad del acero, cobre u otros materiales, de sostener muchos ciclos del comportamiento de rendimiento histerético estable para disipar la energía de entrada.
- Su comportamiento histerético depende de los niveles de deformación alcanzados, no de la aceleración o de la velocidad de la respuesta.

- **Disipadores tipo TADAS**

Este es un dispositivo de disipación de energía por flexión, y su nombre está dado por las siglas en inglés de Triangular Plate Added Damping and Stiffness (TADAS). Está formado por un conjunto de placas metálicas con forma de triángulo invertido, paralelas y de espesor constante, lo cual permite que esté empotrada en su extremo superior, pero articulada en el extremo inferior. Esta condición empotrada-articulada, posibilita una distribución global de la plastificación.

La base mayor de la placa se conecta al nivel de la viga superior de un marco, mientras que el otro extremo se articula con la unión de dos contraventeos o riostras dirigidos a la base de las columnas del marco del edificio. Cuando existe un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple.

Figura 2-11 Disipador TADAS

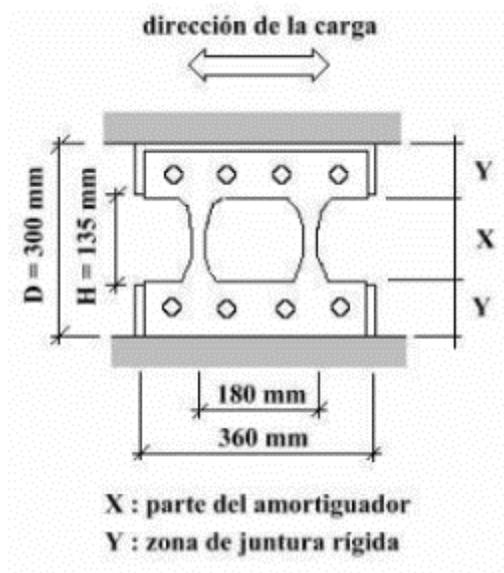


Fuente: Foti, Bozzo y Almansa (1998)

- **Disipadores tipo Panal (Honycomb)**

Es un amortiguador de placa de acero con muchas aberturas en el medio con forma de rejillas, y razón por la cual recibe el nombre de *Honeycomb*, que se traduce al español como panal de abeja. Su geometría tiene como objeto generar una plastificación lo más uniforme en la zona de disipación, y además garantizar una alta rigidez. Este amortiguador utiliza como mecanismo de disipación la deformación relativa entre los miembros estructurales principales de la edificación, para que de esta forma la deformación del dispositivo disipe la energía de vibración y con ello reduzca el movimiento de respuesta de la estructura. Su comportamiento histerético es muy estable y de forma casi rectangular, con una respuesta parecida a la rígida plástica.

Figura 2-12 Disipador tipo Panal



Fuente: Avilés (2001)

3. DISPOSITIVOS TIPO ADAS

3.1. Descripción general

Es uno de los dispositivos de disipación pasiva por histéresis más conocidos y estudiados, el nombre proviene de sus siglas en inglés ADAS (Added Damping and Stiffnes, que se puede traducir como 'rigidez y amortiguamiento adicionada'). Entre los autores que han realizado trabajos de investigación respecto al tema están Arturo Tena-Colunga (1993), y Withttaker, Bertero y Alonso (1989), entre otros.

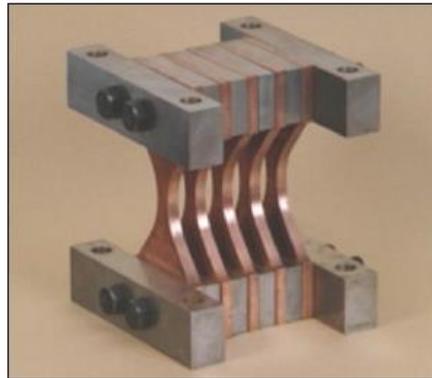
Es un dispositivo formado por un conjunto de placas metálicas en paralelo, con espesor constante y sección variable en forma de X (de frente son parecidos a dos trapecios unidos por su base menor). El número de placas se define según las necesidades de la estructura a la cual se incorporan. Cada placa del dispositivo se encuentra doblemente empotrada (impedida de giro en ambos extremos), de forma que un desplazamiento relativo entre éstos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétricos y con doble curvatura. Su forma tiene la ventaja de permitir una repartición uniforme de las deformaciones plásticas a través de toda su altura, logrando un comportamiento plástico estable y repetible. Este comportamiento se ve reflejado en su curva de histéresis.

Los disipadores ADAS tiene numerosas ventajas, entre las más importantes están las siguientes:

- Su uso está ampliamente difundido en el mundo, en países como Japón, Chile, Estados Unidos, entre otros.
- Reducen el daño en elementos estructurales y no estructurales de la edificación en la que se instalan.
- Su montaje es sencillo, igual que su mantenimiento.

La desventaja más importantes de los disipadores ADAS, radica en que al ser su mecanismo principal de disipación el comportamiento inelástico del material del que se fabrica el dispositivo, esto puede dar como resultado daños severos al mismo después de un sismo, lo que hace necesario reemplazarlos. Además, si se aumenta de forma excesiva la cantidad de disipadores en la estructura se puede provocar un incremento en las aceleraciones experimentadas bajo carga sísmica.

Figura 3-1 Dispositivo histerético metálico tipo ADAS



Fuente: De la Llera, Esguerra, y Almazán (2003)

Los dispositivos ADAS se emplean en estructuras nuevas, pero también pueden ser muy útiles en la reparación de estructuras que han sufrido daño después de terremotos, para reducir la respuesta sísmica de la estructura que sufrió el daño, y centralizarla en los disipadores. Proveen una cantidad substancial de amortiguamiento interno suplementario a la estructura, que permite reducir el espectro de aceleraciones, y por ende las fuerzas sísmicas. El dispositivo reduce la cantidad de energía que debe ser disipada internamente por las piezas de la estructura, y la concentra en el material del que está hecho; esto permite sustituir únicamente el disipador en caso resulte dañado durante un sismo.

Figura 3-2 Dispositivo ADAS usado para pruebas



Fuente: Foti, Bozzo y Almansa (1998)

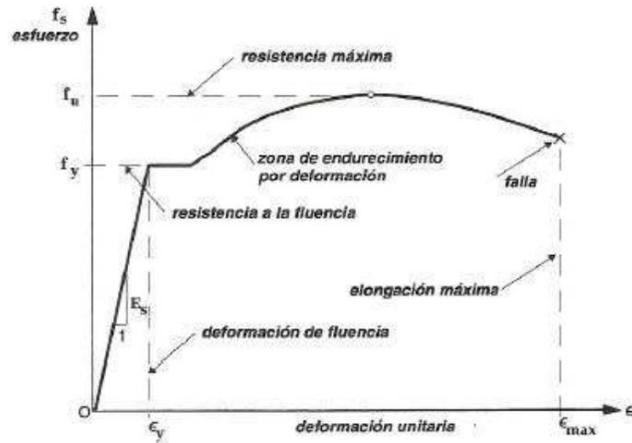
3.2. No Linealidad del dispositivo disipador

Básicamente cuando se habla de comportamiento lineal de un material, se hace referencia a la proporcionalidad existente entre la deformación y el esfuerzo que la genera. Esto ocurre cuando un material es sometido a cargas dentro del rango elástico, en el cual su deformación será directamente proporcional a la carga que se esté aplicando. En este rango el material retoma su forma original si se deja de aplicar la carga, pero si se aumenta la carga de forma que entra en el rango plástico, ya no recuperará su forma, y su comportamiento es definido como no lineal.

Los materiales presentan dos tipos básicos de comportamiento no lineal:

- *Comportamiento con endurecimiento.* En este caso cuando el material supera un cierto estado tensional empieza a perder rigidez, aunque puede seguir soportando incrementos de carga. En este caso, la curva de comportamiento muestra que a medida que aumenta la tensión las deformaciones suelen crecer más deprisa que el estado tensional. El metal es el material más conocido que sufre este comportamiento.

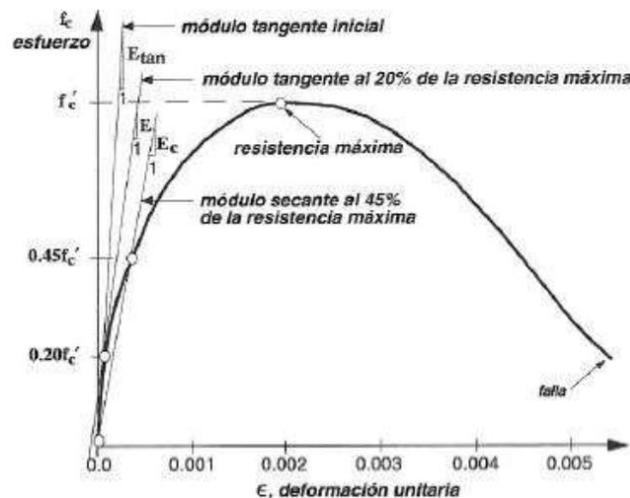
Figura 3-3 Diagrama Esfuerzo-Deformación del Acero



Fuente: García (1998)

- *Comportamiento con ablandamiento.* En este caso al superar cierto estado tensional límite el material pierde rigidez y no puede seguir soportando incrementos de carga; y el material se va descargando aunque su deformación sigue aumentando. Este es el comportamiento típico del concreto.

Figura 3-4 Diagrama Esfuerzo-Deformación del Concreto



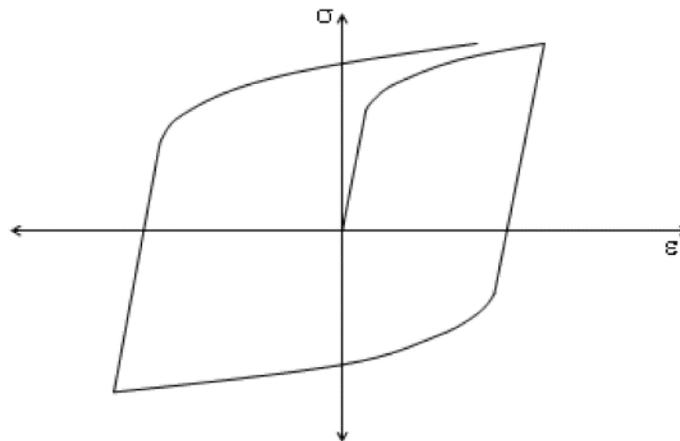
Fuente: García (1998)

Una estructura tradicional se comporta lineal o no linealmente, debido a la fluencia, bajo una condición de carga específica. Pero una estructura con disipadores generalmente se comporta de forma no lineal debido a que la dinámica del disipador es no lineal en velocidades y desplazamientos locales.

3.3. Mecanismo Estructural de Disipación

Los sistemas histeréticos disipan energía a través de mecanismos independientes del rango de aplicación de la carga. El mecanismo que usan los disipadores histeréticos, uno de los más efectivos para disipar energía de un sismo en una estructura, es a través de la deformación inelástica de materiales metálicos. Durante años, se han realizado significativos avances en el desarrollo de disipadores metálicos y se han propuesto nuevos diseños más eficientes que los primeros sugeridos por los investigadores (Tena, 1993).

Figura 3-5 Curva de histéresis de disipadores ADAS



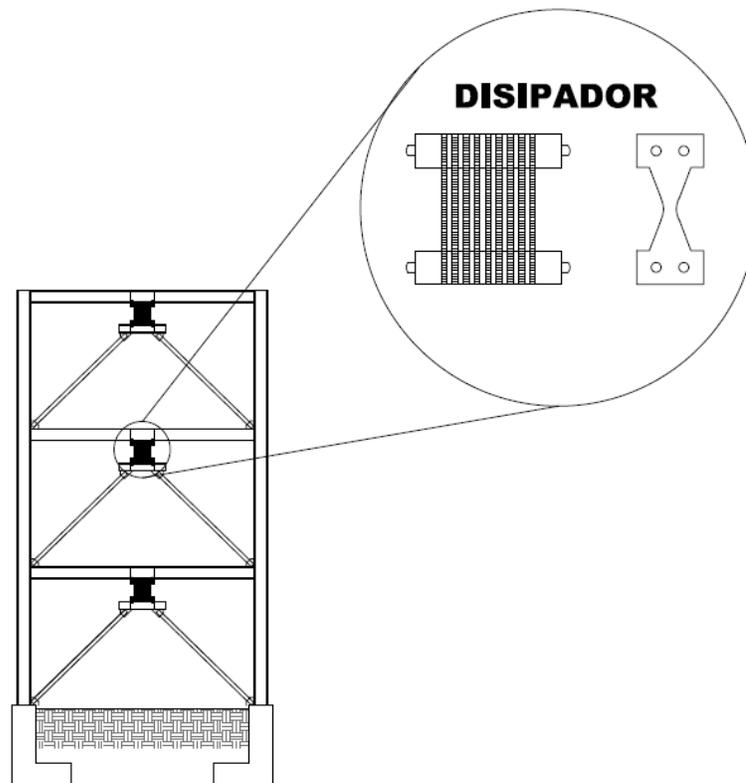
Fuente: Symans (2008)

La respuesta del disipador está íntimamente relacionada con el comportamiento cíclico esfuerzo-deformación del metal con el que está fabricado. Un espécimen de

acero, sometido a una carga uniaxial tiene una respuesta como la de la figura 3-5. Los dispositivos ADAS trabajan básicamente a cortante, plastificándose en su totalidad en una doble curvatura, logrando disipar energía por histéresis (Tena, 1993).

Estos disipadores generalmente son instalados entre el extremo superior de un arreglo de dos riostra con forma de V invertida, también conocido como un brazo chevron, y la viga superior de un marco. Esto permite que el dispositivo resista las fuerzas horizontales asociadas a la distorsión de entrepiso por medio de la deformación por flexión de las placas. A un determinado nivel de carga, las placas fluyen y proveen una cantidad suplementaria de disipación de energía (Villareal y Oviedo, 2008).

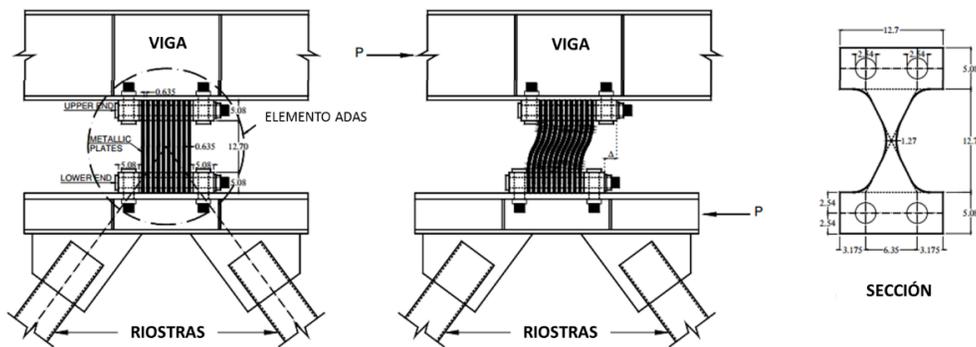
Figura 3-6 Dispositivo ADAS en arreglo tipo chevron



Fuente: Elaboración propia (2015)

Durante la respuesta elástica inicial del dissipador ADAS, el dispositivo proporciona sólo rigidez, lo cual restringe la deformación de la edificación por cargas laterales que no son las críticas, como la acción del viento o sismos de baja magnitud. Conforme la carga aumenta, el material empieza a fluir, la rigidez se reduce y ocurre la disipación de energía debido a la respuesta histerética inelástica.

Figura 3-7 Detalle de dissipador ADAS



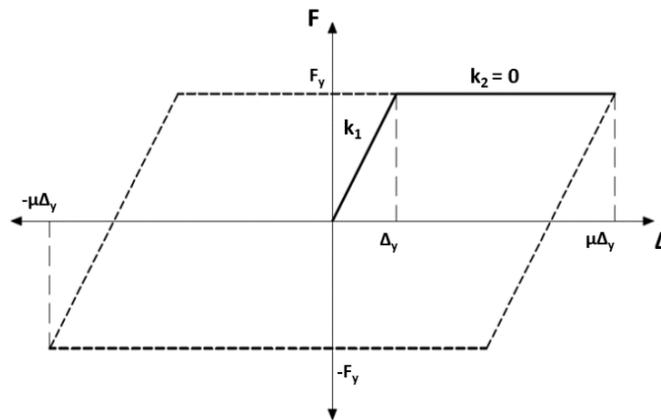
Fuente: Sajjadi Alehashem, Keyhani, y Pourmohammad (2008)

3.4. Modelaje matemático

El modelado matemático de estos dispositivos representa un gran reto para el diseñador, debido que es necesario desarrollar un modelo representativo de la estructura que es estudiada, de forma que se incluyan las propiedades del dissipador, pero al mismo tiempo que el proceso sea eficiente en análisis y diseño, o sea que el tiempo dedicado al modelaje sea lo más provechoso y práctico. Debido al avance de la tecnología, en la actualidad es posible realizar análisis tridimensionales por medio de programas de computadora como el ETABS o el SAP2000, los cuales permiten representar de forma práctica las condiciones de la estructura dotada con dissipadores.

Debido a que los disipadores tienen un comportamiento no-lineal, es posible considerar, de forma conservadora, que los dispositivos ADAS tienen un comportamiento elastoplástico perfecto, donde la pendiente de la curva carga-deformación del dispositivo es igual a 0, después que este fluye ($k_2=0$). Este comportamiento es visible en la figura 3-8.

Figura 3-8 Ciclo de histéresis de un dispositivo con comportamiento elastoplástico



Fuente: Tena (1998)

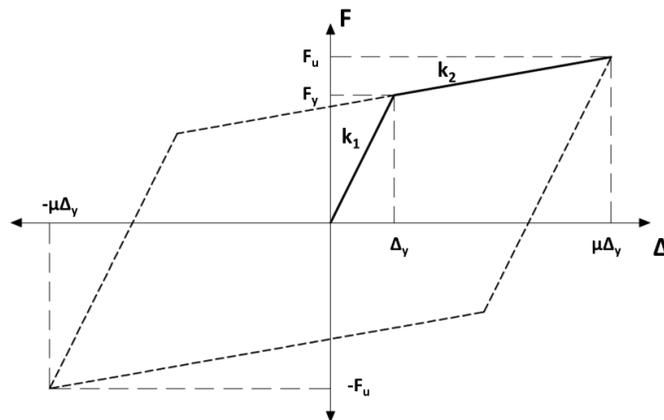
3.4.1. Modelo Bilineal

Este modelo es una formulación simple que permite representar el comportamiento histérico no lineal de ciertos elementos, de forma más precisa y acorde a pruebas experimentales, que el modelo elastoplástico. Consiste en asignar a la rigidez una pendiente positiva después de su fluencia, para simular las características de endurecimiento del material con que está fabricado. Tiene la ventaja de ser un procedimiento sencillo, y simplifica la modelación para la curva de histéresis, sin embargo, resulta no ser del todo representativa en zonas de transición, donde la mejor aproximación es una curva, lo cual se traduce en considerar deformaciones menores que las reales. Sin embargo es un modelo menos conservador que el elastoplástico. Cabe destacar que puede obtenerse de forma teórica, a partir de

resultados analíticos; sin embargo también es común realizar una aproximación bilineal de resultados experimentales con dispositivos ADAS reales.

En este modelo se define un valor a la pendiente post-fluencia del dispositivo, que oscila entre 2 y 10 por ciento de la pendiente antes de fluencia (Whittaker, Bertero, y Alonso, 1989), con el objetivo de representar las características de endurecimiento del acero por deformación. Para fines prácticos es razonable asumir que ésta pendiente es aproximadamente el 5 por ciento de la pendiente elástica ($k_2 = 0.05K_1$).

Figura 3-9 Ciclo de histéresis de un dispositivo con comportamiento bilineal



Fuente: Tena (1998)

En la gráfica de la figura 3-9 es posible observar un ciclo de histéresis de un disipador ADAS simplificado geoméricamente; esta figura permite observar el comportamiento histerético de un disipador definido según el modelo bilineal. En la gráfica los datos representados son:

- F_y Cortante de fluencia
- F_u Cortante último
- Δ_y Deformación de fluencia

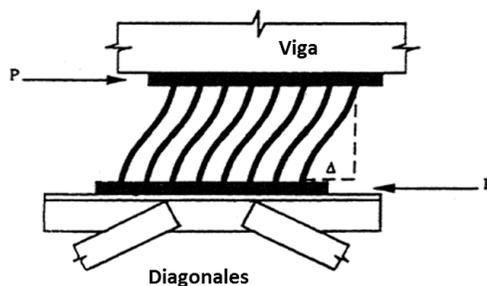
- $\mu\Delta_y$ Deformación última, definida según el umbral de fluencia o demanda de ductilidad

En ensayos experimentales (Tena, 1998) se ha observado que los dispositivos ADAS son capaces de desarrollar demandas de ductilidad locales del orden de 10 ($\Delta u=10\Delta y$), sin sufrir degradación de su resistencia, esto permite tomar dicho valor como un indicador del nivel de deformación que se puede tolerar para fines de diseño.

3.4.2. Determinación de la Rigidez lateral de los dispositivos ADAS

La determinación de la curva carga-deformación de los dispositivos disipadores de energía ADAS es importante para definir modelos elásticos e inelásticos de estructuras provistas con estos sistemas de disipación de energía. Los ADAS son elementos especiales de sección variable, por lo que la determinación de su rigidez elástica es complicada. La rigidez elástica de los dispositivos ADAS se obtiene considerando la variación de la sección transversal del elemento utilizando las flexibilidades y resolviendo exactamente las integrales resultantes.

Figura 3-10 Deformación de un dispositivo ADAS



Fuente: Hanson, Xia, y Su (1992)

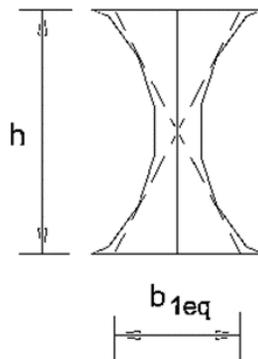
a. Método de Whittaker, Bertero y Alonso

En la figura 3-6 se muestra la configuración geométrica de un disipador ADAS, en la cual se muestra que está formada por placas de acero estructural de sección variable cuya forma es similar a un reloj de arena. Estos elementos trabajan básicamente a cortante, plastificándose casi en su totalidad en doble curvatura. Su forma curva complica significativamente la obtención de la rigidez elástica de estas placas y de su capacidad plástica.

Whittaker, Bertero y Alonso, presentaron en 1989, un procedimiento mediante el cual es posible determinar analíticamente la curva carga deformación de cada placa que forma parte de un disipador ADAS, empleando triángulos inscritos equivalentes en forma de cruz (figura 3-11) en el método se supone:

- A) Las placas en X están empotradas en sus extremos
- B) Las placas se deforman en doble curvatura, antisimétricas con respecto a su sección media
- C) El ancho equivalente de las placas en sus extremos es igual a la mitad de la longitud del dispositivo ($b_{eq} = \frac{h}{2}$)

Figura 3-11 Comparación entre geometría real de disipador ADAS y geometría idealizada por Whittaker



Fuente: Whittaker et al. (1989)

La curva carga-deformación de una placa ADAS se puede idealizar como una curva elastoplástica perfecta o como una curva bilineal. En el proceso de Whittaker et al, se define el punto de fluencia del disipador por medio de la definición del cortante y del desplazamiento de fluencia. El desplazamiento de fluencia se obtiene mediante la doble integración de la curvatura plástica promedio, es decir:

$$d_y = \Delta_y^{PL} = \iint \frac{M(x)}{EI(x)} dx$$

En donde:

$$I(x) = \frac{b(x)t^2}{12}$$

$$M(x) = \sigma_y Z = \sigma_y \frac{b(x)t^2}{4}$$

Donde $I(x)$, representa el momento de inercia, y $M(x)$, el momento máximo.

Por tanto, tomando en cuenta la hipótesis de Whittaker et al. (1989), e integrando, se obtiene el desplazamiento de fluencia de cada placa equivalente con forma de X:

$$\Delta_y^{PL} = \frac{3}{4} \frac{\sigma_y l^2}{Eh} \quad (2)$$

Donde:

- σ_y Esfuerzo de fluencia del material. En el caso de acero A36 es igual a 2530 kg/cm³.
- h Altura del disipador
- E Módulo de elasticidad del material
- t Espesor de la placa

El cortante plástico de cada placa equivalente en forma de X que forma parte del dispositivo ADAS se obtiene a partir de aplicar la ecuación de equilibrio con respecto a la capacidad de momento plástico de la sección (ecuación 3), por tanto, el cortante plástico de cada placa se determina como (Whittaker, Bertero, y Alonso, 1989):

$$V_y = V_y^{PL} = \frac{2M_y}{h} = \frac{\sigma_y b_{Ieq} t^2}{2h} \quad (3)$$

Y la rigidez elástica de cada placa equivalente en forma de X es:

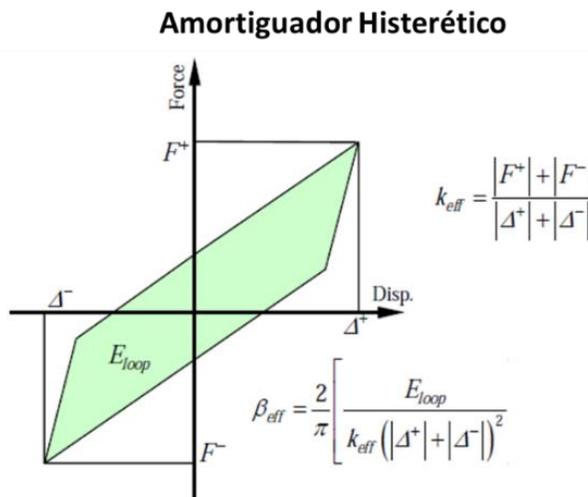
$$K_{PL} = \frac{V_y^{PL}}{\Delta_y^{PL}} = \frac{2}{3} \frac{b_{Ieq} t^3 E}{h^3} \quad (4)$$

Para un dispositivo ADAS formado por n placas e idealizado conforme a lo propuesto por Whittaker et al, el desplazamiento de fluencia es el mismo de la ecuación 4, mientras que el cortante plástico y la rigidez elástica son n veces las obtenidas en las ecuaciones 3 y 4. El procedimiento de Whittaker et al., es sencillo y constituye una aproximación aceptable. La configuración en X equivalente queda inscrita dentro de la forma real del dispositivo ADAS, por lo que la capacidad y la rigidez inicial determinada con la configuración equivalente subestima sus valores analíticos reales.

3.4.3. Propiedades lineales del disipador

A pesar que un dispositivo disipador de energía tipo ADAS, tiene un comportamiento no lineal, debido a la histéresis en la cual se basa su funcionamiento; es posible determinar propiedades lineales equivalentes para linealizar el comportamiento del dispositivo. Estas propiedades se definen, con el propósito de realizar un análisis lineal a una estructura con disipadores de energía.

Figura 3-12 Rigidez Efectiva y Amortiguamiento Efectivo

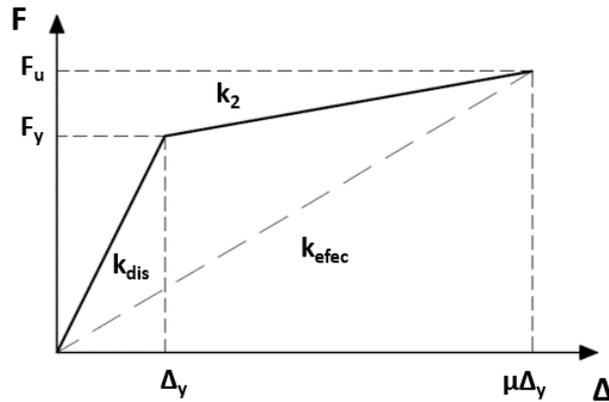


Fuente: FEMA (2006)

a. Rigidez efectiva

Es una rigidez equivalente, que considera las propiedades del dispositivo antes y después de la fluencia, tomando en cuenta la demanda de ductilidad del dispositivo. Se emplea en análisis lineales, en los cuales no es posible introducir las propiedades no lineales del disipador.

Figura 3-13 Curva típica fuerza-deformación de un dispositivo con comportamiento bilineal.



Fuente: Tena (1998)

Según la gráfica anterior la rigidez efectiva del dispositivo disipador se calcula de la siguiente forma:

$$k_{efecdisp} = \frac{F_u}{\mu\Delta_y} \quad (5)$$

Que no es más que la rigidez secante y que en términos de la rigidez del disipador y el umbral de fluencia, deriva la siguiente ecuación:

$$k_{efecdisp} = \frac{k_{dis} + k_2(\mu - 1)}{\mu} \quad (6)$$

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

4.1. Análisis de estructuras sin disipadores de energía

Para el análisis de estructuras existe una gran cantidad de procedimientos, que pueden estar basados en el comportamiento elástico lineal o en el comportamiento inelástico no-lineal de los elementos estructurales de una edificación. El primer tipo de métodos, los elásticos, definen estados de fuerzas laterales estáticas o dinámicas y propiedades elásticas de los materiales para determinar la relación demanda-capacidad de los elementos estructurales, proporcionando una buena aproximación de la capacidad elástica y del inicio de la etapa de fluencia; sin embargo, no pueden predecir mecanismos de falla ni tomar en cuenta la redistribución de fuerzas durante el regreso de la fluencia. En el caso de los métodos inelásticos, existe la posibilidad de aproximar la solución a lo que realmente sucede en la estructura, identificando niveles de desempeño, modos de falla y el comportamiento progresivo de la estructura hasta el colapso.

De manera general el nivel de desempeño describe un estado límite de daño y representa una condición límite o tolerable establecida en función de los posibles daños físicos sobre la estructura, la amenaza de los daños en la seguridad de los ocupantes y la funcionalidad posterior a un terremoto. El desempeño puede expresarse cualitativamente en función del impacto a los ocupantes, o usuarios de la estructura. Y en términos técnicos para el objetivo o evaluación de la estructura tales como el deterioro y la degradación de elementos estructurales y no estructurales, etc.

Todo lo anterior puede resumirse, enlistando los procedimientos de análisis y diseño más utilizados:

- Análisis estático equivalente
- Análisis modal dinámico
- Análisis estático no lineal con cargas incrementales (Pushover)

- Análisis dinámico paso a paso con acelerograma lineal y no lineal (Response Time-History)

Los primeros dos métodos se basan en espectros sísmicos para representar la carga sísmica y son los que se utilizan en Guatemala en conjunto con los estudios de amenaza sísmica existentes para el país. Además de esta clasificación específica, también es posible diferenciar dos grupos generales de análisis: basados en la fuerza, y basados en el desplazamiento.

Las estructuras convencionales, generalmente se analizan mediante métodos basados en la fuerza, y en este caso la no linealidad de la estructura se representa fundamentalmente en un factor de modificación de la respuesta sísmica (R), que permite calcular la resistencia inelástica a partir de la resistencia necesaria para que el edificio se mantenga en el rango lineal-elástico, en la medida que éste tenga suficiente capacidad de disipar energía y posea cierta reserva de resistencia, en otras palabras que su comportamiento sea dúctil (Villareal y Oviedo, 2008).

4.1.1. Grados de libertad de una edificación

Una edificación es un sistema complejo en la cual interactúan diversos componentes que dificultan extraer un esquema sencillo para resolver la forma en que la construcción responde ante diferentes tipos de acciones. Por lo tanto debe generarse un modelo que permita representar las principales características geométricas de la estructura, identificando la parte de la construcción que desarrolla funciones estructurales y eliminando todo aquello que no tiene una influencia significativa en la respuesta de la estructura. Por simplificación la estructura se representa mediante un arreglo de componentes estructurales básica como barras, placas, resortes, arcos, cascarones, etc., cuyo comportamiento estructural puede conocerse estableciendo las condiciones de continuidad entre elementos conectados en los nudos y las condiciones de frontera entre la estructura y sus apoyos.

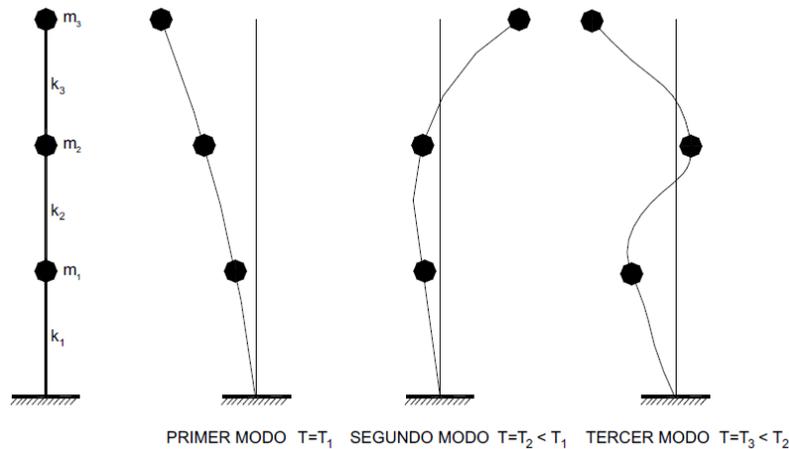
Un grado de libertad de un punto nodal, es cómo se define a la posibilidad que tiene un nudo de moverse independientemente y en cierta dirección. Las condiciones de continuidad entre los elementos de una estructura dependen principalmente del tipo de conexión, logrando nudos en donde no existan deformaciones concentradas que generen movimientos relativos entre los dos elementos que se conectan (nudo rígido) o permitiendo desplazamiento o giro libre (nudo no rígido). En estructuras formadas por marcos los grados de libertad de los puntos nodales están representados por giros o desplazamientos del nudo. Desde el punto de vista dinámico los grados de libertad que interesan son los que generan fuerzas de inercia significativas, o sea fuerzas iguales a su masa por aceleración.

La mayoría de las estructuras no pueden ser idealizadas como un sistema de un grado de libertad, por lo que es necesario considerar un sistema compuesto por una serie de masas concentradas unidas por resortes, representando un sistema de múltiples grados de libertad. En la práctica, para el caso de los edificios se considera que las masas están concentradas en cada nivel, los resortes son representados por la rigidez lateral de cada entrepiso y las fuerzas de inercia importantes son sólo las laterales.

En edificios es aceptable suponer que los pisos son diafragmas rígidos en su plano, lo que permite expresar el movimiento lateral de cualquier punto del piso en función de tres grados de libertad, dos desplazamientos horizontales y un giro alrededor de su eje vertical. Eso permite efectuar el análisis de un edificio con modelos que tienen tres grados de libertad por piso (Espejel, 2013).

En la figura 4-1 se muestran los modos de vibración para un sistema de tres grados de libertad. El primer modo, que corresponde al modo fundamental de vibración, se caracteriza por no mostrar puntos de inflexión y por tener la frecuencia más baja; al pasar a los modos superiores, la configuración presenta un nuevo punto de inflexión por cada modo y el período natural disminuye.

Figura 4-1 Modos de vibración de un sistema de tres grados de libertad



Fuente: Espejel (2013)

4.1.2. Ductilidad

Es la propiedad de la materia que permite su deformación sin alcanzar el rompimiento o el colapso. En el caso de estructuras, se emplea como un mecanismo para disipar energía, permitiendo convertir la energía cinética de entrada debido a un sismo por medio de la deformación de los elementos estructurales, para evitar el colapso de una edificación cuando se excede la capacidad estimada de carga lateral o gravitacional.

En las consideraciones de diseño convencionales, se reducen las cargas sísmicas según la ductilidad de una estructura. Esto permite, que aunque las cargas laterales reales excedan las cargas usadas en el diseño, la ductilidad proporcione el mecanismo último de disipación de energía, sin embargo esto puede generar daños significativos en los elementos, o incluso irreparables.

4.2. Análisis Modal Espectral

Es un procedimiento ventajoso para estimar los desplazamientos y fuerzas en los elementos de un sistema estructural, porque implica el cálculo de los valores máximos de desplazamientos y las aceleraciones en cada modo de vibración usando un espectro de diseño. El mismo representa el promedio o la envolvente de espectros de respuesta para diversos sismos, siempre con algunas consideraciones adicionales expuestas en los códigos de diseño. El objetivo del análisis modal espectral es determinar los modos naturales de vibración de la estructura modelada en 3 dimensiones y lo respectivos períodos de vibración. Este método requiere para su aplicación conocer los modos (Φ_i) y frecuencias naturales (ω_i) del sistema de múltiples grados de libertad.

La aplicación del método modal espectral considera un espectro elástico de pseudo aceleraciones de diseño arbitrario, que se especifica para diferentes niveles de intensidad sísmica. En el caso de Guatemala se consideran tres niveles:

- *Sismo básico*: que tiene un 10% de probabilidad de ser excedido en un período de 50 años.
- *Sismo severo*: que tiene un 5% de probabilidad de ser excedido en un período de 50 años.
- *Sismo extremo*: que tiene una probabilidad del 2% de ser excedido en un período de 50 años.

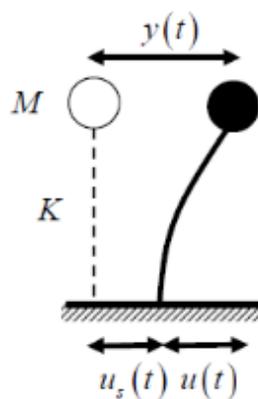
En el caso de la normativa chilena, por ejemplo, (Sáez, 2014) se definen dos tipos de sismo. El primero, es el denominado sismo de diseño (SDI), que representa un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, se entiende que los desplazamientos y fuerzas obtenidas para este nivel de riesgo se utilizan en el diseño de la estructura sismorresistente. El segundo, corresponde al sismo máximo posible (SMP), que representa un 10% de probabilidad de excedencia en 100 años, dicho nivel de riesgo define las variables de diseño del sistema disipador.

4.2.1. Espectro de respuesta sísmico

Es un gráfico de la respuesta máxima de un oscilador simple con frecuencia natural de vibración (f) sujeta a una excitación vibratoria dada. Para obtener el espectro se consideran una serie de estructuras de un grado de libertad con diferentes periodos de vibración, y con igual amortiguamiento; al someterlos a la acción del mismo terremoto cada uno representará una respuesta diferente, la cual se representa a través de la historia de desplazamientos, graficando el máximo valor en función del período de vibración.

A partir del espectro de desplazamientos, es posible calcular mediante derivación, los espectros de Velocidades y de Aceleraciones, denominados como pseudo-espectros, debido a que se obtienen de forma aproximada. El espectro de pseudo-velocidades se obtiene de multiplicar cada ordenada del espectro de desplazamiento por la frecuencia del sistema (w); mientras que el de pseudo-aceleraciones resulta de la multiplicación por el cuadrado de la frecuencia (w^2). El espectro depende fundamentalmente de la aceleración de la vibración a la que se somete la base de la estructura y al período de oscilación de la estructura.

Figura 4-2 Oscilador simple sujeto a movimiento de apoyo



Fuente: Prato, Ceballos y Pinto (2013)

En la práctica se emplea un espectro de respuesta elástico, donde se representan los parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. El espectro de respuesta lineal elástico asume un comportamiento estructural lineal de fuerza desplazamiento. Sin embargo, pocas estructuras pueden responder elásticamente ante un movimiento fuerte, y el espectro lineal-elástico es una idealización.

4.3. Normativa Guatemalteca - AGIES

La normativa relacionada al diseño de estructuras empleada en Guatemala, es el conjunto de '*Normas de Seguridad Estructural de Edificaciones y Obras de Infraestructura para la República de Guatemala*' presentadas por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, cuya última edición corresponde a 2010. En adelante, en este documento serán citadas como AGIES NSE. Estas normas son un requisito legal adoptado por el Ministerio de Comunicaciones, Infraestructuras y Vivienda, dictado según el Acuerdo Ministerial 1686-2007, por medio de la CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres).

Esta normativa se basa en otras normas de carácter internacional, y contempla todos los requisitos para el análisis y diseño estructural, tomando en cuenta consideraciones para el territorio nacional; y citando criterios empleados por ACI, AISC y AASHTO, entre otras, en aquellos aspectos que aún no han sido definidos por una norma nacional específica.

Los dos métodos de análisis que contempla el código, y especifica los procedimientos a seguir y las consideraciones que hay que tomar en cuenta son:

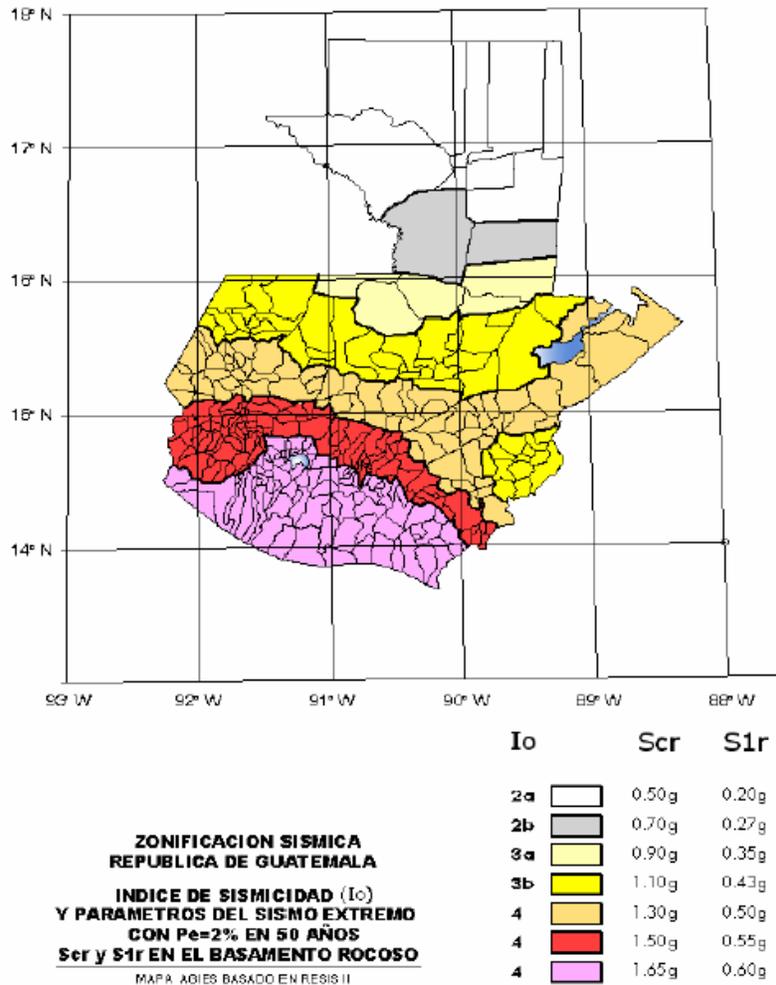
- Método de la carga sísmica estática equivalente.
- Método de análisis modal espectral.

4.3.1. Zonificación y características sísmicas

Para la zonificación sísmica de Guatemala, se realizó un sectorización por cuatro puntos conocidos como zonas, cada una depende del tipo de sitio y niveles de protección establecida en las normas guatemaltecas AGIES.

El mapa de la figura 4-3, refleja las dos zonas sismológicas más importantes en Guatemala, la falla del Motagua Polochic, y la zona de subducción ubicada en la costa sur, con colores morado y rojo respectivamente.

Figura 4-3 Zonificación sísmica para la República de Guatemala



Fuente: AGIES NSE 2 (2010)

4.3.2. Parámetros para modelar la respuesta sísmica

Las solicitaciones sísmicas para diseñar los elementos de las estructuras y limitar las derivas se calculan en base a factores y coeficientes empíricos definidos en el código AGIES NSE3.

a. Factor de reducción de respuesta sísmica (R)

El factor genérico de Reducción de Respuesta Sísmica (R) permite reducir las cargas sísmicas con las cuales se diseña una estructura, según su capacidad de deformarse sin alcanzar el rango plástico, y depende de las características de la tipología estructural seleccionada. Se emplea para la reducción de la intensidad de las cargas elásticas usadas para el diseño de una estructura. En otras palabras representa que tan dúctil es el sistema estructural utilizado.

b. Factor de sobre-resistencia (Ω_r)

Se usa para incrementar la resistencia elástica de ciertos componentes críticos de una estructura, en caso tenga alguna irregularidad tanto en planta como en elevación (definidas en la sección 1.8.3.2 y 1.8.3.3 de AGIES NSE 3).

c. Factor de redundancia (ρ)

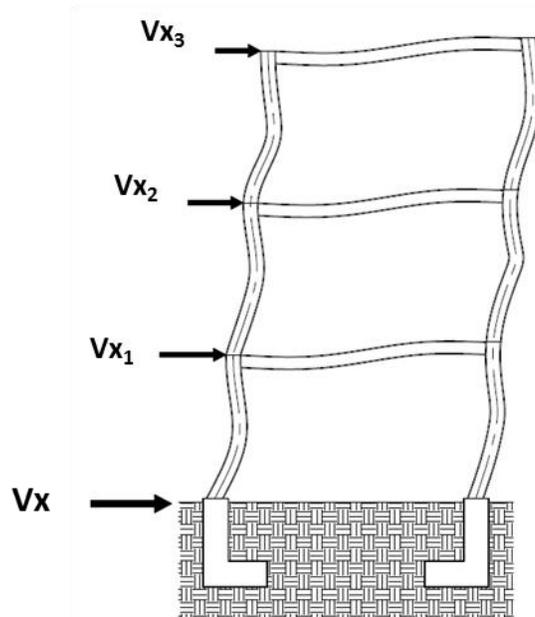
La redundancia estructural aumenta conforme existe una mayor cantidad de elementos diseñados para resistir la acción sísmica. Se relaciona con la capacidad de la estructura para incursionar en el rango no lineal sin perder la estabilidad. Este factor considerado en la normativa, castiga la carencia de redundancia estructural o la presencia de irregularidades en la edificación, mediante la magnificación de las cargas por sismo.

4.4. Método de la carga sísmica equivalente

Este método consiste en modelar las solicitaciones por sismo como fuerzas estáticas horizontales (y también verticales) aplicadas de forma externa a lo largo y alto de la edificación. La cuantificación de la fuerza equivalente es semi-empírica; y está basada en un espectro de diseño sísmico establecido, para el caso de Guatemala, en el capítulo 4 de AGIES NSE2, donde se definen la masa efectiva de la edificación, las propiedades elásticas de la estructura y el cálculo empírico del período fundamental de vibración de la edificación.

Este método puede usarse para el diseño de estructuras, pero es necesario cumplir algunos requisitos impuestos por norma para que el análisis sea representativo de la misma, como por ejemplo regularidad en planta y en elevación. Además, según lo describe el código AGIES, es un instrumento de calibración; por que sus principales resultados se utilizan como valores de comparación al aplicar cualquier otro método de cuantificación de las solicitaciones sísmicas.

Figura 4-4 Ejemplificación del método estático



Fuente: Elaboración propia (2015)

4.4.1. Cortante basal al límite de cedencia

Este valor representa al total de las fuerzas sísmicas equivalentes que actúan sobre una edificación en cada dirección de análisis en la base de la estructura, de forma simplificada se describe como *Cortante Basal Estático a Cedencia* (V_B).

Para su cálculo se emplea el coeficiente sísmico obtenido a partir del período empírico de la estructura, como se describe a continuación:

$$V_B = C_s W_s \quad (7)$$

Donde:

W_s Es el peso sísmico efectivo de la estructura, que incluye la carga muerta total de la edificación y el 25% de la carga viva que no califique como reducible.

C_s Es el coeficiente sísmico de diseño.

a. Coeficiente sísmico al límite de cedencia C_s

El coeficiente sísmico (C_s) en cada dirección de análisis se establece según la sección 2.1.2 de AGIES NSE 3.

$$C_s = \frac{S_a(T)}{R} \quad (8)$$

Donde:

$S_a(T)$ Es la demanda sísmica de diseño para una estructura con un período T , obtenido del espectro de diseño sísmico establecido para el sitio en la sección 4.3.4 de la norma NSE 2; y calibrado según la probabilidad de ocurrencia.

R Es el factor de reducción por ductilidad

b. Valores mínimos de Cs

El valor de Cs debe cumplir los mínimos establecidos por la norma AGIES NSE.

$$C_s \geq 0.044S_{cd} \quad (9)$$

$$C_s \geq \frac{0.5S_{1r}}{R} \quad (10)$$

c. Período de vibración empírico Ta

El período fundamental de vibración de una edificación se define según la sección 2.1.4 de la norma NSE3, el cual genera un valor en forma empírica y genérica.

$$T_a = K_T(h_n)^x \quad (11)$$

Donde:

h_n Es la altura del edificio desde la base, dada en metros.

Según el sistema estructural se definen K_T y x . Los cuales dependen de la flexibilidad de la estructura, y del daño aceptable para la estructura secundaria.

d. Selección del período T para usar en el diseño estructural

Los periodos T que se utilizarán con el método estático equivalente en cada dirección de análisis se define según la sección 2.1.6 de la norma NSE 3.

- Directamente los períodos empíricos T_a de la edificación
- Los períodos analíticos T_F según lo anterior, limitado conforme a la ecuación:

$$T = T_F \leq 1.4 * T_a \quad (12)$$

4.4.2. Espectro genérico de diseño de AGIES NSE

El espectro de respuesta aplicable para Guatemala se construye siguiendo los pasos del capítulo 4 de la norma AGIES NSE 2 – Demandas estructurales. Este depende de las características del suelo y de la excitación; como también de las características dinámicas de la estructura y del tipo de suelo sobre el cual se asiente. El espectro definido según esta normativa es para un 5% de amortiguamiento.

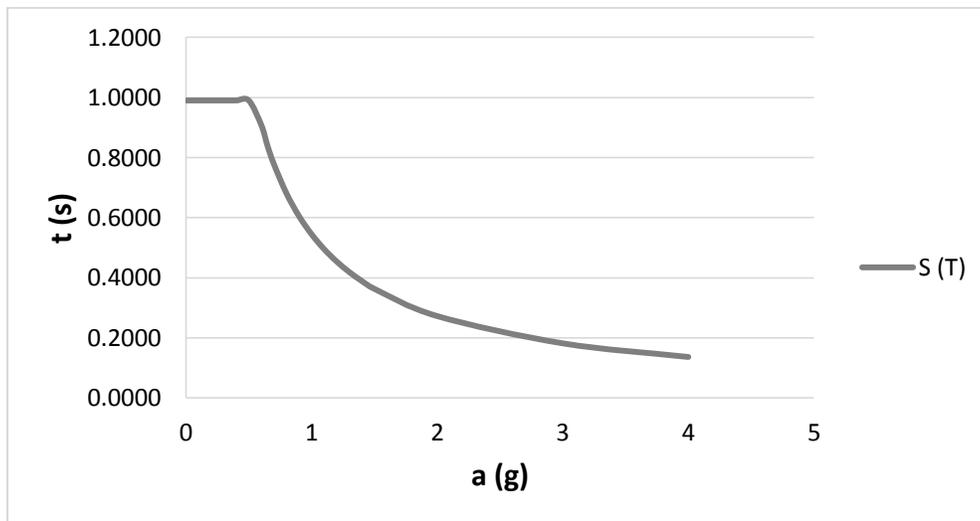
Las aceleraciones espectrales de diseño están condicionadas por las ecuaciones establecidas en AGIES NSE-2:

$$Sa(T) = Scd \quad si \ T \leq Ts \quad (13)$$

$$Sa(T) = \frac{S1d}{T} \quad si \ T > Ts \quad (14)$$

El procedimiento para la construcción del espectro de diseño se explica a detalle en el anexo 10.2.

Imagen 4-1 Espectro de Respuesta de AGIES



Fuente: AGIES NSE-2 (2010)

4.5. Calibración del análisis modal

Los cortantes basales en la estructura, correspondientes a cada modo de la iteración inicial V_{1X} y V_{1Y} , son valores preliminares, y no deben usarse para el diseño sin antes calibrarlos. La norma NSE emplea los cortantes estáticos V_{EX} y V_{EY} , calculados según la sección 2.1.1 de AGIESNSE3.

En la sección 3.3.6 de NSE 3 se define que los cortantes basales de diseño cumplirán:

$$V_{DX} = \max (0.85 V_{EX}, V_{1X}) \quad (15)$$

$$V_{DY} = \max (0.85 V_{EY}, V_{1Y}) \quad (16)$$

Para calibrar los resultados de análisis modal, es necesario multiplicarlos por los factores que se obtienen entre la relación, V_{DX}/V_{1X} y V_{DY}/V_{1Y} , según corresponda, y se utiliza para integrar las solicitaciones sísmicas de diseño.

4.6. Derivas últimas máximas tolerables

La norma AGIES NSE 3, en la sección 4.3.3, define la deriva como la diferencia del desplazamiento horizontal del centro de masa del nivel 'k' respecto del centro de masa del nivel 'k-1'. En otras palabras es un desplazamiento relativo entre niveles, obtenido de la diferencia de distancia desplazada entre un nivel y su inmediato superior o inferior, y la altura de piso. Las derivas últimas que el código permite, están especificadas en la tabla 4-1; donde ' h_p ' se refiere a la altura del piso.

Tabla 4-1 Derivas últimas máximas tolerables

Estructura	Clasificación de obra		
	ordinaria	importante	esencial
Edificaciones de mampostería reforzada hasta 4 niveles	0.007 h_p	0.007 h_p	0.007 h_p
Edificaciones hasta la altura permitida sin ascensor	0.025 h_p	0.025 h_p	0.020 h_p
Edificaciones en general	0.020h_p	0.020h_p	0.015h_p
h_p es la altura del piso para el que se calcula la deriva.			

Fuente: AGIES NSE-3 (2010)

4.6.1. Valores máximos de deriva de piso

Según la norma AGIES NSE debe iterarse el proceso de análisis hasta lograr que la deriva de piso sea:

$$\Delta_{cp} \geq \Delta_u / C_d \quad (17)$$

Donde:

Δ_{cp} Es la deriva de piso

El factor C_d depende de la tipología estructural; y esta condición debe cumplirse para todos los pisos. El código amplía más la definición de Δ_c , como la deriva medida entre centros de masa superior e inferior del piso. Por simplicidad se permite calcular la deriva de piso como el promedio de las derivas extremas en la dirección de análisis.

4.7. Análisis de estructuras con disipadores de energía

El análisis y diseño de estructuras con sistemas pasivos de disipación de energía representa un reto de mayor dificultad que el de estructuras convencionales. Sin embargo, en las últimas décadas se han realizado grandes esfuerzos para establecer metodologías que permitan llevar a cabo el proceso de forma simple pero a la vez confiable. A pesar de que teóricamente los sistemas de protección mediante disipadores pasivos son una gran ventaja, se tiene una escasa evidencia de su comportamiento durante sismos, lo cual representa una limitación del sistema de disipación, pero sobre todo del procedimiento de análisis y diseño empleado en la edificación. Por el contrario, el comportamiento de las estructuras convencionales ha sido observado en numerosas ocasiones debido a terremotos de gran magnitud, y las consideraciones y normas que son aplicadas han sido puestas a prueba y, modificadas de forma sistemática después de cada evento sísmico donde se haya obtenido información nueva y relevante al respecto.

Todo esto conlleva a tomar en cuenta consideraciones conservadoras en el análisis de estructuras con disipadores, respecto al análisis de estructuras convencionales. Además entre estas consideraciones, es importante tomar en cuenta que la estructura no debería tener los dispositivos disipadores de energía como único sistema sismorresistente; sino además un sistema independiente que transmita las cargas externas a la cimentación de manera que una eventual falla del sistema de control de vibración no comprometa la estabilidad global de la edificación sin posibilidad alguna de resistir las fuerzas inducidas por el sismo.

Las estructuras con sistemas pasivos de disipación de energía pueden diseñarse usando un procedimiento lineal, uno no lineal, o una combinación de ambos. Los más utilizados son el procedimiento de análisis modal espectral y el procedimiento de análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo, de forma simplificada denominado análisis tiempo-historia. El primero corresponde a un método lineal simplificado, en el cual se reduce la respuesta de cada modo de vibración por un factor debido al aumento del amortiguamiento.

4.8. Método de la diagonal equivalente

Cuando los disipadores se montan en arreglos chevron, la manera más fácil de analizar las edificaciones que los implementan, es modelando el sistema contraventeo-disipador en el intervalo de comportamiento elástico, por medio de elementos diagonales equivalentes, donde la rigidez axial de cada una de las diagonales equivalentes es función de la geometría del sistema y de las rigideces relativas de los dispositivos de disipación y de los contraventeos empleados, considerando que el sistema contraviento-disipador funciona esencialmente como un sistema de resortes en serie en el intervalo de comportamiento elástico.

Los dispositivos trabajarán en el mismo sentido lateral que la estructura, pero en una dirección oblicua con respecto al eje longitudinal de las diagonales que forman parte del contraviento chevron. La rigidez axial de cada diagonal equivalente (K_{eq}) con respecto a su eje longitudinal principal estaría dada por la expresión:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{2 \cos^2 \theta}{K_{DDE}} \quad (18)$$

Donde:

K_{eq} Rigidez equivalente diagonal-disipador

K_{diag} Rigidez de las diagonales

K_{DDE} Rigidez del disipador

ϑ Angulo de inclinación de las diagonales, medido respecto a la horizontal.

Esta expresión aplica únicamente en el caso en que el contraventeo cuente con diagonales de igual longitud y ángulo de inclinación respecto al eje horizontal. El cual es un caso muy común, pero no necesariamente el único.

A pesar de que este método fue muy utilizado en los inicios del estudio de los disipadores de energía, no es un método que esté basado en fundamentos sólidos de análisis no lineal de estructuras o de plasticidad concentrada, porque no toma en cuenta los criterios de las relaciones esfuerzo-deformación de los dispositivos antes y después de la fluencia del metal. Además no permite analizar por separado el comportamiento de las diagonales y el del disipador. Sin embargo, también posee la ventaja de considerar que tanto la estructura como los disipadores trabajan en el rango lineal elástico, lo cual puede simplificar el método de análisis.

4.9. Análisis lineal dinámico para edificios con disipadores

La metodología de análisis *Modal Espectral* empleado para estructuras con disipadores es similar al usado para estructuras convencionales; exceptuando, que permite reducir el cortante basal en función del amortiguamiento que adhiere el disipador. Aplica básicamente para estructuras que son regulares, tanto en planta como en elevación. El factor que permite reducir la respuesta toma en cuenta el incremento del amortiguamiento modal a causa de los disipadores de energía. Sin embargo esta reducción está limitada según los diferentes reglamentos; por ejemplo

el código ASCE 7-10, limita el cortante al 75% del valor al que estaría sometida la estructura sin disipadores. Esto establece una filosofía de diseño similar a la de edificios convencionales, haciendo competir el uso de disipadores de energía con el diseño sismorresistente convencional, debido a la falta de consenso acerca del comportamiento de un edificio con disipadores durante un evento sísmico real (Sáez, 2014).

Este método, consiste en realizar un análisis lineal modal espectral de la estructura con los disipadores, pero considerando propiedades lineales equivalentes del disipador; es decir, se reemplaza el comportamiento histerético de los disipadores por una rigidez y amortiguamiento efectivo equivalente. Una de las dificultades de la metodología es precisamente la transformación del comportamiento histerético de los disipadores (no lineal) a un modelo lineal equivalente, ya que se pierde precisión, y el análisis no logra representar la disipación de la energía mediante la plastificación, en el caso de los disipadores ADAS, en los cuales se enfoca esta investigación. Además no permite evaluar por separado el comportamiento de la estructura y de los disipadores.

En el caso de realizar el análisis mediante un programa como ETABS, este permite definir disipadores con propiedades lineales, y asignarlos a los contraventeos. El programa de computadora convierte automáticamente el amortiguamiento concentrado en los disipadores en un amortiguamiento modal. El amortiguamiento es posteriormente sumado al amortiguamiento intrínseco de la estructura, el que generalmente se considera como 5% para todos los análisis. Este es un método relativamente simple; sin embargo, la forma de representarlo correctamente sigue siendo un problema abierto de la ingeniería estructural y los softwares comerciales disponibles no permiten utilizar ninguno de los procedimientos propuestos hoy en día por la literatura especializada. Otra eventual limitante al uso de este procedimiento en un programa, es que los disipadores en análisis deben ajustarse al comportamiento de los tipos de disipadores pre definidos en esta clase de software para análisis lineales.

Por otro lado, no existe en la literatura un consenso acerca del cálculo de las propiedades lineales de los disipadores, lo cual se traduce en una falta de precisión al intentar establecer datos lineales equivalente del disipador. Para obtener un mejor acercamiento a las propiedades lineales, es necesario realizar pruebas de laboratorio en dispositivos, y a partir de los resultados establecer un amortiguamiento y rigidez efectivas. Sin embargo debido a los propósitos teóricos de esta investigación, no se tomará en cuenta el análisis lineal y se usará otro tipo de análisis que permita evaluar cómo se modifica el comportamiento de una estructura con disipadores.

4.9.1. Incremento en el amortiguamiento

Estructuras con disipadores poseen un amortiguamiento modal mayor al de aquellos asociados a estructuras convencionales. Esto es particularmente cierto en los modos de vibración superiores, donde los ratios de amortiguamiento pueden alcanzar valores cercanos o incluso exceder sus valores críticos. El efecto de la adición de disipadores a una estructura no es solamente un incremento en el amortiguamiento, también es una redistribución de los amortiguamientos modales.

“Las propiedades físicas esenciales de cualquier sistema elástico lineal, sometido a una fuente externa de excitación o carga dinámica son su masa, flexibilidad o rigidez como propiedades elásticas y el amortiguamiento o mecanismo de pérdida de energía” (Espejel, página 09, 2013). La respuesta de una estructura ante una carga dinámica es el resultado de esfuerzos y deformaciones que varían con el tiempo y por lo general, la respuesta estructural de cualquier carga dinámica se expresa en términos de los desplazamientos de la estructura.

Además del amortiguamiento, la ductilidad de la estructura en la dirección de análisis se incrementa debido a la implementación de los disipadores, por lo que se justificaría el uso de un factor de comportamiento sísmico mayor, diseñando la estructura con fuerzas laterales reducidas, como beneficio del incremento de la ductilidad global. Aunque es cierto que el amortiguamiento equivalente se

incrementa, no se debe olvidar que este incremento está ligado a la histéresis de los elementos disipadores, por lo que no resulta válido reducir simultáneamente el espectro de diseño por concepto de amortiguamiento y por concepto de ductilidad. (Tena, 1998).

4.10. Análisis Tiempo-Historia

Es un tipo de análisis que permite calcular la respuesta en el tiempo de una estructura a lo largo de la duración de un evento sísmico. Es posible obtener la historia de desplazamientos, fuerzas y momentos de cada uno de los elementos estructurales, respecto al tiempo. Esto se logra por medio de un registro sísmico, que puede ser de un evento real, o de un evento sintético recreado. La norma ASCE/SEI 7-10 pide como mínimo 3 acelerogramas, usando para evaluar la estructura, los valores máximos del análisis. Para los diferentes registros sísmicos es necesario determinar el desplazamiento máximo en la estructura, y también la deriva máxima en ambas direcciones.

Este método de análisis no es muy utilizado en Guatemala debido a que no se poseen registros propios, porque las instituciones nacionales correspondientes no tienen el equipo necesario para la toma de datos durante un evento sísmico, y tampoco se cuenta con una base de datos de los sismos más importantes en la historia nacional. Esto representa la tarea de tomar registros de otros países, con características similares al territorio nacional; y adaptarlos, lo cual implica dificultades para llegar a un consenso acerca de la precisión de los resultados obtenidos y de los acelerogramas a usar.

Tiene la ventaja de generar una gran cantidad de resultados de importancia a través del tiempo que dura el evento sísmico; y además genera información importante para entender la influencia de los dispositivos disipadores de energía en la estructura, ya que es posible obtener los desplazamientos de la estructura en el tiempo, y también cuantificar la energía proveniente del sismo que el disipador toma. Existen dos tipos de análisis tiempo historia; lineal y no-lineal.

El análisis tiempo-historia no lineal permite estudiar el comportamiento de la estructura considerando la respuesta no lineal de los disipadores ADAS (no linealidad local). Este análisis considera que la estructura tiene un amortiguamiento del 5% y el amortiguamiento adicional proporcionado por los dispositivos se genera por su trabajo no lineal durante el evento sísmico.

Al realizar un análisis de historia en el tiempo considerando elementos con no linealidad local (el disipador se comportará de forma no lineal, aunque la estructura se considere con un comportamiento lineal), es posible conocer de manera aproximada el comportamiento de la estructura, obteniendo resultados que deben ser consideradas con reserva, en comparación con aquellas que se obtienen de un análisis no lineal riguroso (en el cual se considere la no linealidad de la estructura). Además al emplear un modelo bilineal para modelar el comportamiento de los disipadores, también se subestiman las deformaciones que estos pueden alcanzar. A pesar de estas limitante los resultados obtenidos pueden considerarse confiables, principalmente para aquellas estructuras con configuración regular en planta y elevación, y si además su comportamiento queda gobernado principalmente por las primeras formas modales.

En el código ASCE 7-10, dependiendo de la cantidad de registros sísmicos disponibles para el análisis de respuesta en el tiempo, se aplican diferentes criterios de parámetros a utilizar para diseñar:

- 3 registros de movimiento del terreno, se toma la respuesta máxima del parámetro de interés.
- 7 registros de movimiento del terreno, se toma el valor promedio de cada parámetro.

Además los registros seleccionados deben tener magnitudes, distancias a la falla, fuentes del mecanismo del sismo y tipos de suelo que sean consistentes con aquellos que controlan el sismo de diseño (o sismo máximo posible).

4.10.1. Análisis Tiempo-Historia en ETABS

El programa ETABS permite realizar dos tipos diferentes de análisis tiempo-historia. El primero corresponde al caso de un edificio sometido a una aceleración en su base, mientras que el segundo caso es el de un edificio, con base fija, sometido a un conjunto de cargas que varían en el tiempo, como sucede en el caso de un edificio ante la acción de ráfagas de viento.

a. Función de Tiempo-Historia

El primer paso para realizar el análisis, es definir una función de historia en el tiempo (En el anexo 10.2.3. se detalla el procedimiento para definir la función de tiempo-historia en el software ETABS). Esta función es un conjunto de pares de valores de tiempo y aceleración. Los valores definidos por la función pueden usarse como valores de aceleraciones basales o como factores de multiplicación de los casos de carga estática de fuerza o desplazamiento. El programa ETABS permite identificar la función por medio de un nombre y definirla de alguna de las siguientes maneras:

- Seleccionando un archivo de texto que contenga una función de tiempo historia. Ya sea que el archivo tenga los datos en pares, o solamente por valores de aceleración, espaciados por intervalos de tiempo constante.
- Ingresando manualmente los datos del registro, por medio del teclado cada par de valores $(t, f(t))$.
- Seleccionando una función disponible en el programa, entre las cuales cuenta con seno, coseno, rampa, diente de sierra y triangular.

b. Configuración de un caso de análisis Tiempo-Historia

Para cada análisis que se realizará se debe configurar un caso de análisis tiempo-historia, para el cual se debe indicar un nombre y especificar el amortiguamiento modal, el número y tamaño de intervalos de tiempo de salida, seleccionar una función de tiempo, y eligiendo entre si se representa un acelerograma en la base, o si esta multiplica a los casos de carga estática. .

Los valores de la función pueden ser multiplicados por un factor de escala que es cualquier número real. Este factor puede presentar unidades de longitud/tiempo², si los valores de la función se usan como aceleraciones basales, o ser adimensionales, si los valores de la función se usan como multiplicadores.

El programa tiene la capacidad de calcular la respuesta en el tiempo del edificio, y permite visualizar de manera gráfica la historia de:

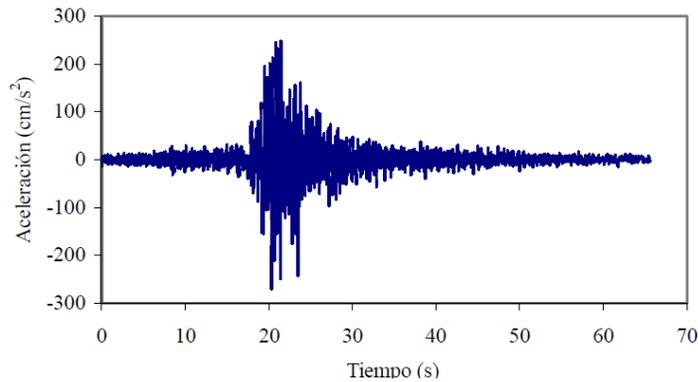
- Energía cinética y potencial, disipada por el amortiguamiento.
- Momentos y cortantes en la base del edificio.
- Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, reacciones y fuerzas de resorte para los puntos en la estructura.

4.10.2. Acelerograma

Es un registro de aceleración en función del tiempo generado por un acelerógrafo, el cual registra los movimientos fuertes del sismo. Los acelerogramas dan una descripción del movimiento del terreno de forma cuantitativa, mediante datos de aceleración del suelo respecto a un tiempo, lo cual es de gran utilidad para el análisis de estructuras.

Los acelerógrafos registran tres componentes perpendiculares dos horizontales y una componente vertical, que es como son representados los movimientos del suelo, y también es como se trabaja en la práctica de la ingeniería.

Figura 4-5 Acelerograma



Fuente: Villarreal y Oviedo (2008)

Las características del movimiento del suelo en cualquier sitio, son influenciadas por factores como:

- Fuente de la vibración.
- Mecanismo de ruptura de la falla que origina el sismo.
- Distancia del sitio a la fuente de liberación de energía.
- Amplificación del suelo.
- Características geológicas de las rocas en todo el medio de transmisión de las ondas hacia el sitio analizado.
- Condiciones locales del suelo en el sitio analizado.

a. Velocidad Pico del suelo (PGV)

Por sus siglas en inglés se resume como PGV (Peak Ground Velocity), y es la máxima velocidad que se presenta en el evento sísmico. En ciertas circunstancias puede considerarse que la velocidad pico caracteriza la amplitud el movimiento del suelo de una manera más precisa que la aceleración horizontal. La velocidad pico no se registra directamente, sino que se obtiene de la integración de las ordenadas del acelegrograma y es un parámetro importante para la ingeniería sísmica.

b. Aceleración pico del suelo (PGA)

Se abrevia, por sus siglas en inglés como PGA (Peak Ground Acceleration), representa la aceleración horizontal y es la medida más común utilizada para caracterizar un movimiento particular del suelo. La aceleración pico del suelo es simplemente el valor absoluto más alto de las aceleraciones horizontales del acelograma. Si se toma la suma vectorial de las dos direcciones ortogonales (la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados) se puede obtener la aceleración pico máxima representativa del sismo.

c. Adecuación en base al PGA

Para la adecuación de los registros debe tomarse un valor de referencia de PGA aplicable a un territorio específico, y obtener un factor de escala que se aplicará al registro para adecuarlo a un sitio específico.

Para calcular el factor de escala que permite adecuar los acelogramas se emplea la siguiente ecuación:

$$FA = \frac{PGA_a}{PGA_0} \quad (19)$$

Donde:

FA Factor a aplicar al acelograma para adecuarlo en base al PGA.

PGA_a PGA a adecuar

PGA₀ PGA del registro original

Según la sección 4.3.3.3 de AGIES NSE 2 (2010), la aceleración máxima del suelo (MSA) es la equivalente a la aceleración pico (PGA) mencionada anteriormente. Y en los casos en que deba estimarse la aceleración máxima del suelo del sismo de diseño se tomara $AMS_d = 0.4 * S_{cd}$. En el caso de este estudio los registros serán adecuados según la aceleración máxima del suelo.

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

5.1. Planteamiento del Problema

Todo lo descrito en los capítulos anteriores se aplicará a un edificio hipotético ubicado en la ciudad de Guatemala, de 8 niveles, con dimensiones en planta de 18 metros por 18 metros, y una altura de piso de 3.5 metros. La tipología general de la estructura será de marcos de acero con riostras concéntricas, las cuales irán colocadas en el tramo central de los marcos perimetrales, y tendrán forma de V invertida. En las figuras 5-1 y 5-2, se muestra la distribución geométrica del edificio de ejemplo.

El material de los elementos estructurales del edificio (Vigas, columnas y riostras) se planteó de Acero A36, ya que es un material muy utilizado en Guatemala, y sus características se muestran en la Tabla 5-1. Las losas fueron planteadas como un sistema unidireccional de losacero (Metal Deck). En la tabla de 5-2, se resume las características de la edificación, cuyo uso será de oficinas. Debido a que el ejemplo es un ejercicio académico, las cargas gravitacionales se seleccionaron como un parámetro de referencia en base a lo indicado en AGIES, sin embargo estas pueden variar según los requerimientos de la estructura en un caso real.

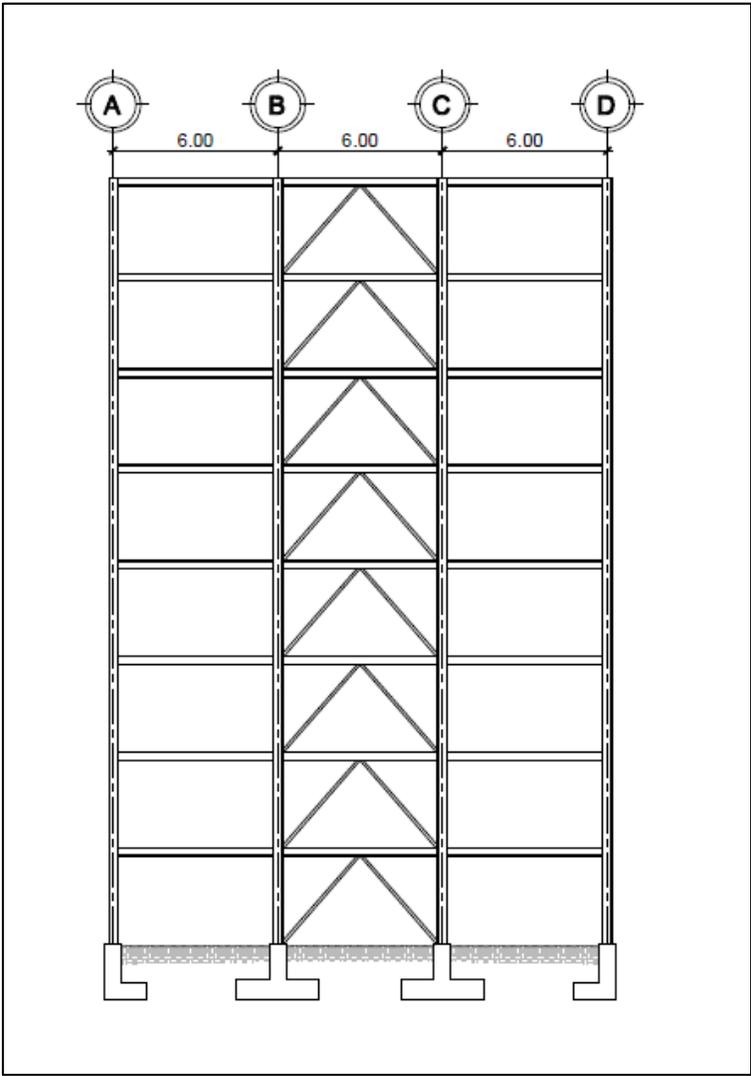
Tabla 5-1 Propiedades Acero A36

Material	Acero ASTM A36
Módulo de Elasticidad	200 GPa (29,000ksi)
Límite de Fluencia	250 MPa (36ksi)
Límite de rotura	410 MPa (58ksi)
Densidad	7,850 kg/m ³ (0.28lb/in ³)
Módulo de Poisson	0.3

Fuente: Elaboración propia (2015)

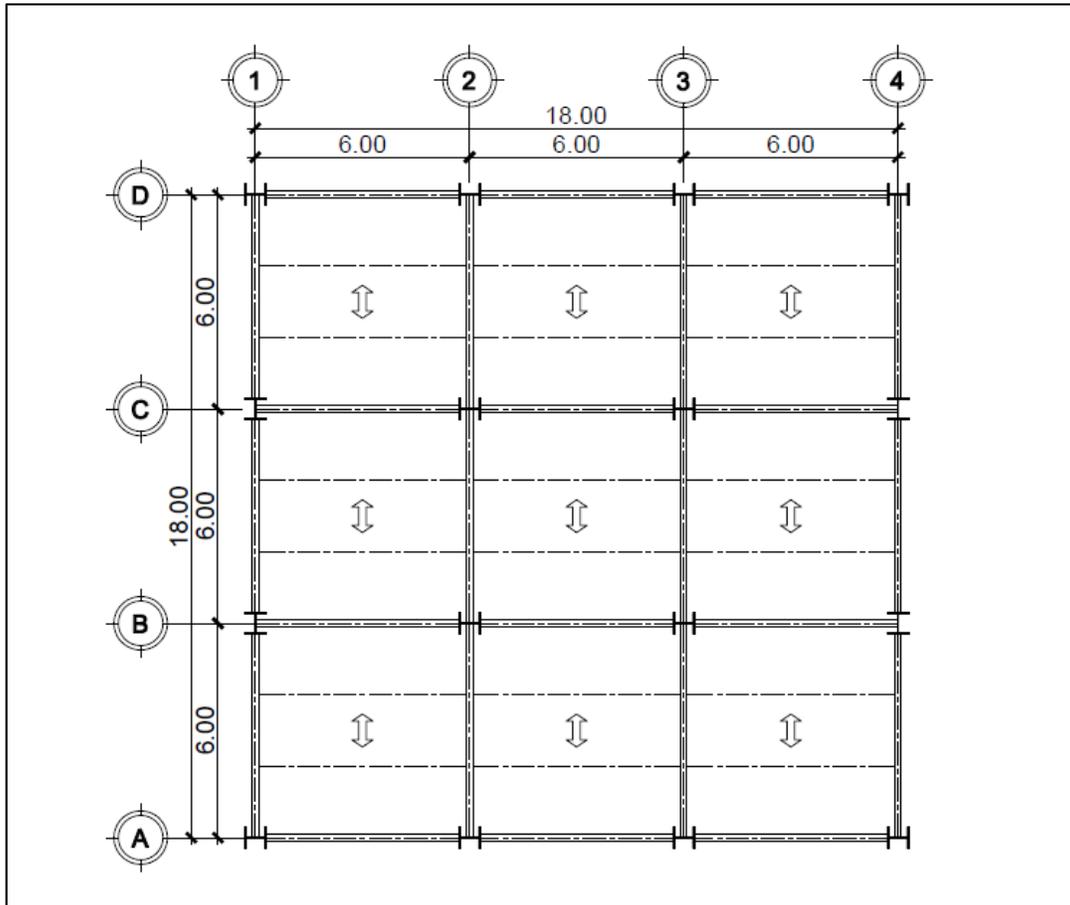
El uso de la estructura será para oficinas, y su categoría de importancia III como 'importante', debido al área de la edificación y la cantidad de personas que pueden habitarla.

Figura 5-1 Vista en elevación del edificio



Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 5-2 Vista en planta del edificio



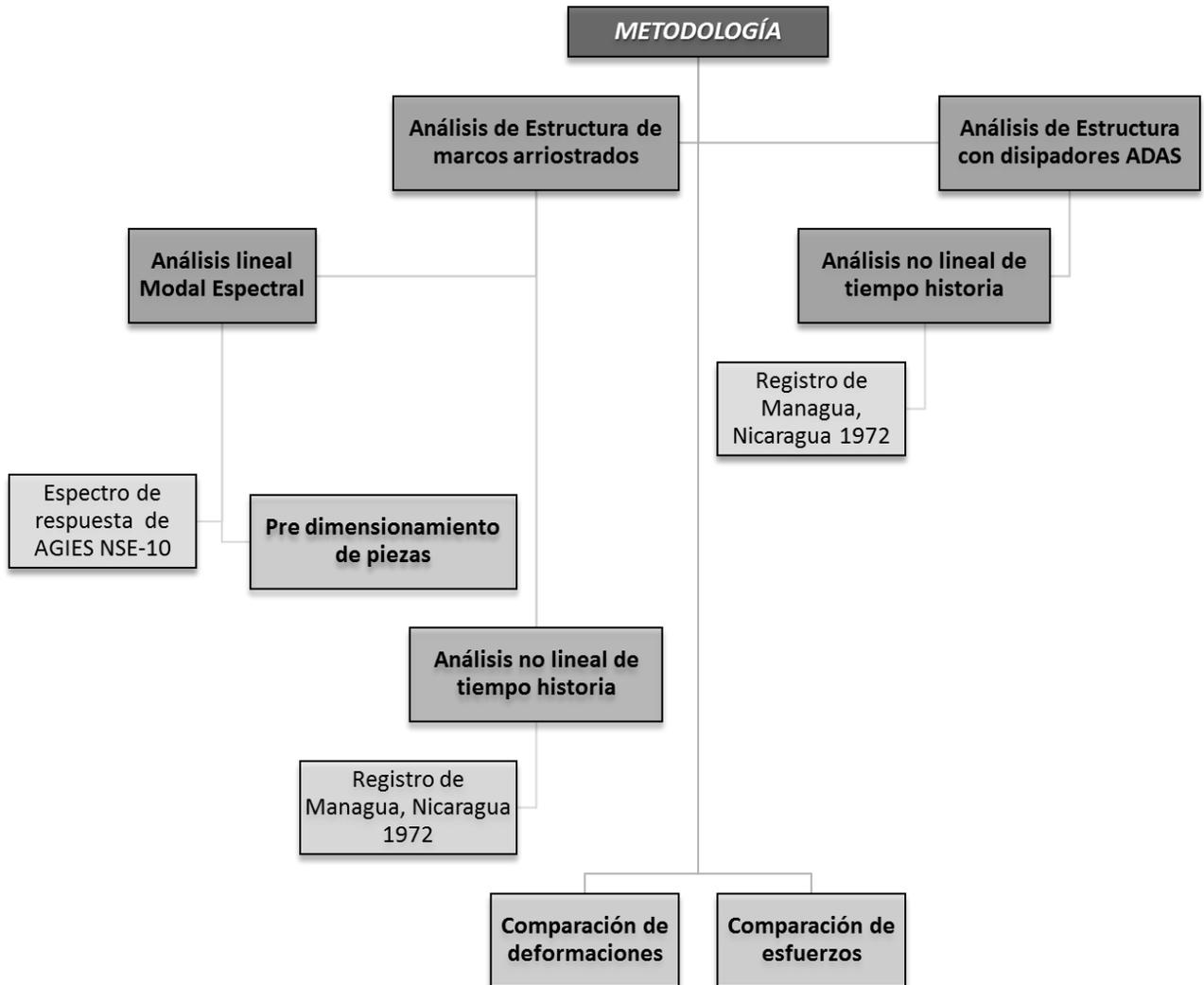
Fuente: Elaboración propia (2015)

Tabla 5-2 Características del edificio

Tipología Estructural	<i>Marcos de acero con riostras concéntricas</i>
Ubicación	<i>Ciudad de Guatemala</i>
Dimensiones en planta	<i>18m x 18m</i>
Altura	<i>28m</i>
Uso	<i>Oficinas</i>
Sobrecarga muerta	<i>150 kg/m²</i>
Carga viva según el uso	<i>250 kg/m²</i>
Clasificación de obra	<i>Categoría III Importante</i>

Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 5-3 Diagrama de Metodología empleada



Fuente: Elaboración propia (2015)

5.2. Análisis Modal Espectral

El primer paso para realizar el ejemplo de aplicación fue el análisis estructural de la edificación sin disipadores. Para lo cual se usó el método modal espectral, y se construyó un espectro genérico de respuesta aplicable para la ciudad de Guatemala. Este análisis permitió determinar los tamaños de los elementos estructurales, y el chequeo de las derivas permitidas; obteniendo el

predimensionamiento de una edificación completa a la cual fue posible realizar otros análisis. Para el análisis se realizó un modelo en tres dimensiones de la estructura en el programa ETABS 9.7.4.

5.2.1. Construcción del espectro de diseño según AGIES NSE2-2010

Para realizar el análisis modal espectral se construyó el espectro de respuesta aplicable para el análisis lineal de la estructura, ubicada en la ciudad de Guatemala. El procedimiento seguido para la construcción del espectro está descrita paso a paso en el anexo 10.1. En la tabla 5-3 se presentan los datos usados para la estructura de ejemplo.

Tabla 5-3 Coeficientes y factores para diseño de sistemas sismorresistentes

	SISTEMA ESTRUCTURAL (sección 1.5)	Sistema Constructivo Secc. 1.5.8	R	Ω_r	C_d	Límite de altura en metros			
						Nivel de protección			
						B	C	D	E
E3	SISTEMA GENERAL Marcos de acero arriostrado Tipo A con riostras concéntricas	NSE 7.5	6	2	5	SL	50	30	20

Fuente: AGIES NSE 3 (2010)

Tabla 5-4 Datos usados para la construcción del Espectro de Respuesta

Datos		
Departamento	Guatemala	
Municipio	Guatemala	
ORDENADA ESPECTRAL DE PERIODO CORTO	Scr =	1.5 g
ORDENADA ESPECTRAL CON PERIODO DE 1 SEGUNDO	S1r =	0.55 g
INDICE DE SISMICIDAD	Io =	4
CLASE DE SITIO	CS =	D
TIPO DE FUENTE SISMICA	FUENTE =	B
DISTANCIA HORIZONTAL CERCANA A LA FUENTE SISMICA	DIST =	≥ 15 Km
TIPO DE SISMO	SISMO =	SEVERO
FACTOR DE ESCALA	Kd =	0.8

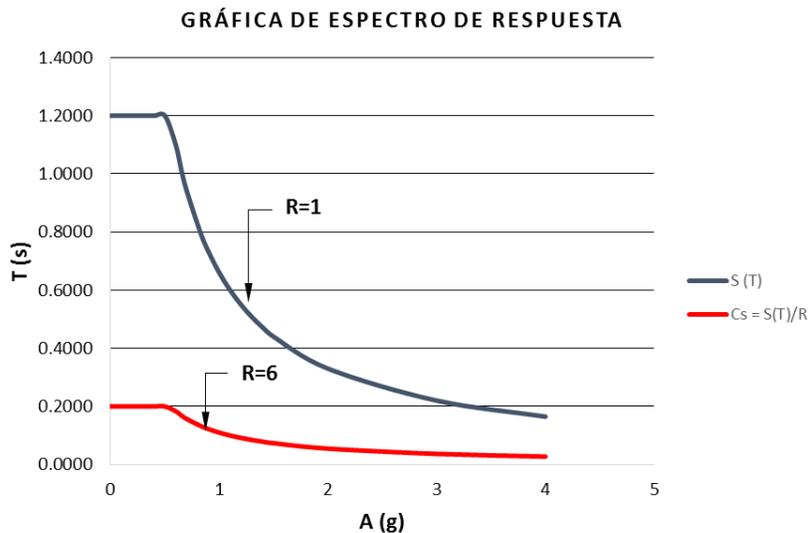
EXPECTRO CALIBRADO AL NIVEL DE DISEÑO REQUERIDO

$S_{cd} = K_d * S_{cs} =$	1.20 g
$S_{1d} = K_d * S_{1s} =$	0.66 g
$S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a =$	1.50 g
$S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v =$	0.83 g

ACELERACIÓN MÁXIMA DEL SUELO	$AMS_d = 0.40 * S_{cd} =$	0.48 g
COMPONENTE VERTICAL DEL SISMO DE DISEÑO	$S_{vd} = 0.15 * S_{cd} =$	0.18 g

Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 5-4 Espectro de Respuesta para la Ciudad de Guatemala



Donde:

C_s Coeficiente sísmico de diseño definido en la sección 2.1.2 de la norma NSE3

$S(T)$ Demanda sísmica de diseño para una estructura con período 'T' obtenida del espectro de diseño sísmico establecido para el sitio en la sección 4.3.4 de la norma NSE2.

Tabla 5-5 Resultados del Espectro de Respuesta

CONSTRUCCIÓN DE ESPECTRO DE RESPUESTA		
T (s)	S (T)	$C_s = S(T)/R$
0	1.2000	0.2000
0.10	1.2000	0.2000
0.20	1.2000	0.2000
0.30	1.2000	0.2000
0.40	1.2000	0.2000
0.50	1.2000	0.2000
0.60	1.1000	0.1833
0.65	1.0154	0.1692
0.70	0.9429	0.1571
0.83	0.7952	0.1325
0.90	0.7333	0.1222
1.00	0.6600	0.1100
1.10	0.6000	0.1000
1.20	0.5500	0.0917
1.30	0.5077	0.0846
1.40	0.4714	0.0786
1.50	0.4400	0.0733
2.00	0.3300	0.0550
3.00	0.2200	0.0367
4.00	0.1650	0.0275

Fuente: Elaboración propia (2010)

5.2.2. Determinación del coeficiente sísmico

Según lo descrito en la sección 4.4 se determinó el coeficiente sísmico de la estructura. El primer paso es determinar el período empírico de la estructura. Para lo cual se define según el sistema estructural los datos de K_T y x , según la sección 2.1.4 de la norma NSE 3.

$$T_a = K_T(h_n)^x = 0.049(28 \text{ m})^{0.75} = 0.59 \text{ seg} \quad (20)$$

Donde:

$$h_n = 28 \text{ m}$$

(e) $K_T = 0.049$, $x = 0.75$ para sistemas estructurales E2, E3, E4 o E5. (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2010)

Posteriormente se chequea el período máximo:

$$T = T_F \leq 1.4 * T_a = 1.4 * 0.59 = 0.83 \text{ seg} \quad (21)$$

En el análisis realizado a la estructura en el programa ETABS, se determinó el período fundamental de la estructura, como $T = 0.96$ seg. Por lo que se usó el período empírico máximo, calculado por medio de la ecuación (21).

Para obtener el valor del coeficiente sísmico se emplean las mismas ecuaciones usadas para construir el espectro de respuesta.

$$S_a(T) = \frac{S1d}{T} = \frac{0.66}{0.83} = 0.795 \quad (22)$$

si $T > T_s$

$$\text{Donde } T_s = \frac{S1s}{Scs} = \frac{0,83g}{1.5g} = 0,55s \quad (23)$$

$$C_s = \frac{S_a(T)}{R} = \frac{0.795}{6} = \mathbf{0.1325} \quad (24)$$

5.2.3. Calibración del análisis modal espectral

Tal y como lo describe AGIES, el análisis estático también representa un calibrador para otros tipos de análisis, como por ejemplo el método dinámico modal espectral. El código establece que la respuesta del sismo dinámico, debe ser por lo menos igual al 85% del sismo estático. Para obtener los valores calibrados de cortante basal, es necesario multiplicar el valor del coeficiente sísmico, por el peso sísmico de la estructura. En el cual se asume que el peso sísmico de la estructura será igual a la carga muerta total, y el 25% de la carga viva, como menciona el código AGIES NSE 3:

$$V_B = C_s W_s = 0.1325 * 1510.15 \text{on} = 200.09 \text{ ton} \quad (25)$$

Tabla 5-6 Solución del sismo estático

Solución estática en X (ton)	Solución estática en Y (ton)
200.09	200.09

Fuente: Elaboración propia (2015)

Para determinar la solución del sismo dinámico, es necesario definir el espectro de respuesta y aplicarle un factor de escala para que las aceleraciones estén en m/s^2 :

$$F = \frac{g}{R} = \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{6} = 1.635 \quad (26)$$

Tabla 5-7 Solución del sismo dinámico

Valor Sismo Dinámico en dirección X		
Xdir (ton)	Ydir (ton)	Resultante
140.01	0	140.01 ton
Valor Sismo Dinámico en dirección Y		
Xdir (ton)	Ydir (ton)	Resultante
0	144.67	144.67 ton

Fuente: elaboración propia (2015)

Debido a que el sismo dinámico es menor al 85% del sismo estático es necesario calibrarlo, para cumplir este mínimo. Por lo cual se debe aplicar un factor de ajuste, calculado de la siguiente forma:

$$F_x = \frac{g * Estático * 0.85}{R * Dinámico} = \frac{9.81m/s^2 * 200.09ton * 0.85}{6 * 140.01ton} = 1.986 \quad (27)$$

$$F_y = \frac{g * Estático * 0.85}{R * Dinámico} = \frac{9.81m/s^2 * 200.09ton * 0.85}{6 * 144.67ton} = 1.922 \quad (28)$$

Este es el nuevo factor de escala que debe aplicarse al espectro de respuesta de AGIES, para alcanzar un 85% del sismo estático.

5.2.4. Deriva máxima

Según la norma NSE, la deriva de piso máxima aceptable para la edificación que se está analizando debe ser menor que:

$$\Delta_{cp} \geq \Delta_u / C_d \geq 0.02/5 \geq \mathbf{0.004} \quad (29)$$

5.2.5. Combinaciones de carga

Para el diseño de los elementos estructurales de la edificación se emplearon las combinaciones de carga para diseñar por resistencia, establecidas en AGIES NSE-2, en el capítulo 8, sección 8.2.

Todas las combinaciones, tanto para cargas gravitacionales como de sismo, se enlistan a continuación. En el caso de carga sísmica se considera la totalidad el sismo en la dirección de interés, y un 30% en la dirección perpendicular, y se indica la dirección del sismo, tanto si es X o Y, como el sentido positivo o negativo.

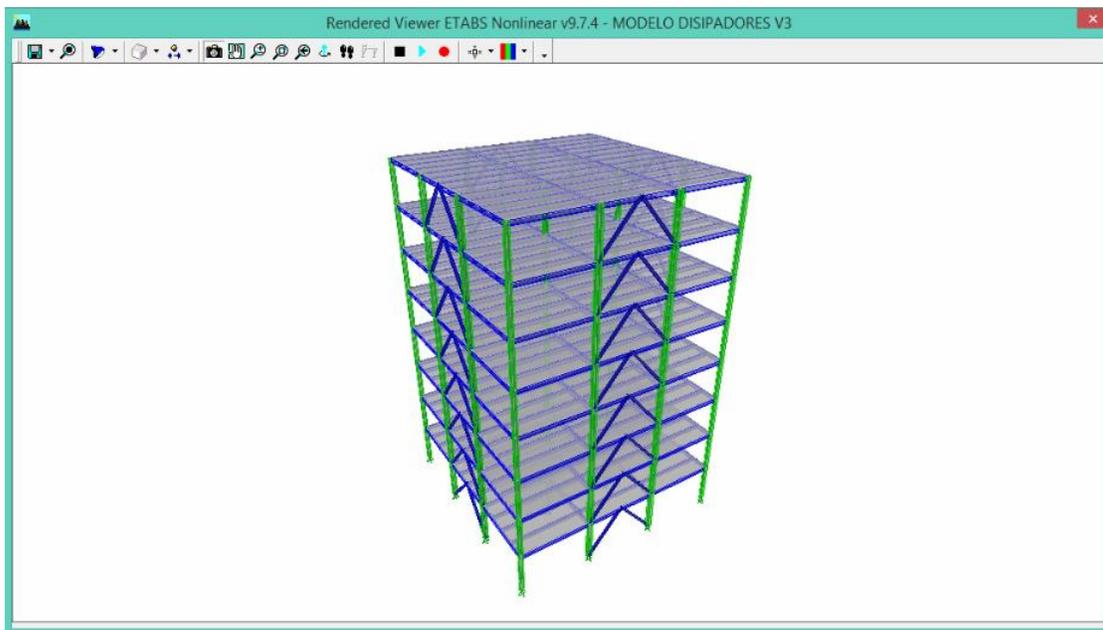
1	CR1	=	1.4 CM
2	CR2	=	1.3 CM + 1.6CV
3	CR3	=	1.3 CM + CV
4	CR4x(+/+)	=	1.35 CM + CV + Sx + 0.3Sx
5	CR4x(+/-)	=	1.35 CM + CV + Sx - 0.3Sx
6	CR4x(-/-)	=	1.35 CM + CV - Sx - 0.3Sx
7	CR4x(-/+)	=	1.35 CM + CV - Sx + 0.3Sx
8	CR4y(+/+)	=	1.35 CM + CV + Sy + 0.3Sy
9	CR4y(+/-)	=	1.35 CM + CV + Sy - 0.3Sy
10	CR4y(-/-)	=	1.35 CM + CV - Sy - 0.3Sy
11	CR4y(-/+)	=	1.35 CM + CV - Sy + 0.3Sy
12	CR5x(+/+)	=	0.75 CM + Sx + 0.3Sx
13	CR5x(+/-)	=	0.75 CM + Sx - 0.3Sx
14	CR5x(-/-)	=	0.75 CM - Sx - 0.3Sx
15	CR5x(-/+)	=	0.75 CM - Sx + 0.3Sx
16	CR5y(+/+)	=	0.75 CM + Sy + 0.3Sy
17	CR5y(+/-)	=	0.75 CM + Sy - 0.3Sy
18	CR5y(-/-)	=	0.75 CM - Sy - 0.3Sy
19	CR5y(-/+)	=	0.75 CM - Sy + 0.3Sy

5.3. Modelo sin disipadores

Para realizar el ejemplo de aplicación se construyó un modelo matemático de una estructura hipotética, representando la distribución espacial de las propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento. Para modelar la estructura se usó el programa de computadora de la compañía norteamericana Computers and Structures (CSI), ETABS Non Linear 9.7.4. Este programa es muy práctico debido a que tiene una interfaz sencilla, y permite modelar la estructura en 3D, donde es posible realizar diferentes análisis, ya sea el de la carga estática equivalente, dinámico modal espectral, o análisis tiempo-historia, entre otros.

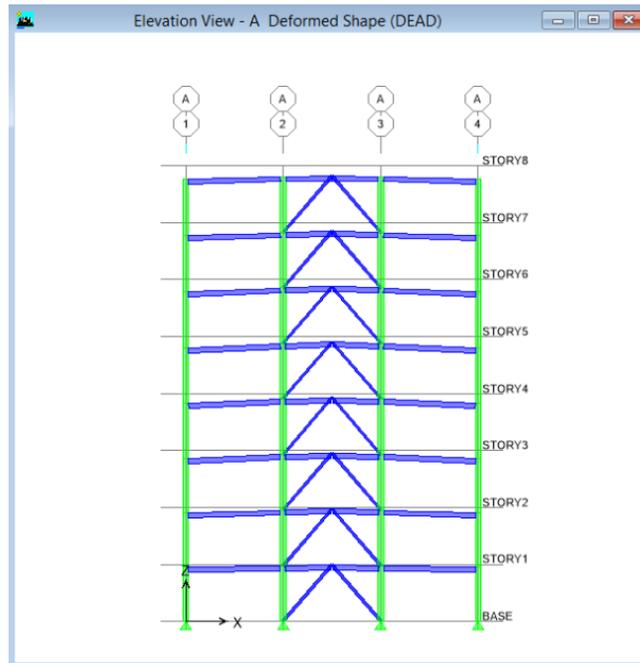
En la figura 5-5 se muestra una vista en 3D del modelo de la estructura en el programa ETABS, donde se puede observar la geometría de la estructura, y la ubicación de las riostras o contraventeos en el tramo central de los marcos del perímetro. Posteriormente se muestra en las figuras 5-6 y 5-7, como se deforma la estructura, para el caso de carga gravitacional y lateral, respectivamente.

Figura 5-5 Vista 3D del modelo a analizar



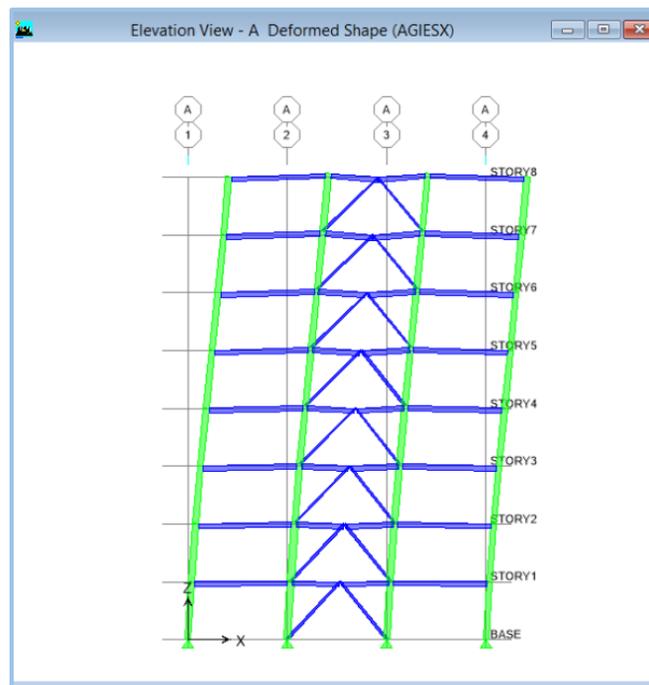
Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 5-6 Deformación de la estructura por carga gravitacional



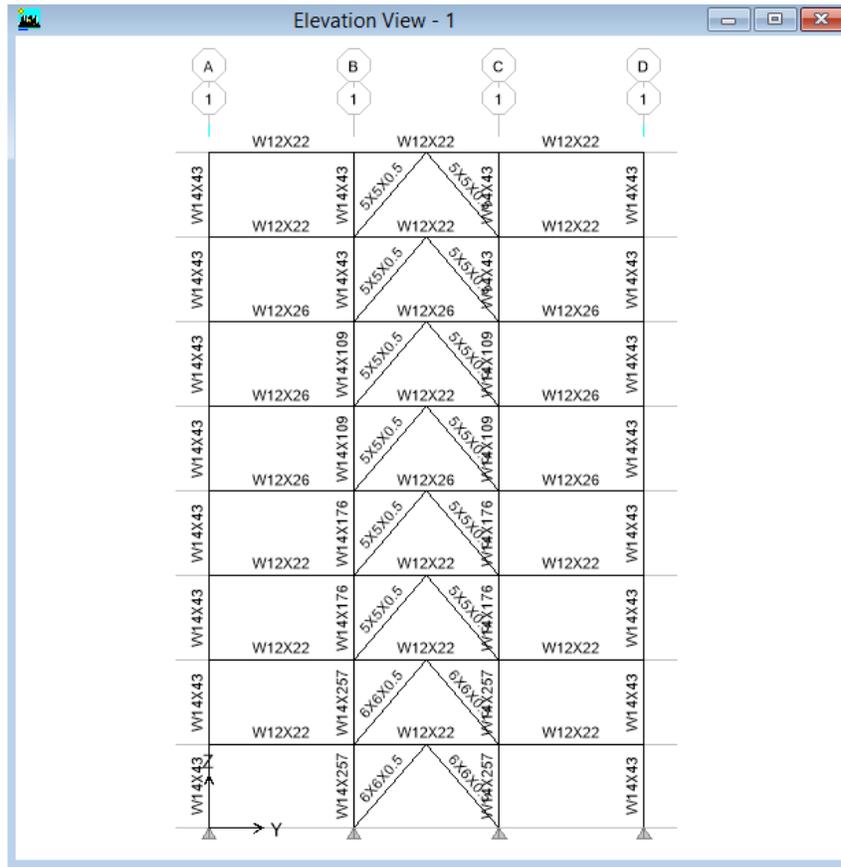
Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 5-7 Deformación de la estructura por carga sísmica



Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 5-9 Secciones de marco arriostrado en sentido Y



Fuente: elaboración propia (2015)

El peso de los elementos metálicos definidos para la edificación analizada mediante el espectro de respuesta de AGIES está descrita en la tabla 5-8.

Tabla 5-8 Peso de los elementos estructurales

Elemento	Peso (Ton)
Columnas	65.35
Vigas	67.55
Riostras	14.16
TOTAL	147.06

Fuente: Elaboración propia (2015)

Como un valor de referencia se calculó el peso de las piezas de acero respecto al área, para tener un valor de peso por unidad de área.

$$\text{Peso unitario} = \frac{147,060\text{kg}}{2,592\text{ m}^2} = 56.74\text{kg/m}^2 \quad (30)$$

5.4. Análisis tiempo-historia

Después de que se definió un edificio con sus elementos estructurales (vigas, columnas y riostras), y que cumpliera con los límites de deformación, se procedió a realizar un análisis tiempo historia con registros sísmicos adecuados a Guatemala. Este análisis permitió obtener una deformación más cercana a la que tendrá el edificio ante un sismo real, para posteriormente agregarle al modelo tridimensional los elementos disipadores y realizar nuevamente el análisis tiempo-historia, para comparar ambos casos de la estructura. Este análisis también se realizó con el programa ETABS, sin embargo a diferencia de análisis lineales, es necesario poseer la versión no lineal (ETABS Nonlinear Version), que es capaz de realizar el análisis tiempo-historia de una estructura.

5.4.1. Selección de Acelerogramas

Los registros empleados en el presente trabajo para realizar el análisis tiempo-historia, fueron obtenidos de la *Base de datos de movimiento del terreno* (Ground Motion Database) del PEER (Pacific Earthquake Research Center). De dicha base de datos es posible obtener una gran cantidad de registros de muchos eventos, que incluyen los datos de aceleración en dos direcciones horizontales, y una vertical, perpendicular al terreno. Además de la aceleración, también se obtiene el desplazamiento y la velocidad, pero para propósitos de esta investigación el valor más relevante es el de la aceleración del suelo.

Para realizar el análisis tiempo-historia, seleccionar y adecuar los acelerogramas se tomó de base la investigación de Alberto Monzón de la Universidad de San Carlos titulada *Selección y adecuación de acelerogramas sísmicos para análisis de estructuras con ejemplos para el valle de Guatemala*, (Monzón, 2013). Como el objetivo de la presente investigación es la aplicación de los acelerogramas adecuados, solo se citará lo que se considere importante para los propósitos del documento; pero se recomienda la profundización en el documento, debido al gran aporte que tiene en la comprensión de la utilización de registros sísmicos para el análisis de estructuras.

a. Parámetros de selección de acelerogramas

Los acelerogramas a utilizar pueden escogerse en base a un espectro de respuesta de referencia. En este caso deben seleccionarse registros cuyos espectros tengan una forma similar al espectro objetivo (el de AGIES NSE-2010).

Para el análisis tiempo historia se seleccionó el registro del sismo de Managua, Nicaragua de 1972. Se seleccionó este registro debido a la similitud de su espectro de respuesta con el espectro genérico de AGIES. Como una referencia, se muestran los datos para los sismos de control de Guatemala, en la tabla 5-9.

Tabla 5-9 Sismos de Control para la Selección de registros

No.	ESCENARIO	TIPO	R	PROFUNDIDAD	M
A	Motagua	Transcurrente	35	Somero	7.5
B	Santa Catarina Pinula	Normal	15	Somero	6.5
C	Jalpatagua	Normal	10	Somero	7.5
D	Subducción	Normal	3	No Somero (150km)	7.5

Fuente: Monzón (2013)

En la tabla 5-10, se enlistan los datos del evento seleccionado para escalarlos y utilizarlos en el análisis de la estructura. En la columna llamada *evento* se muestra el nombre del sismo y el país donde se registró. El *ID* muestra el número de identificación del registro en la base de datos del PEER. La columna *M* muestra la magnitud de momento, y la columna *MEC* el mecanismo de falla de la ruptura donde *SS* significa falla transcurrente, *N* para falla normal. *Rjb* es la distancia Joyner-Boore del sitio a la falla, y *Rrup* es la distancia del sitio donde se registró el evento a la fuente de ruptura (Monzón, 2013).

La columna *suelo* corresponde a la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad y está dada en metros por segundo. En base a esta velocidad es posible clasificar el suelo para factores de amplificación al espectro de diseño de la norma AGIES.

Tabla 5-10 Evento seleccionado para el análisis

	Evento	ID	Fecha	Estación	M	MEC	Rjb	Rrup	Suelo
1	Managua, Nicaragua	95	1972	Managua, ESSO	6.24	SS	3.5	4.2	288

Fuente: Monzón (2013)

El paquete del registro, descargado de la base de datos del PEER, viene en tríos (dos componentes horizontales perpendiculares y una componente vertical), pero para propósitos de la investigación solo se trabajó con las componentes horizontales, y se definió en el programa dos funciones de tiempo-historia, una para cada dirección de interés para el análisis.

En la tabla 5-11, se muestran los factores de escala utilizados para adecuar los registros sísmicos utilizados, al PGA de AGIES (0.4g), que permite usarlos para realizar un análisis aproximado para estructuras ubicadas en Guatemala.

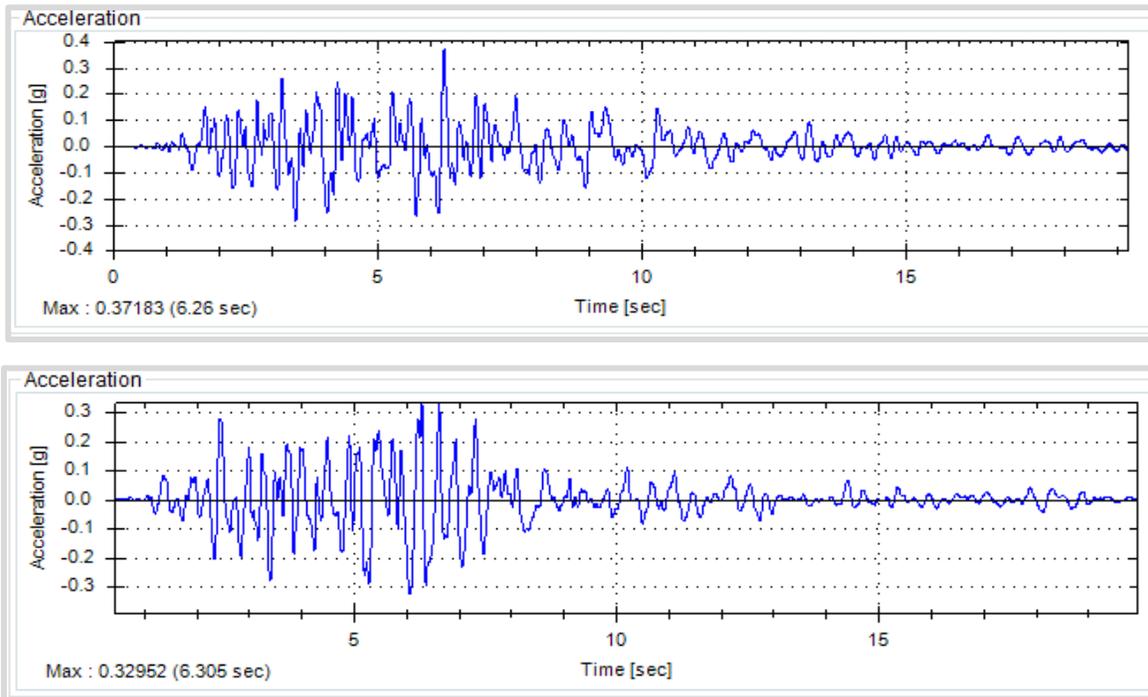
Tabla 5-11 Factores de escala aplicados a acelerogramas

EVENTO	PGA	FA
Managua - 1972 (X)	0.3718	1.0758
Managua - 1972 (Y)	0.3295	1.2139
<i>PGA objetivo</i>		0.4

Fuente: elaboración propia (2015)

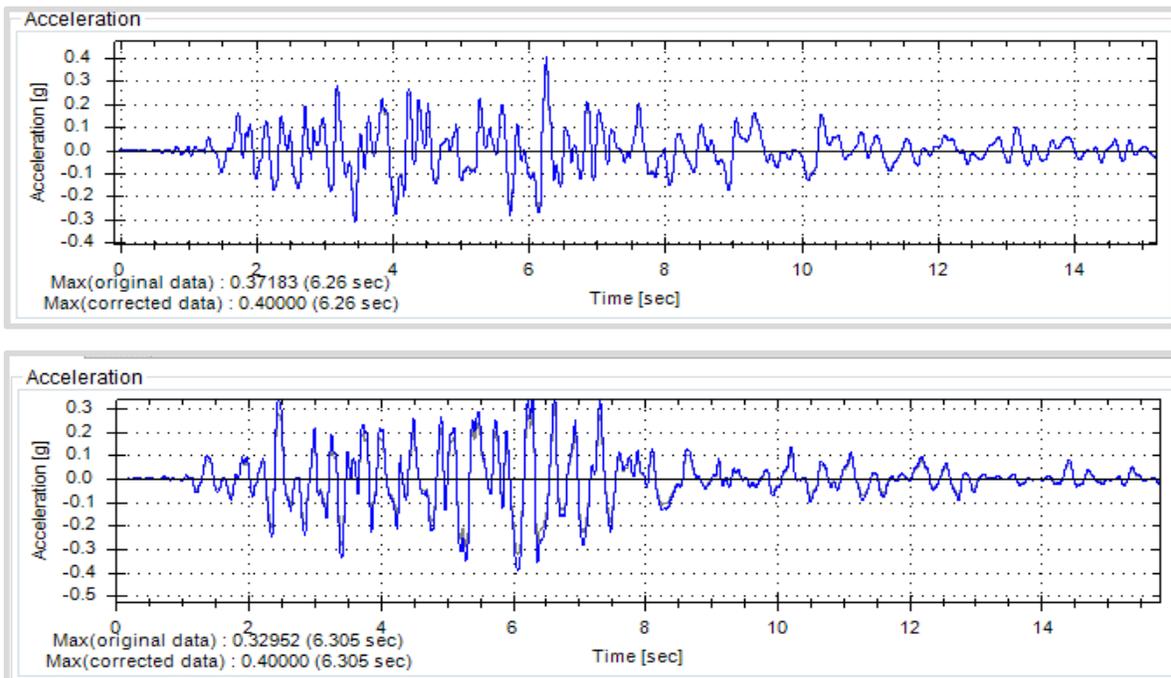
En las figuras 5-10 y 5-11, presentadas a continuación, se presentan las gráficas de aceleración contra tiempo, del registro del sismo de Managua de 1972 utilizado en esta investigación. Primero se muestran los pares de acelerogramas originales y posteriormente los acelerogramas adecuados al PGA de AGIES, los cuales se usaron para realizar el análisis no lineal de historia en el tiempo del edificio de ejemplo, uno para cada dirección de interés X y Y.

Figura 5-10 Acelerogramas originales Managua 1972



Fuente: PEER (2015)

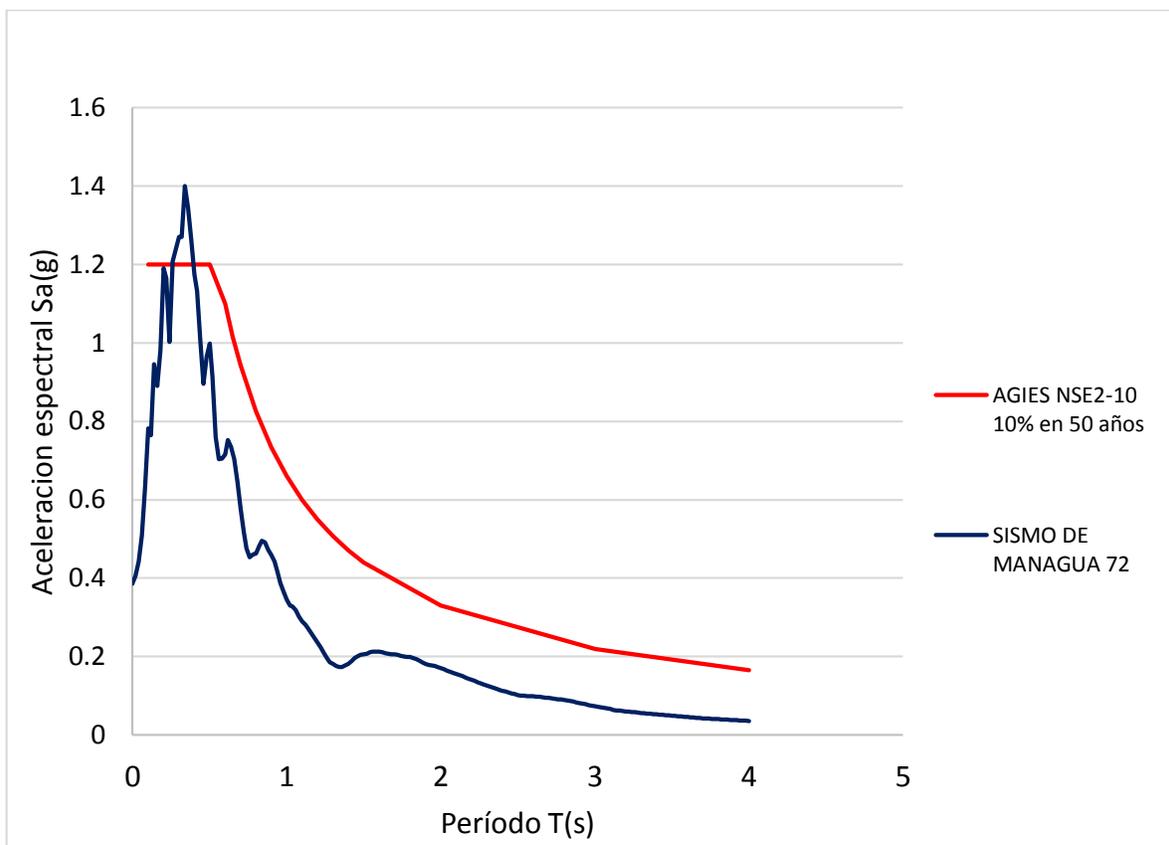
Figura 5-11 Acelerogramas adecuados de Managua 1972



Fuente: elaboración propia (2015)

En la figura 5-12 se comparan los espectros de respuesta, obtenidos a partir de los acelerogramas definidos anteriormente, construidos con el programa PRISM; contra el espectro obtenido a partir de AGIES NSE2-10, para la estructura de ejemplo, para un sismo severo con una probabilidad de exceder un sismo de diseño de 5% en 50 años. El espectro se obtuvo del promedio de las ordenadas del par de acelerogramas del sismo de Managua utilizado, y se construyó para un 5% del amortiguamiento, para poder compararlos con el espectro genérico de AGIES.

Figura 5-12 Comparación de espectros de respuesta



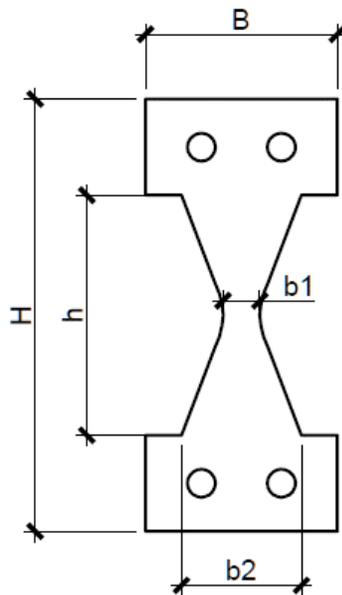
Fuente: elaboración propia (2015)

5.5. Modelo con disipadores

5.5.1. Disipadores empleados

Se realizó el análisis de una edificación con disipadores de energía histeréticos del tipo ADAS. Los disipadores utilizados para el ejemplo práctico tienen la geometría mostrada en la figura 5-13 y las medidas definidas en la tabla 5-12. El material del que se plantea el disipador es acero A-36, debido a que es un material muy utilizado en el medio nacional.

Figura 5-13 Geometría del disipador ADAS usado



Fuente: elaboración propia (2015)

Tabla 5-12 Geometría del disipador

Propiedades geométricas del disipador ADAS				
h (cm)	b ₁ (cm)	b ₂ (cm)	b _{1eq} (cm)	t (cm)
13	1.3	8.6	6.5	0.95

Fuente: Elaboración propia (2015)

Para el ejemplo, se utilizará disipadores fabricados con Acero A-36, debido a que se considera un material muy versátil, y que es de uso común en el país.

Tabla 5-13 Propiedades mecánicas del disipador

Propiedades mecánicas del disipador ADAS		
Material	σ_y (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Acero A-36	2,530	2,093,000

Fuente: Elaboración propia (2015)

a. Rigidez del disipador

La rigidez elástica de cada placa del disipador, es calculada mediante el método de Whittaker et. Al, descrito en el capítulo 3 en la sección 3.4.2., mediante la simplificación de la geometría equivalente en forma de X:

$$K_{PL} = \frac{2 b_{Ieq} t^3 E}{3 h^3} = \frac{2 (6.5cm)(0.95cm)^3 \left(\frac{2,093,000kg}{cm^2} \right)}{3 (13cm)^3} = 3,539.4 \frac{kg}{cm} \quad (31)$$

El resultado anterior representa la rigidez de una placa del dispositivo según la geometría definida anteriormente. La cantidad de placas se establecerá según las necesidades de la edificación.

También se obtiene el cortante de fluencia del disipador y el desplazamiento de fluencia del mismo mediante las ecuaciones:

$$\Delta_y^{PL} = \frac{3 \sigma_y I^2}{4 E t} = \frac{3 (2,530kg/cm^2)(13cm)^2}{4 (2,093,000kg/cm^2)(0.95cm)} = 0.161cm \quad (32)$$

$$V_y^{PL} = K_{PL} * \Delta_y^{PL} = (3,539.4kg/cm) * (0.161cm) = 1,020.16kg \quad (33)$$

Ya definidos estos valores se define una demanda de ductilidad $\mu=10$, lo cual significa que el disipador se deformará 10 veces la deformación de fluencia sin perder sus propiedades de resistencia. Este valor es fundamental para definir el modelo bilineal del disipador que será empleado.

$$\mu\Delta_y = 10\Delta_y = 10 * 0.121cm = 12.1cm \quad (34)$$

Con los valores de rigidez, desplazamiento de fluencia, cortante de fluencia y deformación última de los disipadores utilizados en el edificio de ejemplo, es posible construir un modelo bilineal aplicable a los disipadores que serán usados.

b. Rigidez efectiva

La rigidez efectiva del disipador se toma como la rigidez secante entre la rigidez antes y después de la fluencia. La rigidez efectiva, es un dato importante para el modelaje del disipador en ETABS, ya que se ingresa como parte de sus propiedades.

$$\begin{aligned} k_{efec_{disp}} &= \frac{k_{dis} + k_2(\mu - 1)}{\mu} & (35) \\ &= \frac{3,539.4kg/m + 0.05 * 3,539.4kg/m(10 - 1)}{10} \\ &= 513kg/cm \end{aligned}$$

c. Propiedades de los disipadores

Los resultados anteriores representan las propiedades de rigidez de una placa que formará parte del dispositivo ADAS. Pero el disipador estará formado por una cantidad variable de placas, lo cual modifica los resultados de rigidez en función de la cantidad de estas. Como un resumen de esta variación, en la tabla 5-14 se muestran los resultados de rigidez elástica (K_{ADAS}), rigidez efectiva (K_{EDDE}), cortante

de fluencia (V_{ADAS}), cortante último (V_U), desplazamiento de fluencia (Δy), y desplazamiento último ($\mu\Delta y$) para diferente número de placas.

Tabla 5-14 Propiedades del disipador en función del número de placas
(Acero a-36)

n	K_{ADAS} (Ton/cm)	V_{ADAS} (Ton)	V_U (Ton)	Δy (cm)	$\mu\Delta y$ (cm)	K_{EDDE} (Ton/cm)
1	3.539	0.571	0.828	0.161	1.613	0.513
2	7.079	1.142	1.655	0.161	1.613	1.026
4	14.158	2.283	3.311	0.161	1.613	2.053
6	21.237	3.425	4.966	0.161	1.613	3.079
8	28.315	4.567	6.622	0.161	1.613	4.106
10	35.394	5.708	8.277	0.161	1.613	5.132
12	42.473	6.850	9.932	0.161	1.613	6.159
14	49.552	7.992	11.588	0.161	1.613	7.185
16	56.631	9.133	13.243	0.161	1.613	8.211

Fuente: Elaboración propia (2015)

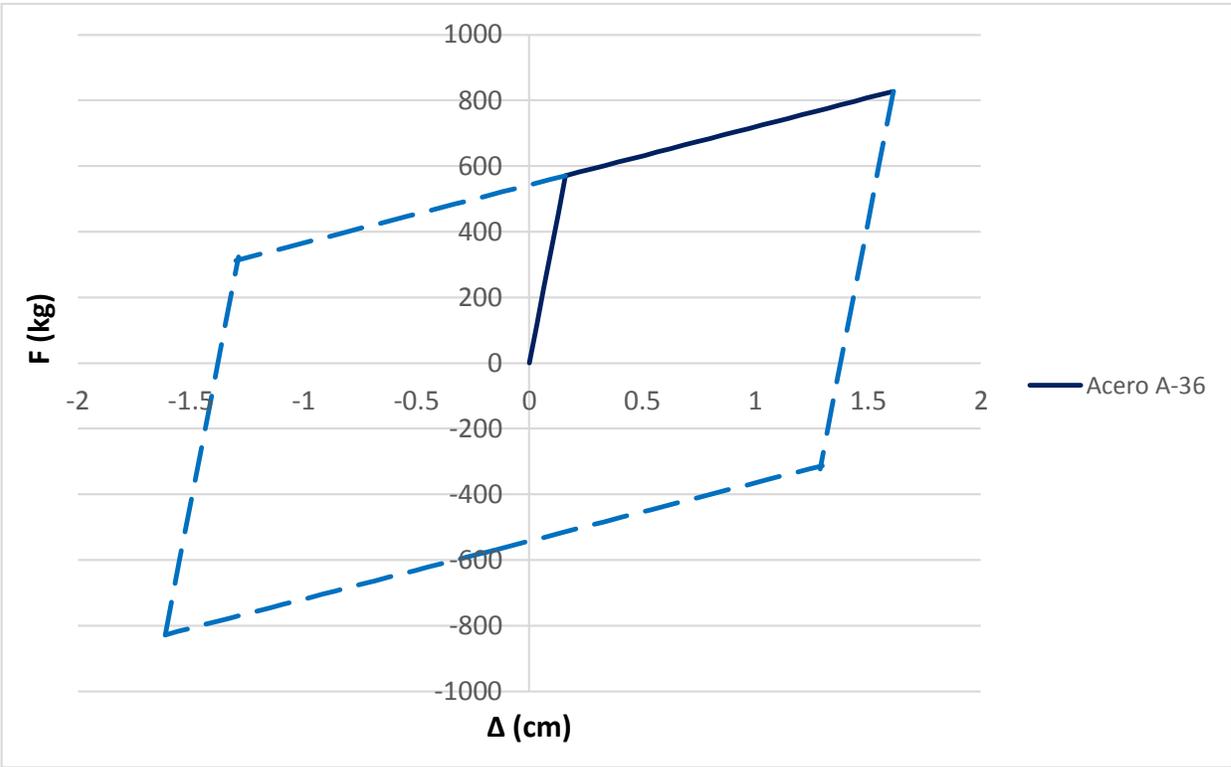
5.5.2. Modelo bilineal aplicado

El modelo bilineal empleado en esta investigación, se construyó tomando en cuenta las características y propiedades de los disipadores ADAS definidas en el capítulo 3. En base a los resultados obtenidos en las secciones 5.5.1.1. y 5.5.1.2., se construye la gráfica que representa el comportamiento histerético del disipador. Los datos necesarios para realizar la gráfica que representa un ciclo de histéresis del disipador son la rigidez del dispositivo, la rigidez de la fluencia (o post-fluencia), el desplazamiento de fluencia, el desplazamiento último, el cortante de fluencia y el cortante máximo; tomando en cuenta estos valores definidos según la geometría y el material de los disipadores, se construyó la gráfica 5-14 correspondiente a una placa, tomando como base la gráfica estándar de un ciclo de histéresis adecuada a un modelo bilineal. También se muestra la ecuación que define el modelo bilineal del disipador.

La ecuación (36) define el modelo bilineal, para el disipador utilizado en la estructura. Esta ecuación permite establecer el comportamiento no lineal del disipador aplicado en el ejemplo.

$$F(d) = \begin{cases} 3,539.4 \times d & d \leq 0.161cm \\ 542.28 + 176.97 \times d & d > 0.161cm \end{cases} \quad (36)$$

Figura 5-14 Modelo bilineal del disipador ADAS de Acero A-36



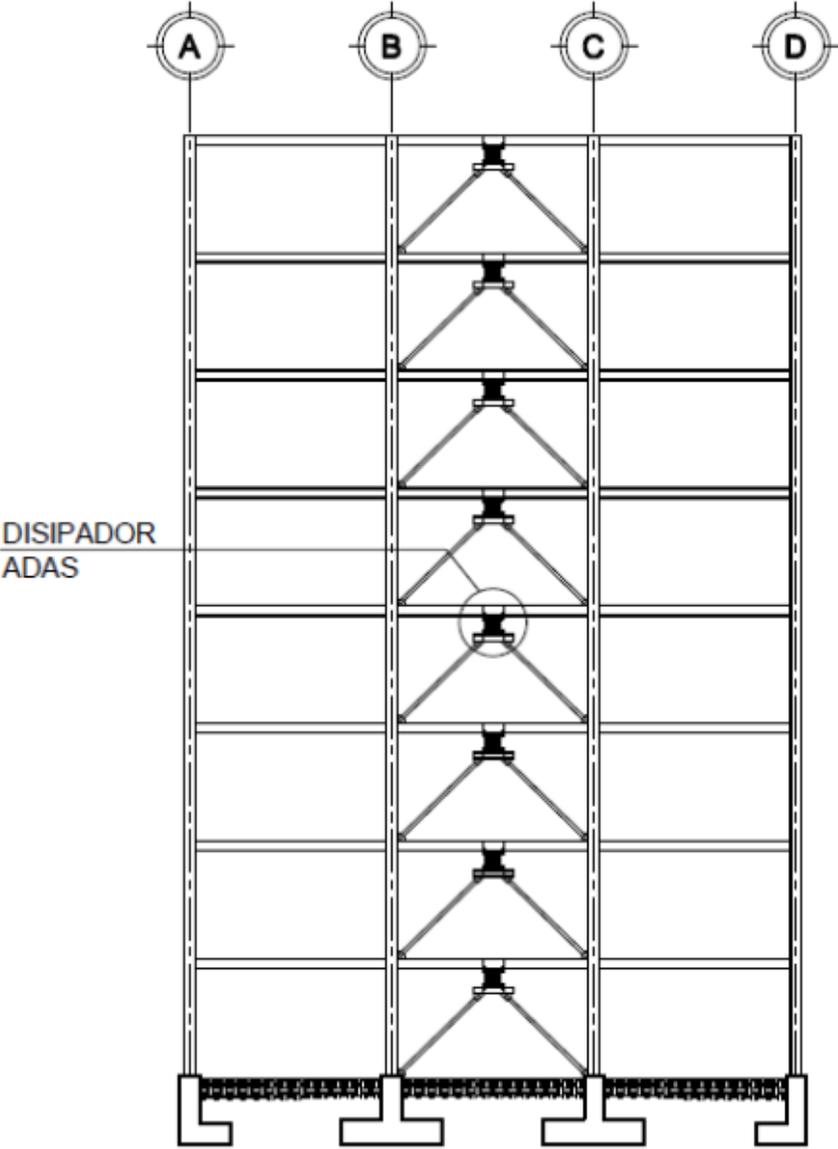
Fuente: Elaboración propia (2015)

5.5.3. Ubicación de los disipadores

En el edificio se instalaron cuatro dispositivos en cada nivel, uno en cada juego de riostras (contraventeos), dos en cada dirección de análisis, proveyendo resistencia

contra la torsión. La geometría de una placa del disipador se definió en tabla 5-12, pero para evaluar diferentes condiciones, se definió dispositivos con cantidad de placas variable. En la figura 5-15 se puede apreciar la ubicación en elevación de los disipadores en la edificación, los cuales se ubicaron en los contraventeos de los marcos perimetrales.

Figura 5-15 Ubicación de los disipadores



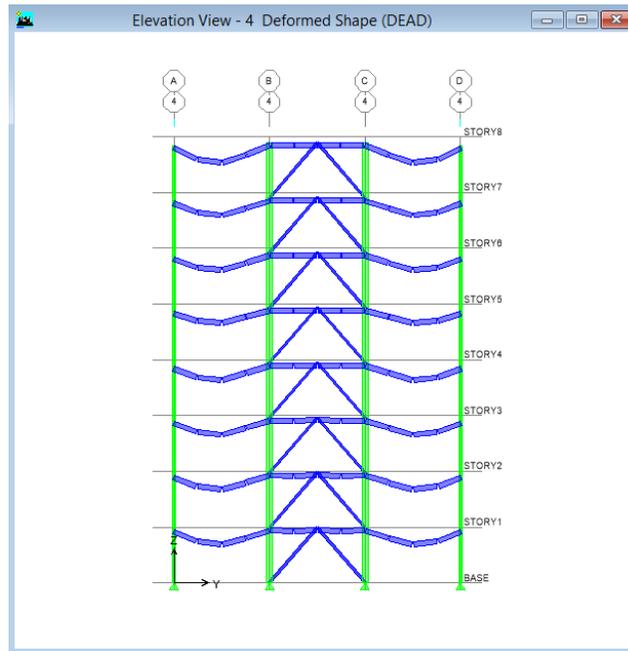
Fuente: Elaboración propia (2015)

Para modelar la estructura con disipador, se empleó el elemento *NLLink* del programa ETABS que permite definir distintos tipos de disipadores, entre los que está el ADAS, en el cual se definen las siguientes propiedades no lineales locales del dispositivo:

- Rigidez inicial del disipador, calculada para el conjunto de placas que conforma el dispositivo.
- Fuerza de fluencia, calculada para el disipador.
- Porcentaje de rigidez post-fluencia, el cual se asume de 5%, según lo mencionado anteriormente.
- Rigidez efectiva del disipador, que considera la rigidez después de la fluencia del dispositivo.
- Exponente de la curva de histéresis, asumido por defecto por el programa como 2. Este valor depende del dispositivo y es brindado por el fabricante, pero debido a que se está empleando un modelo teórico se decidió dejar el factor preestablecido por el programa.

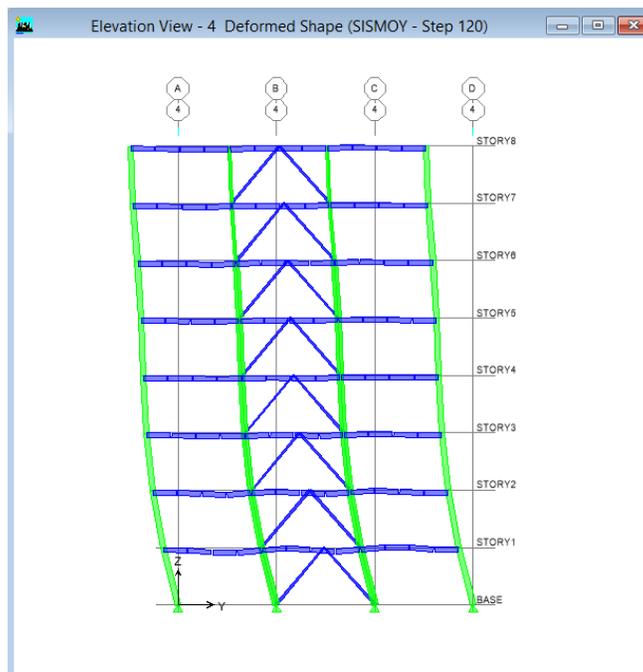
Este análisis considera que la estructura tiene un amortiguamiento del 5% y el amortiguamiento adicional proporcionado por los disipadores ADAS se genera por su trabajo no lineal durante el movimiento sísmico. En el caso estudiado, donde se consideran elementos con no linealidad local, para un análisis de historia en el tiempo, el programa permite conocer de forma aproximada el comportamiento de la estructura, obteniendo respuestas que deben considerarse con reserva, respecto a las que se obtendrían mediante un análisis no lineal riguroso. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones los resultados obtenidos pueden considerarse confiables, principalmente para estructuras con configuración regular en planta y en elevación, como es el caso del edificio analizado; y también si el comportamiento de la estructura está gobernado principalmente por las primeras formas modales de vibración.

Figura 5-16 Deformación de la estructura con disipadores por carga gravitacional



Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 5-17 Deformación de la estructura con disipadores por carga sísmica



Fuente: elaboración propia (2015)

6. RESULTADOS

Para cumplir los objetivos de la presente investigación se llevaron a cabo diferentes modelos de una estructura hipotética de marcos de acero arriostrados ubicada en la ciudad de Guatemala. Primero se realizó un modelo de la edificación sin disipadores, el cual se analizó mediante el método modal espectral en base a AGIES. Este modelo se realizó como un pre-dimensionamiento de la edificación.

Posteriormente a la misma estructura se realizó un análisis tiempo-historia, con el registro del sismo de Managua de 1972. Por último a la estructura se le adicionó disipadores de energía ADAS, y se realizó 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.

6.1. Análisis lineal Modal Espectral

Como se ha descrito en los capítulos 4 y 5, se realizó un análisis modal espectral a la estructura, empleando el espectro de respuesta genérico de la norma AGIES NSE aplicable para la Ciudad de Guatemala.

Es importante aclarar que este modelo se tomó como un punto de partida para análisis posteriores, que serán más significativos para evaluar el comportamiento de la estructura con disipadores. Sin embargo se considera de suma importancia, desarrollar los temas básicos de diseño sismorresistente de una estructura convencional de marcos de acero, ya que este trabajo de investigación va dirigido a estudiantes que desean ampliar su conocimiento, y que no necesariamente manejan estos temas.

6.1.1. Edificio sin disipadores

Las derivas de la estructura sin disipadores, obtenidas mediante un análisis lineal dinámico de espectro de respuesta se muestran en la tabla 6-1. Estos resultados se toman como punto de inicio, para los posteriores análisis que se llevarán a cabo. Como se puede observar, las derivas son menores que el límite de 0.004 establecido por AGIES NSE-10.

Tabla 6-1 Derivas de la estructura sin disipadores

Nivel	H (m)	Edificio sin disipadores (Análisis Lineal)	
		Deriva X	Deriva Y
8	3.5	0.00180	0.00156
7	3.5	0.00200	0.00176
6	3.5	0.00200	0.00181
5	3.5	0.00193	0.00180
4	3.5	0.00184	0.00173
3	3.5	0.00169	0.00157
2	3.5	0.00136	0.00127
1	3.5	0.00117	0.00114

Fuente: elaboración propia (2015)

6.2. Análisis no-lineal Tiempo Historia

6.2.1. Edificio sin disipadores

Además del análisis lineal modal espectral, se realizó un análisis no-lineal tiempo historia, con los registros de eventos sísmicos descritos en el capítulo 4. En la tabla 6-2, se muestran las derivas de la estructura debidas al sismo de Managua de 1972, reducido por un factor 'R' igual a 6, correspondiente al sistema estructural de marcos arriostrados.

Tabla 6-2 Derivas de la estructura sin disipadores (R=6)

Nivel	H (m)	Edificio sin disipadores (Managua 1972)	
		Deriva X	Deriva Y
8	3.5	0.00292	0.00258
7	3.5	0.00304	0.00272
6	3.5	0.00268	0.00240
5	3.5	0.00249	0.00212
4	3.5	0.00213	0.00158
3	3.5	0.00209	0.00165
2	3.5	0.00193	0.00160
1	3.5	0.00197	0.00181

Fuente: elaboración propia (2015)

6.2.2. Edificio con disipadores

Para observar el comportamiento de la estructura analizada con disipadores de energía ADAS, se asignó los dispositivos en la estructura definida en las secciones anteriores en el programa ETABS, y se realizó un análisis no-lineal. En la tabla 6-3 se presentan las derivas de la estructura, para varios casos de disipadores, donde se varió la cantidad de placas de cada dispositivo para observar como esto influye en la deformación de la estructura. En este primer caso, se empleó disipadores con el mismo número de placas en todos los niveles. Las derivas presentadas a continuación fueron obtenidas empleando un registro sísmico reducido por el factor de ductilidad correspondiente a marcos arriostrados (R=6), esto con el objetivo de compararlas con las derivas últimas permisibles de AGIES.

Tabla 6-3 Derivas de la estructura con disipadores

Nivel	H (m)	Disipadores de 6 placas		Disipadores de 8 placas		Disipadores de 12 placas	
		Deriva X	Deriva Y	Deriva X	Deriva Y	Deriva X	Deriva Y
8	3.5	0.00080	0.00122	0.00082	0.00108	0.00077	0.00088
7	3.5	0.00080	0.00122	0.00082	0.00108	0.00077	0.00090
6	3.5	0.00083	0.00152	0.00084	0.00138	0.00082	0.00120
5	3.5	0.00103	0.00153	0.00095	0.00139	0.00082	0.00120
4	3.5	0.00143	0.00143	0.00106	0.00129	0.00101	0.00120
3	3.5	0.00183	0.00122	0.00143	0.00120	0.00123	0.00111
2	3.5	0.00220	0.00176	0.00190	0.00173	0.00152	0.00147
1	3.5	0.00220	0.00177	0.00191	0.00173	0.00153	0.00148

Fuente: elaboración propia (2015)

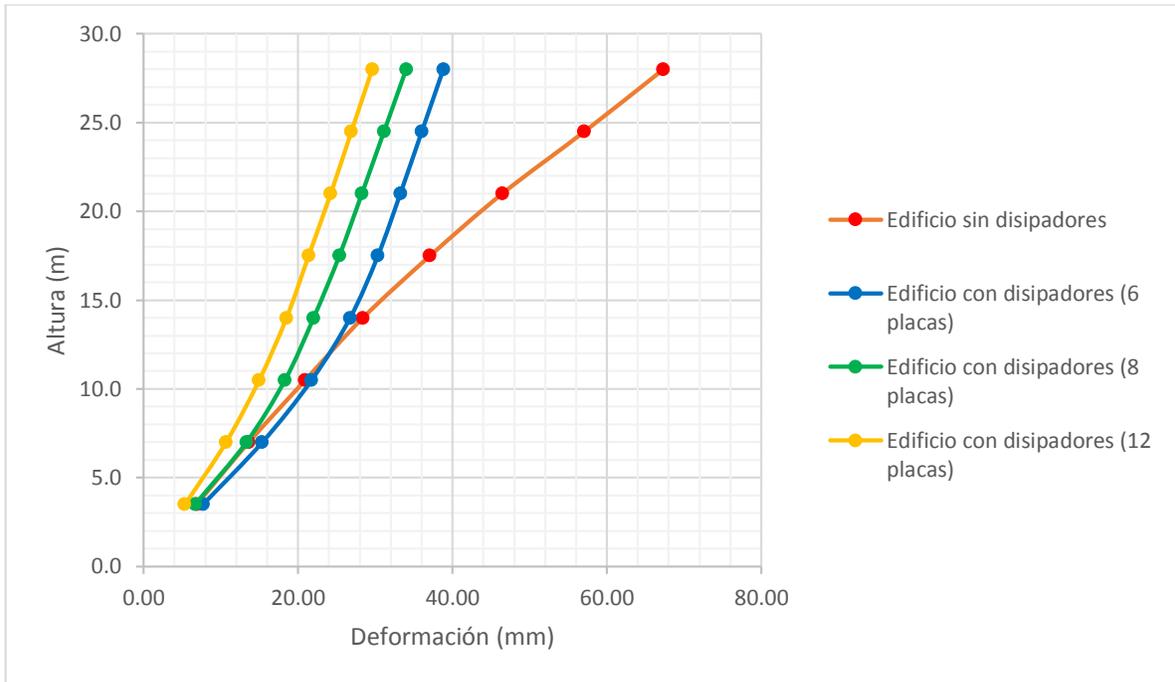
Las derivas son un desplazamiento relativo entre pisos, y dependen de la diferencia en la deformación entre niveles y la altura. Con estos datos es posible obtener la deformación máxima de la edificación de cada nivel de la estructura, lo cual se resume en la tabla 6-4.

Tabla 6-4 Deformaciones máximas de la estructura con disipadores

Nivel	H (m)	Edificio sin disipadores		Con disipadores de 6 placas		Con disipadores de 8 placas		Con disipadores de 12 placas	
		X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
8	28.0	67.32	57.60	38.82	40.83	34.02	38.05	29.61	33.04
7	24.5	57.10	48.58	36.04	36.56	31.15	34.27	26.92	29.95
6	21.0	46.46	39.05	33.25	32.28	28.29	30.49	24.24	26.80
5	17.5	37.10	30.66	30.35	26.96	25.37	25.66	21.37	22.61
4	14.0	28.39	23.23	26.75	21.62	22.03	20.81	18.50	18.39
3	10.5	20.94	17.69	21.76	16.61	18.33	16.30	14.96	14.20
2	7.0	13.63	11.92	15.37	12.34	13.32	12.11	10.67	10.32
1	3.5	6.88	6.32	7.69	6.18	6.67	6.06	5.34	5.17

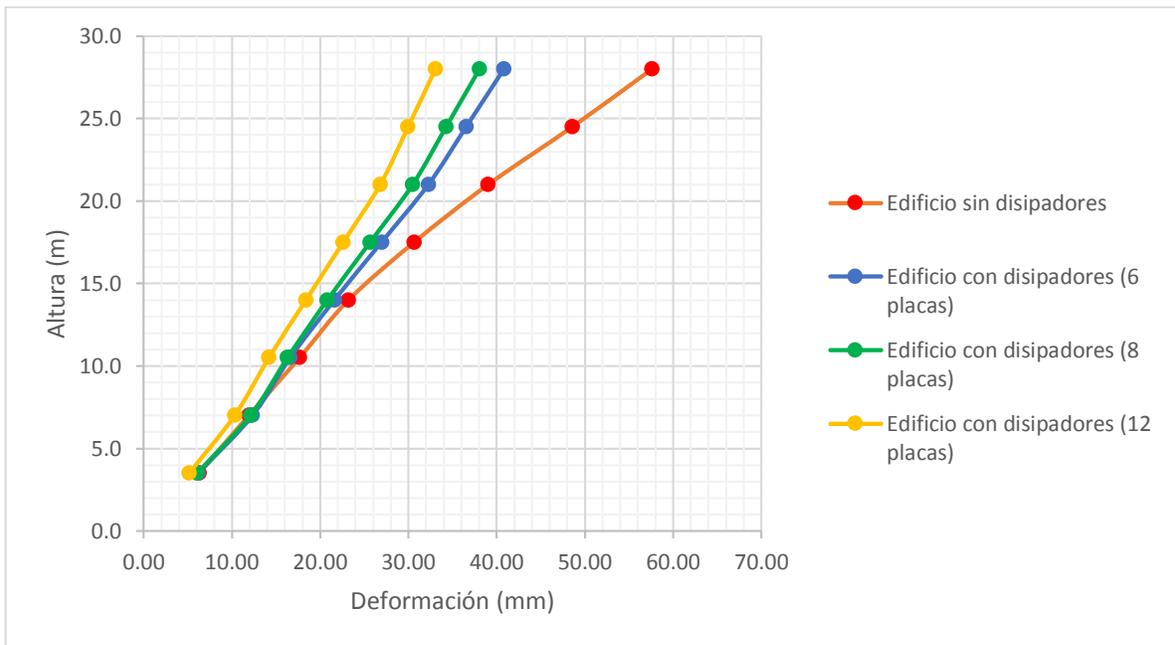
Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 6-1 Comparación de deformación en X



Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 6-2 Comparación de deformación en Y



Fuente: elaboración propia (2015)

Posteriormente se implementó disipadores con distinto número de placas en distintos niveles. Esto debido a que en la tabla 6-3, se puede observar que en los primeros niveles existe una deriva mayor que en los últimos, ya que es donde se concentra el cortante basal debido al sismo. Por lo tanto se decidió aumentar el número de placas en los primero pisos y reducirlas para los niveles superiores. Para este caso, se colocó disipadores con 12 placas en el primer y segundo niveles, y de 6 placas en el resto de niveles; tanto para el sentido X como Y. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6-4.

Tabla 6-5 Derivas de la estructura con disipadores

Nivel	H (m)	Edificio con disipadores (Número de placas variable)	
		Deriva X	Deriva Y
8	3.5	0.00098	0.00132
7	3.5	0.00098	0.00131
6	3.5	0.00102	0.00152
5	3.5	0.00118	0.00152
4	3.5	0.00118	0.00126
3	3.5	0.00113	0.00096
2	3.5	0.00123	0.00128
1	3.5	0.00122	0.00128

Fuente: elaboración propia (2015)

Se considera que los resultados de la prueba con diferentes rigideces para los niveles de la edificación son más óptimos no solo en la reducción de la deformación, sino además en cuanto a costo, ya que no es necesario colocar un disipador con gran cantidad de placas en todos los niveles.

6.2.3. Comparación de deformación

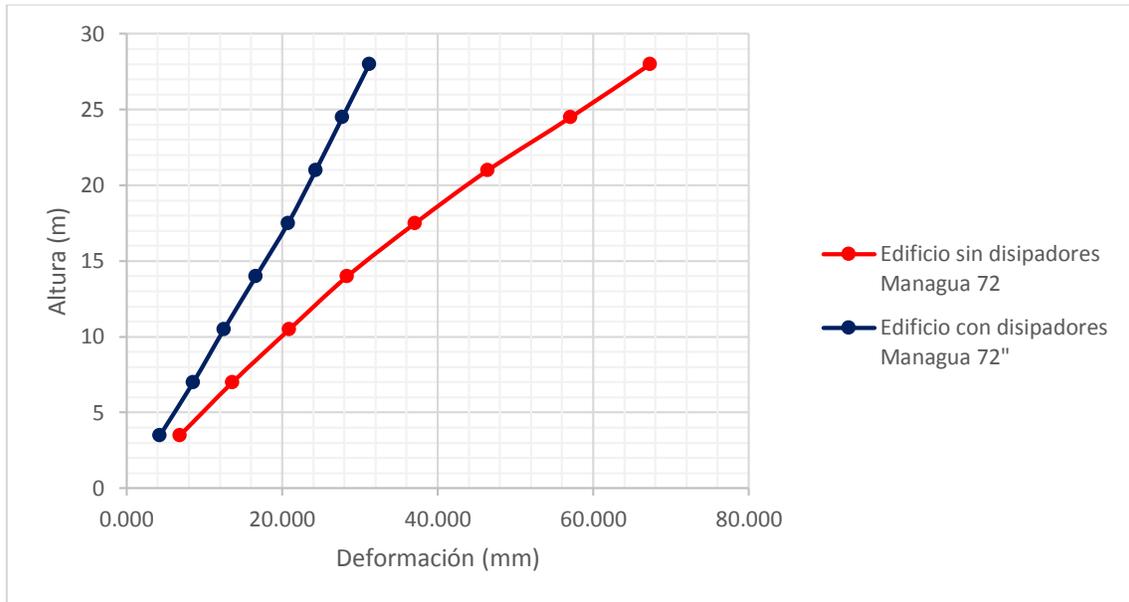
Para el caso en que se usó disipadores con diferente rigidez a lo largo de la altura del edificio, se obtuvo las deformaciones máximas y se compararon con las deformaciones del edificio sin disipadores, esta comparación se resume en la tabla 6-6, se presenta de forma gráfica para una mejor apreciación en las gráficas 6-4 y 6-5. En la misma tabla 6-6 también se muestra el porcentaje en que la implementación de los disipadores redujo la deformación.

Tabla 6-6 Deformaciones máximas

Nivel	H (m)	Edificio sin disipadores		Edificio con disipadores		Reducción de la deformación	
		X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X	Y
8	28.0	67.319	57.596	31.220	36.596	54%	36%
7	24.5	57.103	48.580	27.776	31.983	51%	34%
6	21.0	46.463	39.050	24.343	27.388	48%	30%
5	17.5	37.100	30.657	20.773	22.071	44%	28%
4	14.0	28.392	23.226	16.650	16.751	41%	28%
3	10.5	20.944	17.686	12.527	12.334	40%	30%
2	7.0	13.629	11.925	8.575	8.964	37%	25%
1	3.5	6.881	6.321	4.284	4.487	38%	29%
Promedio						44%	30%

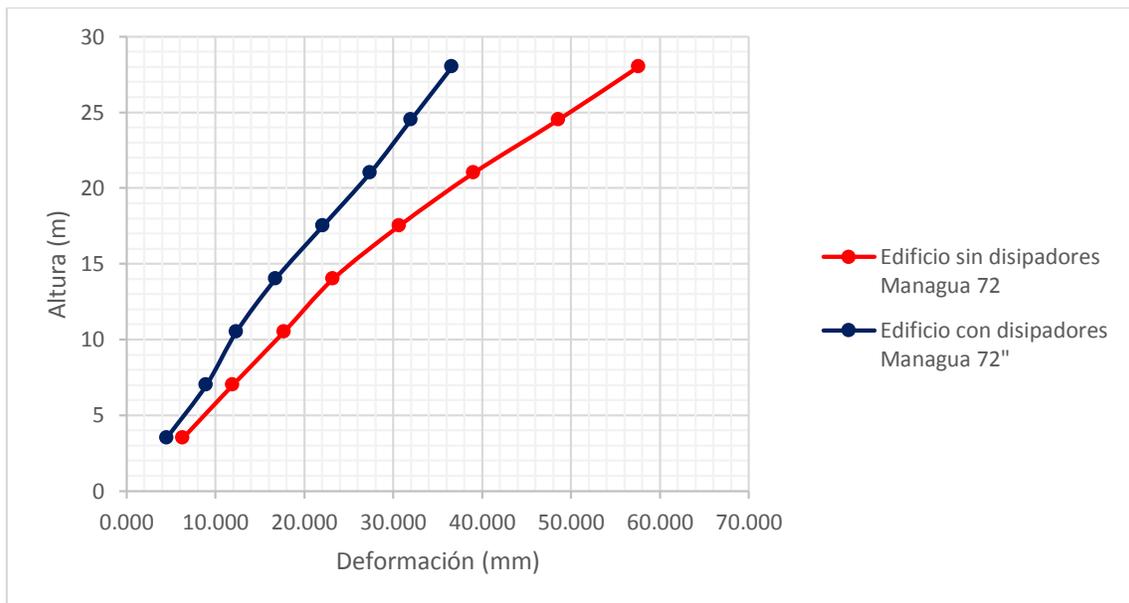
Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 6-3 Comparación de deformación en X



Fuente: elaboración propia (2015)

Figura 6-4 Comparación de deformación en Y



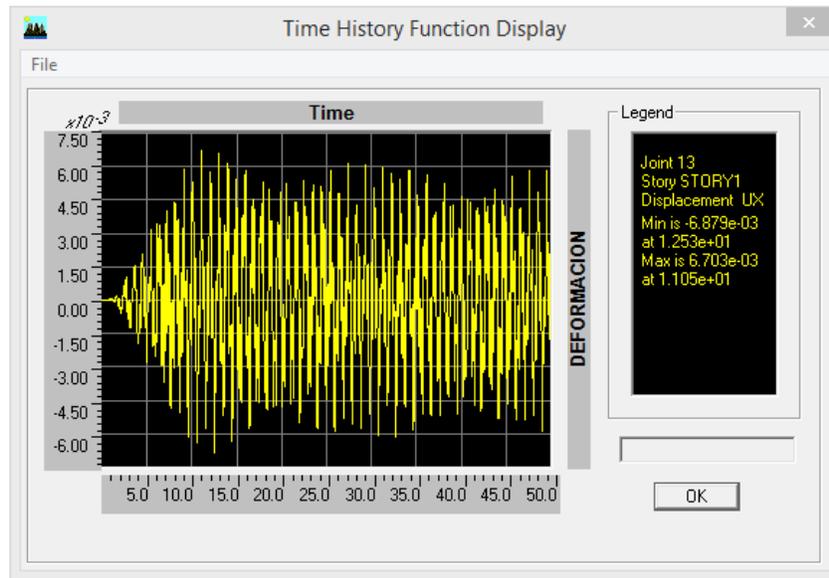
Fuente: elaboración propia (2015)

a. Comparación de deformación en el tiempo

Las estructuras no resultan dañadas durante los sismos únicamente por la máxima deformación sufrida, sino por la sucesión de desplazamientos sísmicos causados por el movimiento del terreno. Como se presentó en la sección 6.2.3. el desplazamiento máximo es reducido, sin embargo el análisis tiempo-historia realizado en ETABS permite obtener gráficamente la serie de deformaciones que sufre la estructura a lo largo del evento sísmico. A continuación es posible observar una comparación entre la estructura convencional, y la estructura con los disipadores; donde se muestra que al usar los dispositivos ADAS la deformación sufre una atenuación, al contrario del caso convencional donde la estructura vibra de forma regular a lo largo del tiempo que dura el sismo. Esto es debido a que los disipadores aumentan el amortiguamiento de la estructura, permitiendo que regrese al equilibrio de forma más rápida, reduciendo el daño, a elementos estructurales y no estructurales.

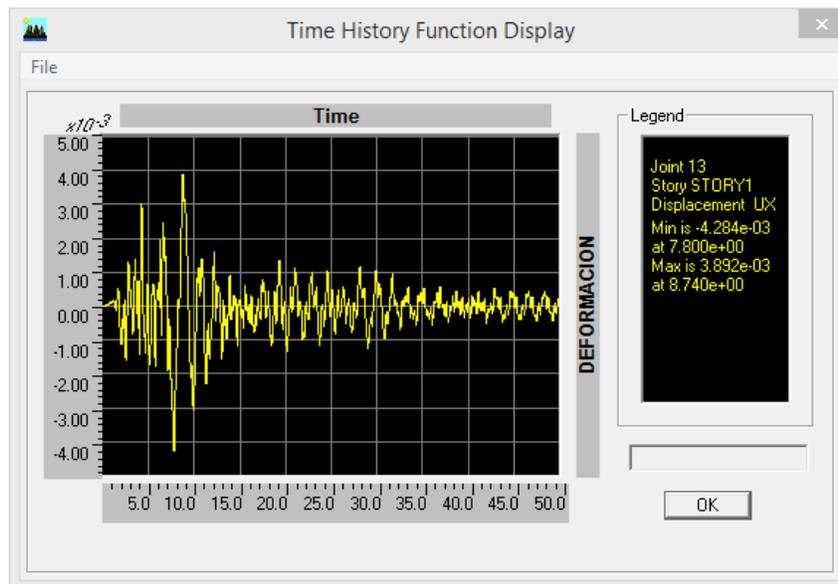
A continuación las figuras 6-5 y 6-6 muestran cómo se deforma la estructura en sentido X sin disipadores, y con disipadores a lo largo del tiempo de duración del evento sísmico de Managua 1972, respectivamente. La deformación que se grafica corresponde a un punto en el primer nivel de la edificación. Y en las figuras 6-7 y 6-8 muestran cómo se deforma la estructura en sentido Y sin disipadores, y con disipadores a lo largo del tiempo de duración del evento sísmico de Managua 1972, respectivamente

Figura 6-5 Deformación de edificación sin disipadores en X



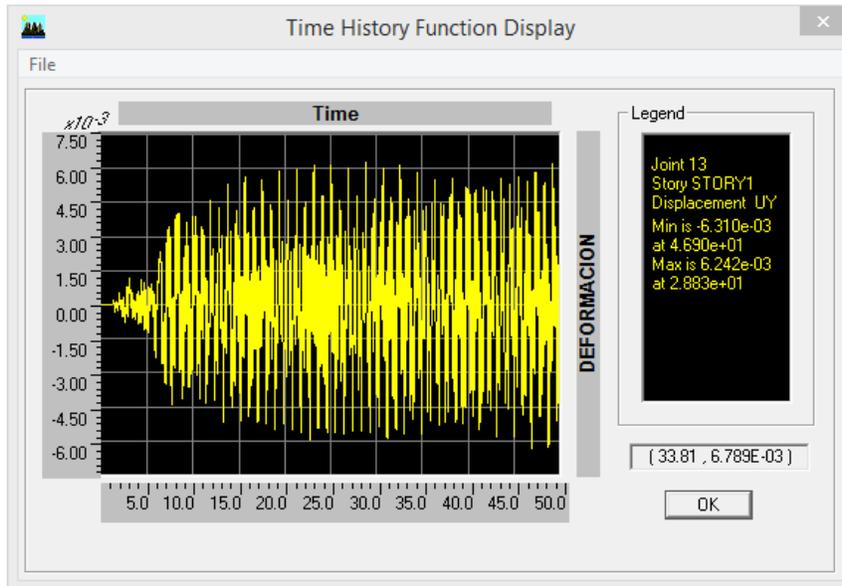
Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-6 Deformación de edificación con disipadores en X



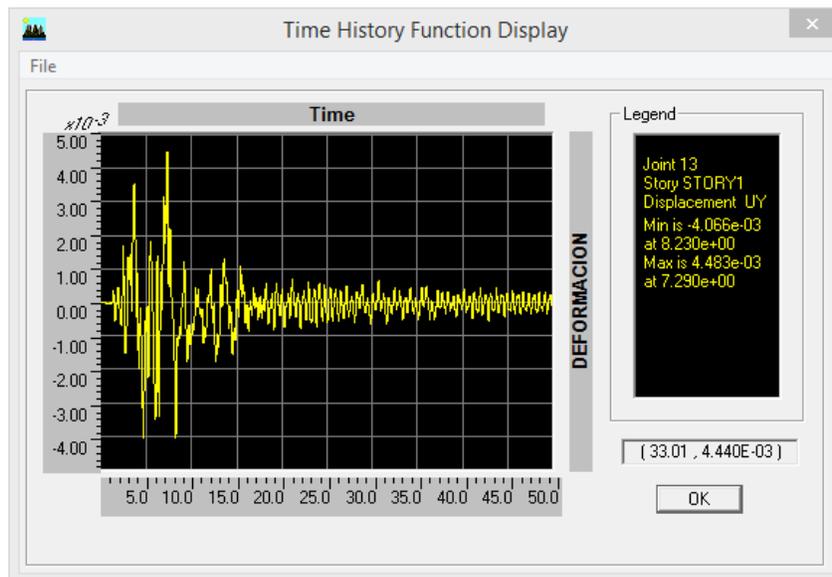
Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-7 Deformación de edificación sin disipadores en Y



Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-8 Deformación de edificación con disipadores en Y

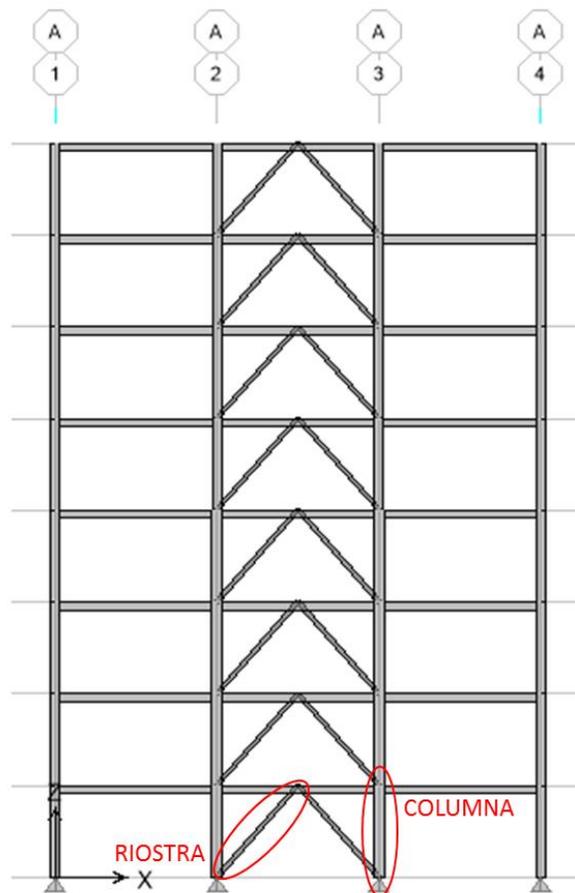


Fuente: Elaboración propia (2015)

6.2.4. Comparación de esfuerzos

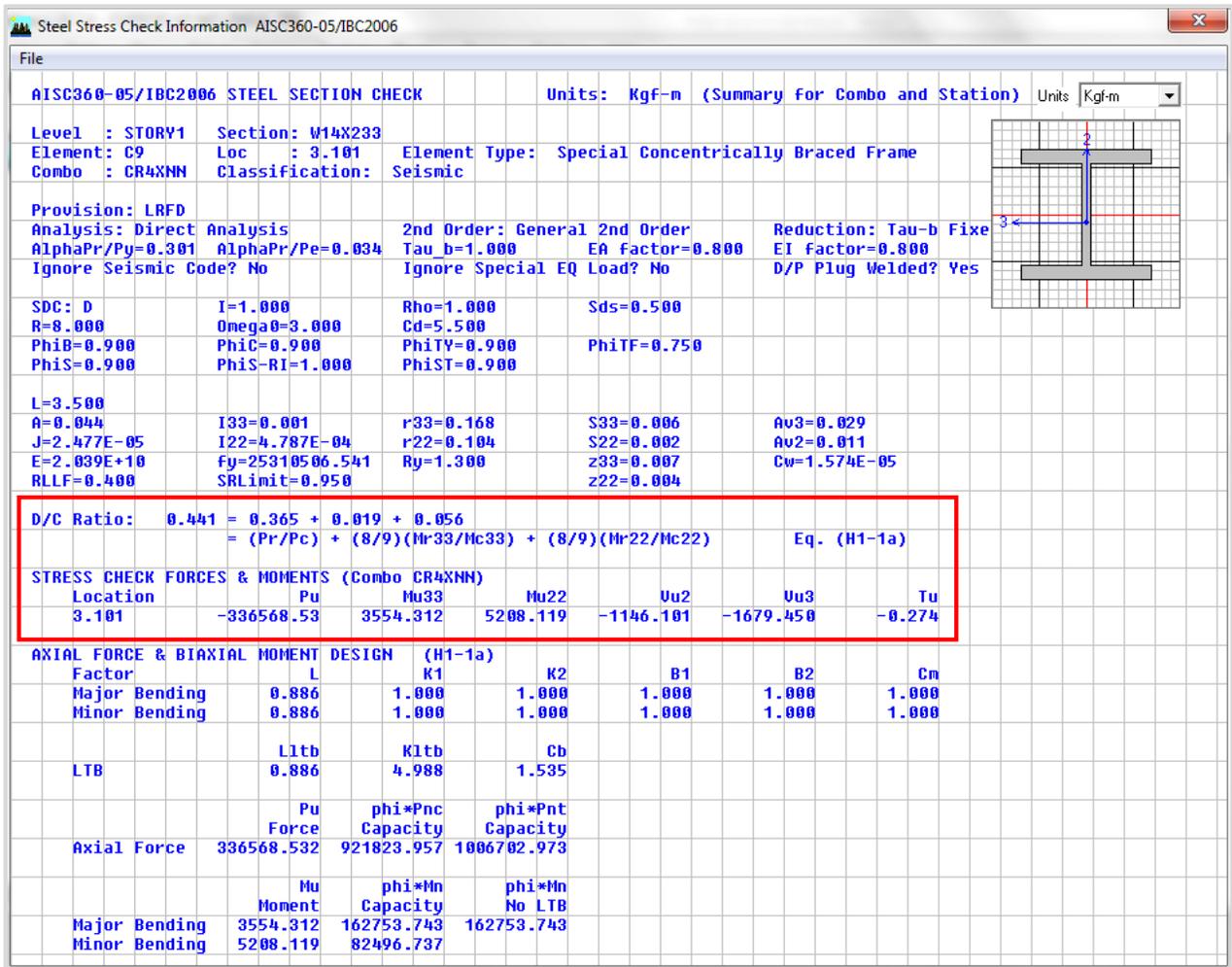
Además de analizar las deformaciones de la estructura con y sin disipadores, también es importante comparar los esfuerzos en los elementos estructurales. Debido a que el objetivo del dispositivo ADAS es absorber parte de la energía que ingresa a la estructura por causa del sismo, se esperaría que los esfuerzos en las piezas, en especial por combinaciones sísmicas se vean modificados en la edificación cuando se implementan los disipadores. En la figura 6-9 se muestra la ubicación de los elementos críticos cuyos resultados de diseño se presentan posteriormente, tanto para el edificio convencional como para el edificio con disipadores ADAS.

Figura 6-9 Ubicación de elementos críticos



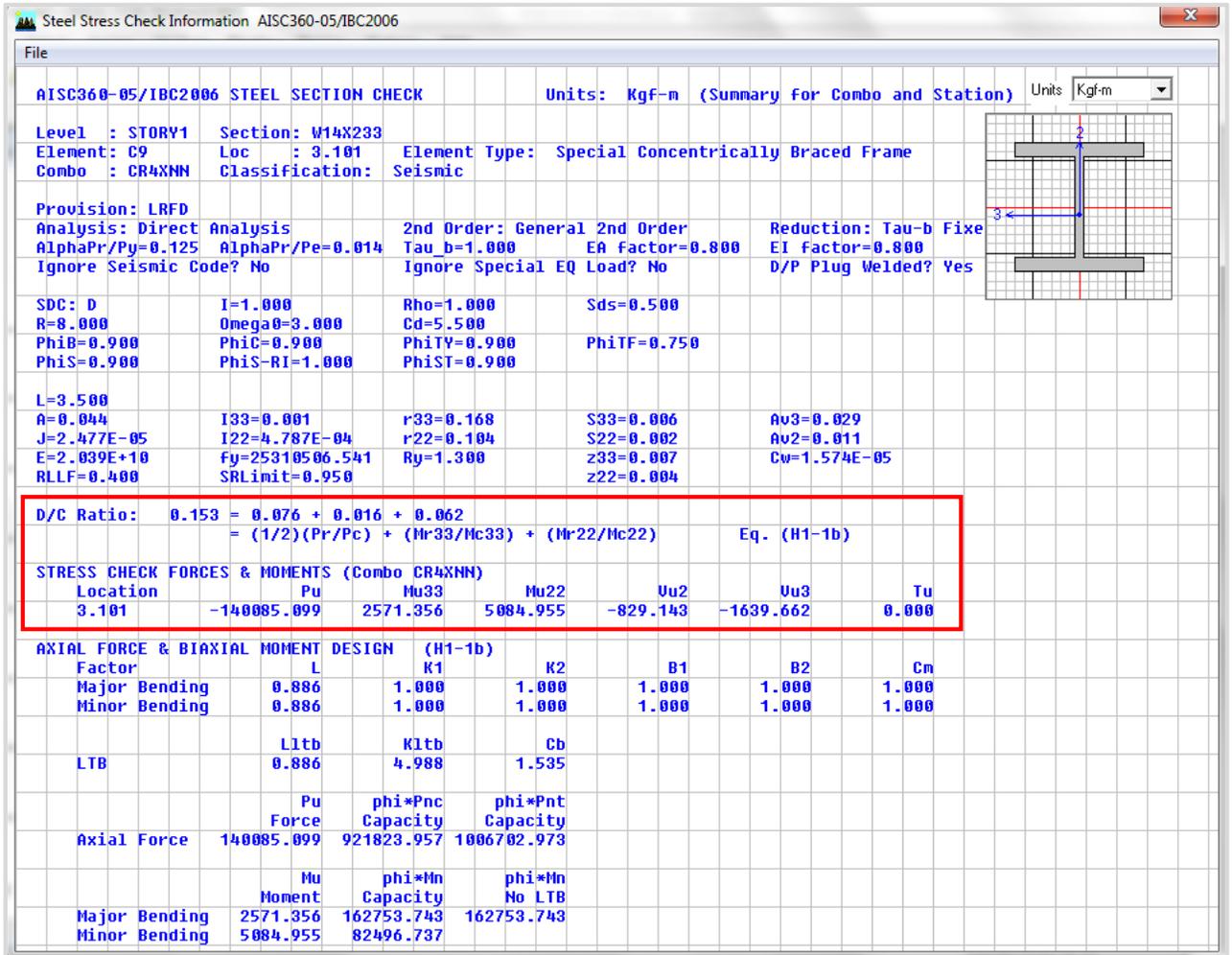
Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-10 Resumen de diseño de columna crítica edificio sin disipadores



Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-11 Resumen de diseño de columna crítica edificio con disipadores



Fuente: Elaboración propia (2015)

Entre los aspectos que el programa emplea para el diseño de las piezas, uno importante es la relación demanda capacidad del elemento, el cual representa el porcentaje de esfuerzo al que está sometido. En la figura 6-10 se muestra el resumen de diseño que despliega el programa para una columna que es parte de la estructura sin disipadores; y posteriormente en la figura 6-11 se muestra el resumen de diseño para el mismo elemento pero perteneciente a la estructura con disipadores. En un recuadro rojo, se indica la relación demanda capacidad de los

elementos seleccionados, la cual se obtiene a partir de la carga axial y los momentos a los cuales está sometida cada pieza. Para lograr una mejor comparación, los resultados corresponden a la misma combinación de carga, en este caso por sismo en sentido X; sin embargo es importante destacar que en algunos casos la combinación crítica de diseño cambia entre el edificio con y sin disipadores, incluso puede pasar de una combinación sísmica a una gravitacional, esto debido a que la existencia del disipador disminuye significativamente la carga que recibe la columna debido a sismo.

En la tablas 6-7 y 6-8 se puede observar una comparación de las cargas axiales y momentos a los cuales están sometidas las columnas que forman parte de un marco arriostrado en el sentido Y. En la tabla la columna '*Comb*' representa la combinación de carga que se está comparando, '*Pu*' indica la carga axial, '*Mu33*' indica el momento en sentido vertical, y '*Mu22*', el momento en sentido horizontal. Y por último '*D/C*' indica la relación demanda capacidad a la cual se somete la pieza. Estos elementos corresponden a las columnas de los marcos arriostrados, tanto en sentido X como sentido Y.

Tabla 6-7 Comparación de resultados de diseño de columnas en X

Nivel	Pieza	Comb.	Edificio sin disipadores				Edificio con disipadores			
			Pu (Ton)	Mu33 (Ton-m)	Mu22 (Ton-m)	D/C	Pu (Ton)	Mu33 (Ton-m)	Mu22 (Ton-m)	D/C
1	w14x233	CR4X(-/-)	336.56	3.55	5.21	0.441	140.90	2.57	5.09	0.153
2	w14x233	CR4X(-/+)	294.59	5.01	10.87	0.461	121.86	3.47	10.33	0.212
3	W14x145	CR4X(-/+)	549.68	0.00	0.00	1.010	101.96	3.32	6.75	0.263
4	W14x145	CR4X(+/-)	196.31	5.16	10.99	0.598	82.50	3.19	9.90	0.307
5	w14x68	CR4X(-/+)	335.07	0.00	0.00	1.380	63.62	1.98	3.95	0.557
6	w14x68	CR4X(+/-)	103.95	4.24	0.04	1.014	46.34	2.22	7.05	0.654
7	W14x34	CR4X(+/-)	50.92	2.04	2.20	1.100	28.94	1.12	2.98	0.791
8	W14x34	CR4X(-/-)	14.85	3.13	2.83	0.940	13.71	1.79	2.45	0.771

Fuente: Elaboración propia (2015)

Tabla 6-8 Comparación de resultados de diseño de columnas en Y

Nivel	Pieza	Comb.	Edificio sin disipadores				Edificio con disipadores			
			Pu (Ton)	Mu33 (Ton-m)	Mu22 (Ton-m)	D/C	Pu (Ton)	Mu33 (Ton-m)	Mu22 (Ton-m)	D/C
1	W14x257	CR4Y(+/+)	302.45	6.87	1.78	0.345	153.71	0.00	0.00	0.150
2	W14x257	CR4Y(+/+)	288.91	8.88	3.31	0.357	134.08	8.05	3.05	0.143
3	W14x176	CR4Y(-/+)	255.81	7.53	2.60	0.479	112.88	4.40	3.13	0.173
4	W14x176	CR4Y(+/+)	217.65	9.25	3.93	0.450	93.62	8.45	3.20	0.193
5	W14x109	CR4Y(-/+)	380.16	0.00	0.00	1.010	73.29	5.79	2.36	0.246
6	W14x109	CR4Y(+/-)	119.52	8.53	4.68	0.530	53.14	6.67	4.08	0.279
7	W14x43	CR4Y(-/+)	117.92	0.00	0.00	0.847	33.14	5.46	1.05	0.569
8	W14x43	CR4X(-/-)	15.68	4.88	3.22	0.740	15.10	4.68	2.36	0.597

Fuente: Elaboración propia (2015)

Para tener una mejor idea del cambio en los esfuerzos, a continuación se muestra el porcentaje en que se redujo la relación D/C en cada elemento,

Tabla 6-9 Reducción en relación D/C de columnas

Nivel	Pieza	Reducción de esfuerzo, X	Pieza	Reducción de esfuerzo, Y
1	w14x233	65%	W14x257	57%
2	w14x233	54%	W14x257	60%
3	W14x145	74%	W14x176	64%
4	W14x145	49%	W14x176	57%
5	w14x68	60%	W14x109	76%
6	w14x68	36%	W14x109	47%
7	W14x34	28%	W14x43	33%
8	W14x34	18%	W14x43	19%
Promedio		48%		52%

Fuente: Elaboración propia (2015)

Además de las columnas, las riostras también son elementos importantes del sistema de resistencia lateral. Para observar como la presencia del disipador cambia el comportamiento de estos elementos diagonales, en las figuras 6-13 y 6-14, se muestran los resultados de análisis para una riostra ubicada en el primer nivel.

Figura 6-12 Resumen de diseño de riostra crítica edificio sin disipadores

Steel Stress Check Information AISC360-05/IBC2006						
File						
AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK Units: Kgf-m (Summary for Combo and Station) Units: Kgf-m						
Level : STORV1	Section: 6X6X0.5					
Element: D2	Loc : 2.305	Element Type: Special Concentrically Braced Frame				
Combo : CR4XNP	Classification: Seismic					
Provision: LRFD						
Analysis: Direct Analysis		2nd Order: General 2nd Order		Reduction: Tau-b Fixe		
AlphaPr/Py=0.637 AlphaPr/Pe=0.519		Tau_b=0.925 EA Factor=0.800		EI Factor=0.800		
Ignore Seismic Code? No		Ignore Special EQ Load? No		D/P Plug Welded? Yes		
SDC: D	I=1.000	Rho=1.000	Sds=0.500			
R=8.000	Omega0=3.000	Cd=5.500				
PhiB=0.900	PhiC=0.900	PhiTV=0.900	PhiTF=0.750			
PhiS=0.900	PhiS-RI=1.000	PhiST=0.900				
L=4.610						
A=0.007	I33=2.327E-05	r33=0.057	S33=3.054E-04	Av3=0.004		
J=3.463E-05	I22=2.327E-05	r22=0.057	S22=3.054E-04	Av2=0.004		
E=2.039E+10	fy=25310506.541	Ry=1.300	z33=3.728E-04			
RLLF=1.000	SRLimit=0.950	z22=3.728E-04				
HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No						
D/C Ratio: 1.010 = 0.996 + 0.014 + 0.000 = (Pr/Pc) + (8/9)(Mr33/Mc33) + (8/9)(Mr22/Mc22) Eq. (H1.3a,H1-1a)						
STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo CR4XNP)						
Location	Pu	Mu33	Mu22	Uu2	Uu3	Tu
2.305	-114438.890	132.618	0.000	0.000	0.000	0.034
AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1.3a,H1-1a)						
Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cn
Major Bending	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Minor Bending	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Lltb	Kltb	Cb			
LTB	1.000	1.000	1.316			
	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity			
Axial Force	114438.890	114939.164	161660.331			
	Mu	phi*Mn Capacity	phi*Mn No LTB			
Major Bending	132.618	8492.311	8492.311			
Minor Bending	0.000	8492.311				

Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-13 Resumen de diseño de columna crítica edificio con disipadores

Steel Stress Check Information AISC360-05/IBC2006

File AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK Units: Kgf-m (Summary for Combo and Station) Units: Kgf-m

Level : STORY1 Section: 6X6X0.5
 Element: D2 Loc : 0.000 Element Type: Special Concentrically Braced Frame
 Combo : CR5XNN Classification: Seismic

Provision: LRFD
 Analysis: Direct Analysis 2nd Order: General 2nd Order Reduction: Tau-b Fixed
 AlphaPr/Py=0.074 AlphaPr/Pe=0.060 Tau_b=1.000 EA factor=0.800 EI Factor=0.800
 Ignore Seismic Code? No Ignore Special EQ Load? No D/P Plug Welded? Yes

SDC: D I=1.000 Rho=1.000 Sds=0.500
 R=0.000 Omega=3.000 Cd=5.500
 PhiB=0.900 PhiC=0.900 PhiTY=0.900 PhiTF=0.750
 PhiS=0.900 PhiS-RI=1.000 PhiST=0.900

L=4.610
 A=0.007 I33=2.327E-05 r33=0.057 S33=3.054E-04 Av3=0.004
 J=3.463E-05 I22=2.327E-05 r22=0.057 S22=3.054E-04 Av2=0.004
 E=2.039E+10 Fy=25310506.541 Ry=1.300 z33=3.728E-04
 RLLF=1.000 SRLimit=0.950 z22=3.728E-04

HSS Welding: ERM Reduce HSS Thickness? No

D/C Ratio: 0.115 = 0.115 + 0.000 + 0.000
 = (Pr/Pc) + (Mr33/Mc33)^2 + (Mr22/Mc22) Eq. (H1.3b,H1-2)

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo CR5XNN)

Location	Pu	Mu33	Mu22	Uu2	Uu3	Tu
0.000	-13213.136	0.000	0.000	-60.039	0.000	0.000

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1.3b,H1-2)

Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm
Major Bending	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Minor Bending	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

LTB

	Lltb	Kltb	Cb
LTB	1.000	1.000	1.316

	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity
Axial Force	13213.136	114939.164	161660.331

	Mu Moment	phi*Mn Capacity	phi*Mn No LTB
Major Bending	0.000	8492.311	8492.311
Minor Bending	0.000	8492.311	

Fuente: Elaboración propia (2015)

En modo de resumen, en las tablas 6-12 y 6-13, se presentan los resultados de las riostras en sentido X y en sentido Y, respectivamente. Es importante destacar que las riostras son elementos con la función de transmitir la carga sísmica por medio de carga axial a las columnas y posteriormente a la cimentación, por lo tanto en dichas tablas, a diferencia de las columnas, únicamente se muestra la carga Pu, se compara la relación demanda capacidad, y en la misma tabla se compara la reducción de los esfuerzos debido a la implementación de los disipadores. En este caso se tomó la carga axial crítica independientemente de la combinación.

Tabla 6-10 Comparación de resultados de diseño de riostras en X

Nivel	Elemento	Edificio sin disipadores		Edificio con disipadores		Reducción de esfuerzo, X
		Pu (Ton)	D/C	Pu (Ton)	D/C	
1	HSS6X6X.5	114.43	1.010	13.21	0.115	88%
2	HSS5X5X.5	95.16	0.842	11.71	0.102	88%
3	HSS5X5X.5	75.49	0.965	5.79	0.073	92%
4	HSS5X5X.5	65.12	0.835	5.06	0.064	92%
5	HSS5X5X.5	59.92	0.770	4.53	0.057	92%
6	HSS5X5X.5	49.64	0.640	3.73	0.047	92%
7	HSS5X5X.5	51.42	0.660	3.46	0.043	93%
8	HSS5X5X.5	33.96	0.440	2.12	0.032	94%
						92%

Fuente: Elaboración propia (2015)

Tabla 6-11 Comparación de resultados de diseño de riostras en Y

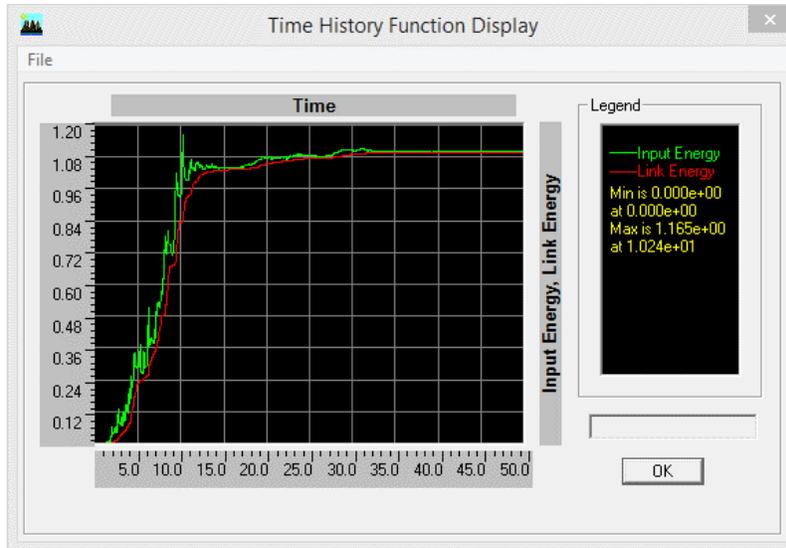
Nivel	Elemento	Edificio sin disipadores		Edificio con disipadores		Reducción de esfuerzo, Y
		Pu (Ton)	D/C	Pu (Ton)	D/C	
1	HSS6X6X.5	114.43	1.010	8.01	0.070	93%
2	HSS6X6X.5	95.16	0.842	7.47	0.065	92%
3	HSS5X5X.5	75.49	0.965	6.54	0.092	91%
4	HSS5X5X.5	65.12	0.835	6.70	0.084	90%
5	HSS5X5X.5	59.93	0.770	6.93	0.087	88%
6	HSS5X5X.5	49.64	0.640	6.39	0.080	87%
7	HSS5X5X.5	51.42	0.663	6.47	0.081	87%
8	HSS5X5X.5	33.96	0.443	5.32	0.067	84%
						89%

Fuente: Elaboración propia (2015)

6.2.5. Absorción de energía

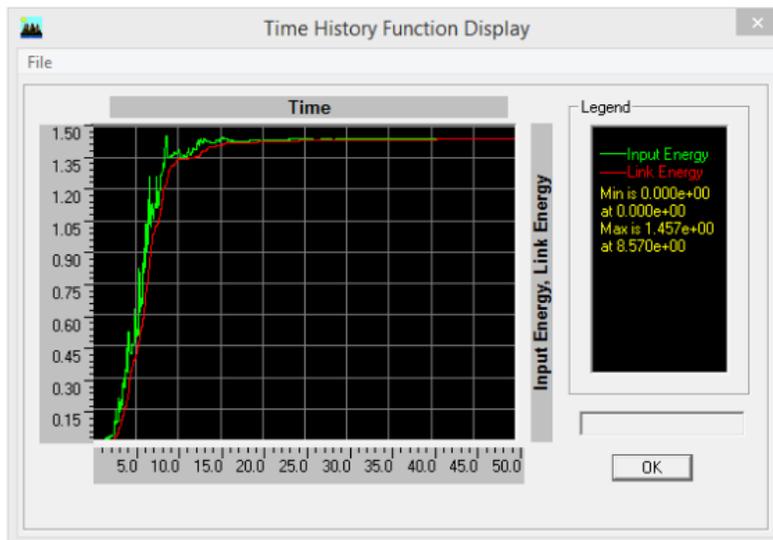
Además de la deformación, el programa ETABS, permite extraer gráficos donde se interpreta la energía de entrada de la estructura causada por el sismo, y compararla con la energía que toma el disipador.

Figura 6-14 Energía de entrada vs energía disipada por el dispositivo en X



Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-15 Energía de entrada vs energía disipada por el dispositivo en Y

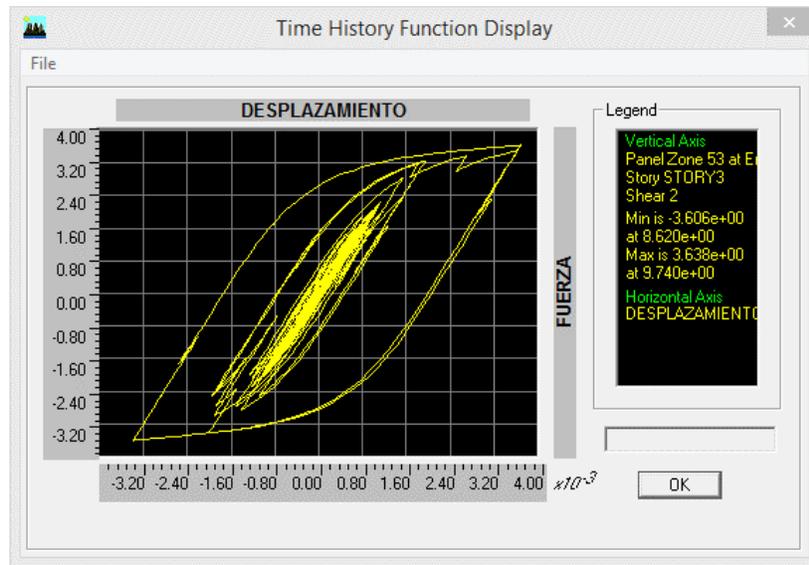


Fuente: Elaboración propia (2015)

6.2.6. Ciclos de histéresis de los disipadores

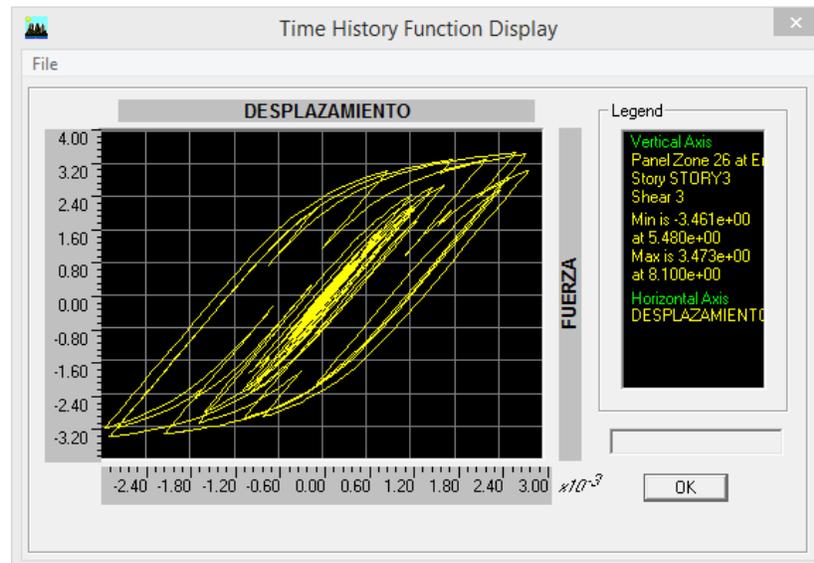
Del análisis tiempo-historia de la estructura con disipadores es posible obtener diagramas de histéresis de los disipadores.

Figura 6-16 Ciclo de histéresis de un disipador de 6 placas en sentido X



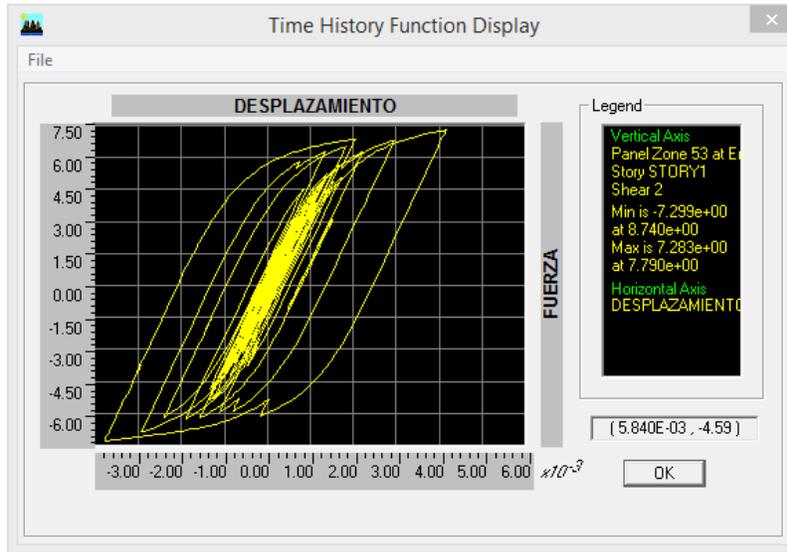
Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-17 Ciclo de histéresis de un disipador de 6 placas en sentido Y



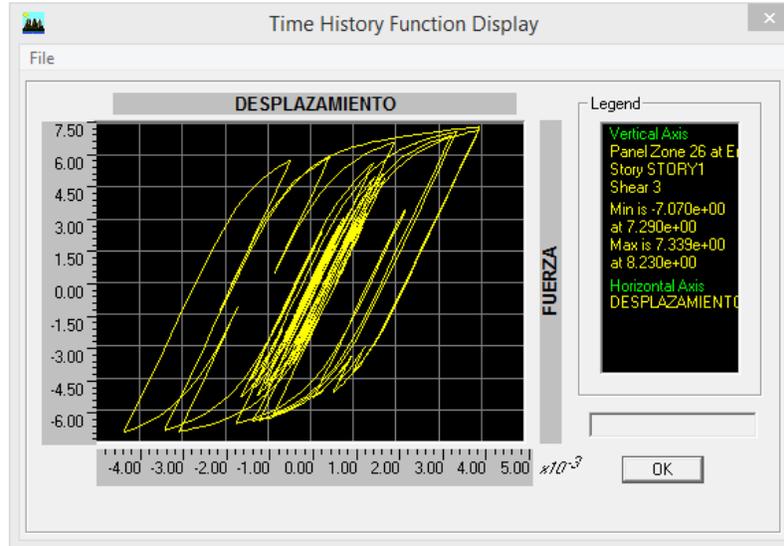
Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-18 Ciclo de histéresis de un dissipador de 12 placas en sentido X



Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 6-19 Ciclo de histéresis de un dissipador de 12 placas en sentido Y



Fuente: Elaboración propia (2015)

6.3. Implicaciones de Costos

El uso de disipadores de energía histeréticos en una estructura representa ciertas ventajas, respecto a una estructura convencional. Sin embargo en el tema de costos es difícil realizar un análisis muy profundo debido a que no es una tecnología que se haya aplicado en Guatemala. En el corto plazo representa un gasto mayor, debido a que los disipadores serán elementos adicionales a los elementos estructurales principales. Sin embargo cómo fue posible constatar en los resultados de la investigación, los esfuerzos en las piezas se ven reducidos, porque el disipador toma parte de la energía del sismo. Por lo que si fuera posible optimizar las piezas y reducir los tamaños, representaría una reducción del costo total de la estructura. Esto representa una dificultad debido a que no se cuenta con una normativa nacional, por lo que no hay parámetros de diseño para Guatemala, por lo que sería necesario adaptar una norma extranjera.

Además es importante destacar que, el objetivo de los disipadores no es reducir el costo de la edificación, sino que disminuir el daño de la estructura en caso de un sismo. Esto reduce los costos de reparación, respecto al costo de reparar una estructura convencional, además de no ser necesario demolerla sino únicamente sustituir los dispositivos, protegiendo el capital inicia. Otro aspecto importante es que al reducir la vibración, también se reduce el daño a elementos no estructurales del edificio como fachadas, cerramientos, cielos falsos, ventanerías, mobiliario, entre otros, lo cual representa altos costos en reparación y sustitución después de un evento sísmico.

La empresa chilena SIRVE (Seismic Protection Technologies), es pionera en la investigación y fabricación de sistemas de protección sísmica en el país sudamericano. Ellos presentan como referencia, entre *US\$6* y *US\$10* dólares por metro cuadrado el costo de sistemas de disipación histeréticos (Alvarez, 2010). Esto proporcionalmente da aproximadamente entre un 4% y un 7% el costo de los disipadores respecto a la estructura. Este no es un precio exageradamente alto, tomando en consideración las ventajas a largo plazo que representa.

6.4. Discusión de resultados

La inclusión de disipadores histeréticos tipo ADAS 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. En términos de la deformación máxima se logró reducir un 44% en sentido X y un 30% en sentido Y; obteniendo un promedio de 37% de disminución al implementar los disipadores de energía.

Estos resultados se determinaron mediante un análisis tiempo-historia, y a pesar que este procedimiento puede considerarse más preciso respecto al método lineal, representa el gran inconveniente que en Guatemala no existen registros de los sismos más significativos ocurridos durante la historia del país, lo cual hace necesario adecuar registros de otros países con características de sitio similares al país. Particularmente en esta investigación generó el problema de seleccionar el registro que mejor se adecuara a las condiciones nacionales, para lo cual se optó por el evento de Managua, Nicaragua de 1972. Además es importante destacar que no se cumplió con los requisitos de ASCE de por lo menos tres registros, en parte debido a la falta de disponibilidad de registros ya mencionada, y también porque el objetivo de la investigación no era desarrollar el diseño exhaustivo de la estructura, sino únicamente analizar el comportamiento de una estructura con disipadores, para lo cual es suficiente con un registro. En caso de un diseño, únicamente es necesario obtener tres o más registros, y establecer los valores pertinentes necesarios más críticos para el diseño; sin embargo la metodología es la misma que se plantea en esta investigación.

La metodología empleada permitió observar claramente la diferencia de comportamiento entre el caso con disipadores y el caso sin éstos. 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 atenúa con el tiempo, lo cual es

un indicador que el disipador fluyó y está trabajando. Esto se observó de las gráficas de deformación en el tiempo obtenidas del ETABS.

Las gráficas de absorción de energía permiten observar la gran cantidad de energía de entrada por causa de un sismo que toman los disipadores. Este es un parámetro importante, porque es una forma de representar la reducción en el daño de las piezas estructurales principales, que ya no deben disipar esta gran cantidad de energía mediante esfuerzos internos, y la incursión en el rango no elástico, en otras palabras en daño no reparable.

Otro aspecto que se evaluó fue el cambio en los esfuerzos de las piezas, cuando se implementan disipadores ADAS. Se evaluó dos elementos columnas y riostras, en los marcos arriostrados tanto en sentido Y como X. En el caso de columnas se observó una reducción de los esfuerzos, traducido en la relación *Demanda-Capacidad*, de un 48% en X, y de un 52% en Y, dando como resultado un 50% de reducción promedio. Esto permite observar que el disipador, absorbe un significativo porcentaje de la carga sísmica, lo cual reduce la exigencia de los elementos estructurales. Otro aspecto observado, es que aunque los esfuerzos fueron comparados con combinaciones de carga sísmica, cuando se implementan los disipadores, en la mayoría de casos la combinación crítica es debido a carga gravitacional.

En el caso de las riostras se observó un 92% en X y un 89% en Y, lo cual da como resultado un 91% de reducción promedio de esfuerzos. En este caso lo importante es destacar, que las riostras dejan de funcionar como elementos rigidizantes que proveen resistencia lateral a la estructura, para ser únicamente parte del arreglo en el que se instala el disipador, permitiendo la disipación de energía al existir desplazamiento entre las riostras y la viga superior. A pesar de esto, las riostras representan un mecanismo alternativo de resistencia lateral, en caso los disipadores no trabajen como fueron diseñados.

7. CONCLUSIONES

- 7.1.** Según los resultados obtenidos en promedio se redujo un 37% la deformación de la estructura al implementar disipadores de energía ADAS en la edificación.
- 7.2.** Al comparar los esfuerzos en las columnas de los marcos arriostrados, sin y con disipadores, se pudo apreciar una reducción promedio de un 50% de la exigencia en las piezas cuando se implementan los disipadores. La causa de esto es la absorción de la carga sísmica por parte del disipador, lo cual disminuye las cargas a las cuales se someterán las piezas debido a carga lateral.
- 7.3.** En el caso de las riostras la disminución de esfuerzos fue de 91% por carga lateral lo cual permite observar que las mismas ya no funcionan como elementos rigidizantes para la estructura, y su función es formar el arreglo en el cual se monta el disipador, permitiendo que este sufra deformación, produciendo la disipación de la energía.
- 7.4.** Se obtuvo mejores resultados de deformaciones de la estructura, concentrando una gran rigidez en los dos primeros niveles, y reduciéndola en los niveles superiores. Esto se logró mediante la reducción del número de placas en cada disipador, lo cual además representa una disminución del costo de los dispositivos que serán empleados en los niveles superiores.
- 7.5.** Los programas comerciales de análisis y diseño estructural disponibles para los ingenieros, representan una importante herramienta que permite facilitar los procesos, y realizar ejercicios académicos como el de la presente investigación.

- 7.6.** A pesar de que las técnicas de control de vibraciones pasivas no se han aplicado aún en el país, pueden representar una opción viable para la reparación de estructuras ya existentes. Especialmente, tomando en cuenta que en Guatemala, muchas edificaciones existentes no se construyeron con las normativas actuales, por lo que se hace necesario realizar una actualización estructural, la cual permita, que cumplan con los requisitos actuales, o por lo menos estén lo suficientemente cerca para considerarse seguras.
- 7.7.** El análisis tiempo historia permitió observar de forma gráfica la parte de la energía de entrada que es tomada por los disipadores mediante gráficos, que hacen más fácil la interpretación de los resultados. Esto se da como consecuencia de la fluencia del material con el que fue fabricado el dispositivo disipador, lo cual representa un daño significativo en el mismo, haciendo necesario su reemplazo después de un sismo.
- 7.8.** La reducción de la deformación es un indicador de una disminución en el daño de las piezas posterior a un sismo, debido a que el disipador incurre en el rango elástico, logrando disipar energía, y permitiendo que las piezas estructurales se mantengan en el rango elástico.
- 7.9.** La reducción en la deformación de la estructura, es importante cuando se pretende proteger la estructura secundaria, o sea todos aquellos elementos que pertenecen a la edificación pero que no son parte del sistema de resistencia, como ventanería, fachadas, muros tabiques, etc. Estos generalmente son costosos, y en caso de sismo, representan graves daños, e incluso un alto riesgo de dañar a las personas ocupen el edificio.

8. RECOMENDACIONES

- 8.1.** Es importante tomar en cuenta que los resultados obtenidos en esta investigación, mediante un análisis no lineal tiempo historia, son resultados más conservadores que lo que se obtendrían con un procedimiento no lineal más riguroso. Sin embargo son resultados válidos, que permiten analizar la alteración del comportamiento de la estructura al implementarle los disipadores de energía.
- 8.2.** Debido a que las piezas sufrieron una reducción de sus esfuerzos, cuando son implementados los disipadores de energía en la estructura, se podría realizar una optimización en las piezas, dando como resultado una estructura más ligera y por ende más económica. Para esto es necesario cumplir con los requisitos de diseño de una estructura con disipadores, establecidos en la normativa ASCE 7-10, debido a que no existe una normativa nacional.
- 8.3.** En caso se desee diseñar un edificio con disipadores, es importante obtener resultados de pruebas experimentales por parte del fabricante para el dispositivo específico a emplear; esto debido a que la aproximación del comportamiento de los dispositivos empleada en esta investigación es teórica, y el uso de resultados reales permitirá obtener resultados más precisos respecto al funcionamiento de los disipadores ante un sismo.
- 8.4.** Es importante que las instituciones educativas y gubernamentales, generen conciencia acerca del riesgo sísmico latente en el país, y de la importancia de llevar a cabo procedimientos de análisis que sean precisos, y cumplir con las normativas vigentes, para obtener diseños que se comporten de forma segura al ser sometidos a eventos sísmicos de gran magnitud.

- 8.5.** Debido a que no existe una normativa nacional que rijan los diseños de estructuras con disipadores de energía, la precisión de la metodología de análisis puede estar en discusión, y limitada de forma significativa al no existir un consenso en el cual basarse para diseñar estas edificaciones. Por lo que se recomienda basarse en normas internacionales, por ejemplo la de ASCE 7-10; sin embargo depende del proyectista decidir cuál es el procedimiento más adecuado en base a los objetivos que desee cumplir.
- 8.6.** Es necesario generar una norma nacional, o una adaptación de una norma extranjera para las condiciones de Guatemala, 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 para el diseño de estructuras y para la reparación de estructuras existentes.
- 8.7.** Es importante implementar con equipo digital al INSIVUMEH para el registro de sismos, para poder generar una base de datos con los acelerogramas de los eventos sísmicos más importantes que sucedan en el futuro, y tenerlos a disposición para su aplicación en la ingeniería estructural.

9. REFERENCIAS

- Alvarez, M. (2010). *Aislamiento Sísmico y Disipación de Energía en Chile. III Congreso A.I.C.E.* Guadalajara, México : SIRVE Seismic Protection Technologies.
- American Society of Civil Engineers. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Others Structures (ASCE/SEI 7-10)*.
- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. (2010). *Normas de Seguridad Estructural de Edificaciones y Obras de Infraestructura para la República de Guatemala.* Guatemala.
- Avilés, R. (2001). *Dispositivos para el Control de Vibraciones.* Valdivia, Chile: Tesis inédita. Universidad Austral de Chile.
- Boza, E., y Galán, D. (2013). *Diseño de un Edificio Aporticado con Disipadores en arreglo Chevron.* Lima, Perú: Tesis Inédita. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Bozzo, L., y Barbat, A. (2000). *Diseño Sismorresistente de Edificios. Técnicas convencionales y avanzadas.* Barcelona : Reverté, S.A.
- Computers and Structures Inc. (2005). *Software Verification Example ETABS.* Berkeley, California, USA: CSI.
- Cruz, D. (2014). *Control de derivas en marcos de concreto reforzado, utilizando disipadores de energía.* Guatemala, Guatemala: Tesis inédita. Universidad Mariano Gálvez.
- De la Llera, J., Esguerra, C., y Almazán, J. (2003). *Earthquake Behavior of Structures with Copper Energy Dissipators.* Santiago, Chile: Department of Structural and Geotechnical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Espejel , O. (2013). *Estudio Analítico del Comportamiento de una Estructura Reforzada con Disipadores Pasivos de Energía*. México, D.F.: Tesis Inédita. Universidad nacional autónoma de México.
- Federal Emergency Management Agency of the Department of Homeland Security. (2006). *FEMA 451 NEHRP Recommended Provisions: Design Example* . Washington D.C., U.S.A.: National Institute of Buildings Science .
- Foti, D., Bozzo, L., y López-Almansa, F. (1998). Numerical efficiency assessment of energy dissipators for seismic protection of buildings.
- García , L. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico* . Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Gatica, V. (2012). *Respuesta Sísmica de un Edificio de Estructura Metálica con Aisladores, alternativas de diseño*. Madrid, España: Tesis inédita. Universidad Politécnica de Madrid.
- Grajales, E. (2003). *Comportamiento Dinámico de los Edificios Provistos con Disipadores de Energía*. Nuevo León, México: Tesis Inédita. Univesidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil.
- Hanson, R., Xia , C., y Su , Y. (1992). Design of Supplemental Steel Damping Devices for Buildings. *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*. Balkema, Rotterdam. Obtenido de http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10_vol7_4139.pdf
- International Organization for Standarization . (2001). *ISO 3010 International Standard Based for Design of Structures - Seismic Actions on Structures* . Estados Unidos .
- Keyhani , A., Pourmohammad , H., y Sajjadi, S. (2,008). *Behavior and Performance of Structures Equipped with ADAS y TADAS Dampers (a comparison with Conventional Structures)*. Beijing, China: The 14th World Conference on Earthquake Engineering.

- Monzón, A. (2013). *Selección y adecuación de acelerogramas sísmicos para análisis de estructuras con ejemplos para el Valle de Guatemala*. Guatemala : Tesis inédita. Universidad de San Carlos de Guatemala .
- Prato, C., Ceballos, M., y Pinto, F. (2013). *Método Modal Espectral*. Cátedra de Análisis Estructural. Carrera de Ingeniería Civil.
- Reyes , J., y Rubiano, N. (2,002). *Modelación Inelástica de Edificios con Disipadores de Energía Histeréticos*. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.
- Sáez, A. (2014). *Evaluación del método de análisis modal espectral para edificios con sistemas pasivos de disipación de energía utilizando registros sísmicos chilenos*. Santiago, Chile: Tesis inédita. Universidad de Chile.
- Soni, A., y Sanghvi, C. (s.f.). *Mathematical Modelling of ADAS Damper Element and Non-Linear Time History Analysis of SDOF Steel Structure using ETABS*. Obtenido de TechnicalJorunalsonline.com.
- Symans , M. (2008). *Energy Dissipation Systems for Seismic Application: Current Practice and Recent Developments*. Journal of Structural Engineering.
- Tena, A. (1993). Determinación analítica de la rigidez lateral de los dispositivos tipo ADAS. *Memoria del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México,, 1993*. México DF: Centro de Investigación Sísmica A.C.
- Vidal, M. (2008). *Análisis y Diseño de Estructuras con Disipadores de Energía Metálicos en Base a Criterios de Desempeño*. Valdivia, Chile: Tesis Inédita. Universidad Austral de Chile.
- Villagra, R. (2011). *Aplicación de disposiciones de norma chilena en estudio para diseño con disipadores de energía*. Santiago, Chile: Tesis inédita. Universidad de Chile.

- Villareal, G., y Oviedo, R. (2008). *Edificaciones con Disipadores de Energía* . Lima, Perú : Premio Nacional ANR.
- Whittaker, A., Bertero, V., y Alonso, J. (1989). *Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements*. California : Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.

10. ANEXOS

10.1. Glosario

Acelerograma	Registro de las aceleraciones del suelo en un sitio en un intervalo de tiempo, durante un evento sísmico.
AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica
Amortiguamiento	Capacidad de un sistema o cuerpo de disipar energía cinética, transformándola en otro tipo de energía (por ejemplo térmica)
Amortiguamiento crítico	Corresponde a la tendencia más rápida hacia la situación de equilibrio de un oscilador amortiguado. Ocurre cuando el coeficiente de amortiguamiento es igual a la frecuencia de resonancia sin amortiguamiento del oscilador.
ASCE	American Society of Civil Engineers (Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles)
Curva de histéresis	Gráfica que muestra el deterioro de la relación entre la deformación y la carga aplicada de un material.
Demanda de ductilidad	Relación entre la deformación de una estructura durante el sismo y el desplazamiento que produce el inicio de las plastificaciones.

Deriva	Relación de desplazamiento relativo entre un nivel y el nivel inferior o superior de una estructura, debido a una carga lateral.
Disipador de energía	Artefacto que tiene el objetivo de absorber la energía de entrada de una estructura, debido a un evento sísmico, reduciendo la demanda de disipación de energía por ductilidad en los miembros estructurales principales.
Ductilidad	Propiedad de un material o estructura que permite la redistribución de los esfuerzos en miembros continuos y en puntos altos de esfuerzos locales, logrando que se deforme sosteniblemente sin llegar al colapso.
Disipador dependiente de la deformación	Dispositivos disipadores cuya fuerza desarrollada está en función de la deformación. Incluye disipadores friccionales e hysteréticos.
Disipador dependiente de la velocidad	Dispositivo cuya relación fuerza-deformación depende de la velocidad de deformación relativa entre los extremos del disipador. Incluye disipadores viscosos y visco-elásticos.
Elasticidad	Es la capacidad de un material de volver a sus dimensiones originales, después de que se haya retirado una fuerza impuesta, recobrando su forma original, antes de la aplicación de la carga.

FEMA	Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal de Manejo de Emergencias)
Histéresis	Tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.
Intensidad	Es un parámetro que describe los daños producidos por un sismo, en edificios y estructuras, así como sus consecuencias sobre el terreno y los efectos sobre las personas.
Magnitud	Es la medida del total de la energía liberada durante un sismo, fue introducido por Richter en 1935.
PGA	Peak Ground Acceleration (Aceleración pico del suelo)
PGV	Peak Ground Velocity (Velocidad pico del suelo)
Pseudo-aceleracion	Aceleración aproximada obtenida a partir del espectro de desplazamientos de un sistema vibratorio de un grado de libertad.
Rigidez	Es la razón entre un esfuerzo determinado y un valor correspondiente de deformación unitaria que produce, está asociada a las propiedades del material y a la geometría de un elemento.

Riostra	Elemento constructivo que colocado diagonalmente permite asegurar la inmovilidad o evitar la deformación de otros elementos de una estructura. También se conocen como contraventeos o breizas.
Rotula plástica	Estado plástico que alcanzan todas las fibras de un elemento estructural al producirse una articulación en la sección transversal del mismo.
Sismicidad	Distribución espacio-tiempo de los terremotos en la Tierra y de sus efectos destructivos, obtenidos a partir de la recopilación histórica de los datos.
Somero	Superficial, o muy cerca de la superficie.

10.2. Construcción del espectro genérico de diseño según AGIES

El procedimiento para la construcción del espectro de respuesta genérico aplicable para Guatemala, está detallado en el código AGIES NSE. Sin embargo para mayor facilidad, a continuación se describirán los pasos necesarios para definir dicho espectro, tomando como base la normativa mencionada.

Primero se seleccionan los parámetros S_{cr} , S_{1r} e I_o , según la ubicación del proyecto en la República de Guatemala, y cuyos valores están en el anexo A de la norma AGIES NSE2-2010. A continuación se presentan los valores correspondientes a la Ciudad de Guatemala.

$$S_{cr} = 1.50g$$

S_{cr} Representa la ordenada espectral de período corto.

$$S_{1r} = 1.50g$$

S_{1r} Representa la ordenada espectral con período de 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés

$$I_o = 4$$

I_o Representa el Índice de sismicidad del lugar.

Posteriormente es necesario establecer la categoría de importancia de la obra según AGIES NSE-1, y con esto establecer el nivel de protección sísmica, mediante la tabla 4-1 de AGIES NSE-2. En el caso estudiado se definió al edificio de ejemplo como una obra *importante*.

Tabla 10-1 Nivel mínimo de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño

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

Fuente: AGIES NSE-2 (2010)

Los valores de aceleración en basamento, son modificados por las condiciones del suelo en el sitio. Se asume un tipo D, ya que es el que se encuentra generalmente en las zonas más superficiales del valle de Guatemala, y posteriormente se define los Coeficientes de Sitio, F_a y F_v :

$$F_a = 1.00 \text{ (Tabla 4-2, AGIES NSE-2)}$$

F_a Es el coeficiente de sitio para períodos de vibración cortos.

Tabla 10-2 Coeficiente de Sitio F_a (Tabla 4-2)

Clase de sitio	Índice de sismicidad				
	2a	2b	3a	3b	4
AB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
D	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	1.7	1.2	1.0	0.9	0.9
F	se requiere evaluación específica -- ver sección 4.4.1				

Fuente: AGIES NSE-2 (2010)

$$F_v = 1.50 \text{ (Tabla 4-3, AGIES NSE-2)}$$

F_v Es el coeficiente de sitio para períodos de vibración largos.

Tabla 10-3 Coeficiente de Sitio F_v (Tabla 4-3)

Clase de sitio	Índice de sismicidad				
	2a	2b	3a	3b	4
AB	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.0	1.8	1.7	1.6	1.5
E	3.2	2.8	2.6	2.4	2.4
F	se requiere evaluación específica -- ver sección 4.4.1				

Fuente: AGIES NSE-2 (2010)

Un factor importante para construir el espectro, es el factor de escala k , el cual considera la probabilidad de ocurrencia de los sismos. En la práctica se usan tres probabilidades.

- El 10% de probabilidad de que el valor de aceleración pueda ser excedido en 50 años, que es llamado sismo de servicio o sismo ordinario y contiene aceleraciones de sismos frecuentes.
- El 5% de probabilidad de que el valor sea excedido en 50 años, conocido como sismo severo.
- El 2% de probabilidad de que el valor de aceleración pueda ser excedido en 50 años. A este sismo se le llama sismo extremo o sismo máximo considerado.

El factor de escala depende de la clasificación de obra, según la norma AGIES NSE2-2010. En el caso de estudio se consideró una obra Importante. Por lo tanto el factor queda como:

- $K_d = 0.80$ para una probabilidad de ocurrencia de 5% en 50 años

Con estos datos es posible construir el espectro genérico de diseño, aplicando las siguientes ecuaciones:

$$S_{cs} = S_{cr} * Fa \text{ (sección 4.3.3.2)} \quad (37)$$

S_{cs} Es la ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con período de vibración corto.

$$S_{1s} = S_{1r} * kd \text{ (sección 4.3.3.2)} \quad (38)$$

S_{1s} Es la ordenada espectral correspondiente a períodos de vibración de 1 segundo

Los factores, también son modificados si existe alguna falla cercana, los factores están en función de la distancia del sitio a la falla y el tipo de fuente sísmica. En el caso de la ciudad, a pesar de que existen fallas cercanas al sitio, no existe suficiente información para determinar la tasa de sismicidad de las fallas, por lo que los factores son iguales a 1.

$$Na = 1,00 \text{ (tabla 4 - 6)} \quad (39)$$

$$Nv = 1,00 \text{ (tabla 4 - 7)} \quad (40)$$

$$S_{cs} = S_{cr} * Fa * Na \text{ (sección 4.3.3.3)} \quad (41)$$

$$S_{1s} = S_{1r} * Fv * Nv \text{ (sección 4.3.3.3)} \quad (42)$$

$$S_{cd} = S_{cs} * kd \text{ (sección 4.3.4.2)} \quad (43)$$

$$S1d = S1s * kd(\text{sección 4.3.4.2}) \quad (44)$$

Las aceleraciones espectrales de diseño están condicionadas por los siguientes valores:

$$Sa(T) = Scd \quad \text{si } T \leq Ts \quad (45)$$

$$Sa(T) = \frac{S1d}{T} \quad \text{si } T > Ts \quad (46)$$

El período de transición, T_s , es el que separa los períodos cortos de los largos y se define según:

$$\text{Donde } Ts = \frac{S1d}{Scd} = \frac{0,55g}{1g} = 0,55s \quad (47)$$

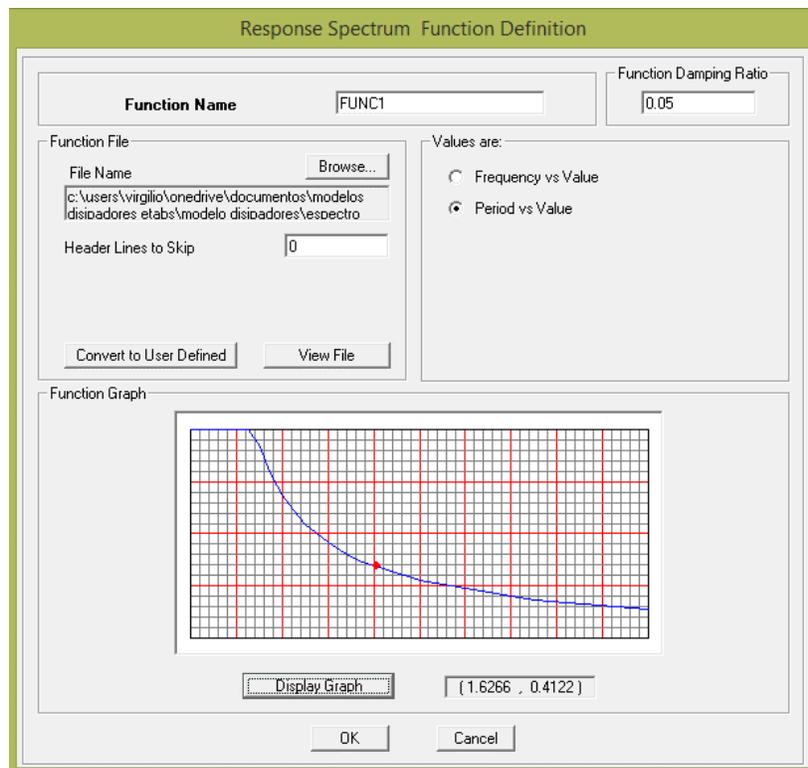
Por medio de las ecuaciones 42 y 43, es posible obtener diferentes aceleraciones espectrales para determinados valores del período, lo cual permite construir la gráfica del espectro de respuesta, la cual se mostró previamente en la figura 5-2, y en la tabla 5-5 se detallan los resultados obtenidos para la misma, ubicadas en el capítulo 5 de esta investigación.

10.3. Modelaje en ETABS

10.3.1. Análisis modal espectral

Cuando ya se ha modelado la geometría del edificio, y se han aplicado las cargas gravitacionales debido al uso de la estructura. Debe introducirse el espectro de respuesta, para lo cual se genera un archivo de texto con los resultados obtenidos del espectro de respuesta genérico de AGIES para la Ciudad de Guatemala, (según puede observarse en la figura 10-1).

Figura 10-1 Definición del espectro de respuesta en ETABS



Fuente: Elaboración propia (2015)

Para definir el espectro de respuesta en el ETABS, se siguen los siguientes pasos:

- *'Define'*
- *'Response Spectrum Function'*
- Se selecciona la opción *'Spectrum from file'*
- *'Add new function'*
- *'Browse'*, donde se busca la ubicación del archivo de texto
- Se selecciona la opción *'Period vs Value'*

Ya ingresado el espectro de respuesta es necesario definir los casos de sismo para lo cual se siguen los siguientes pasos:

- *'Define'*
- *'Response spectrum cases'*
- *'Add new spectrum case'*
- En la dirección que se desea definir se selecciona el espectro de respuesta
- Se ingresa el factor de escala

$$Scale Factor = \frac{g}{R} = \frac{9.81}{6} = 1.635$$

Donde

g La aceleración de la gravedad en m/s²

R Factor de reducción por ductilidad, correspondiente para el sistema de marcos de acero arriostrado.

- Es necesario definir un caso para cada dirección de análisis (X y Y)

Figura 10-2 Definición de casos de espectro de respuesta

Response Spectrum Case Data

Spectrum Case Name AGIESX

Structural and Function Damping

Damping 0.05

Modal Combination

CQC SRSS ABS GMC

f1 f2

Directional Combination

SRSS ABS Orthogonal SF

Input Response Spectra

Direction	Function	Scale Factor
U1	AGIESSPEI	1.635
U2		
UZ		

Excitation angle 0.

Eccentricity

Ecc. Ratio (All Diaph.) 0.

Override Diaph. Eccen.

Fuente: Elaboración propia (2015)

10.3.2. Definición de disipadores ADAS para un análisis no-lineal

Como referencia del proceso a seguir para la definición de los disipadores en el programa se utilizó el manual de Verificación de Software (Software Verification Examples) de ETABS, el cual está incluido en la carpeta de instalación del programa. Este manual incluye varios ejemplos, de los cuales el número 10 corresponde a este tipo de disipadores. Para definir disipadores ADAS que se emplearán en una estructura que será analizada con el método no-lineal, el procedimiento a seguir es el siguiente:

- *'Define'*
- *'Link Properties'*
- *'Add new propertie'*
- En la opción type se escoge *'plastic1'*
- Direction *'U2'* para dirección en X, y *'U3'* para dirección en Y
- *'Modify/Show'*

Figura 10-3 Definición del disipador

The image shows a software dialog box titled "NLLink Property Data". It contains several sections for defining link properties. The "Property Name" is "DISIPADORX" and the "Type" is "Plastic1". The "Total Mass and Weight" section has input fields for Mass, Weight, and Rotational Inertia 1, 2, and 3, all set to 0. The "Directional Properties" section has a table with columns for Direction, NonLinear, and Properties. The directions U1, U2, and U3 are checked, and the NonLinear checkbox is checked for U2. The "P-Delta Parameters" section has an "Advanced..." button. The "OK" and "Cancel" buttons are at the bottom right.

Direction	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 10-4 Definición de propiedades del disipador

The screenshot shows a dialog box titled "NLLink Directional Properties" with the following fields and values:

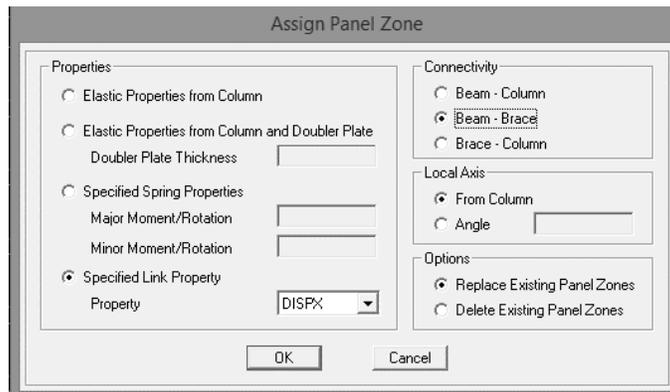
Section	Property Name	Value
Identification	Property Name	X1
	Direction	U2
	Type	Plastic1
	NonLinear	Yes
Linear Properties	Effective Stiffness	6.16
	Effective Damping	0.
Shear Deformation Location	Distance from End-J	0.
Nonlinear Properties	Stiffness	42.47
	Yield Strength	6.85
	Post Yield Stiffness Ratio	0.05
	Yielding Exponent	2.

Fuente: Elaboración propia (2015)

Como puede verse en la imagen anterior, se ingresa la rigidez efectiva (*Effective Stiffness*) y el amortiguamiento efectivo (*Effective Damping*), del disipador a utilizar. Ya definidos los disipadores, deben asignarse a los puntos de unión de las diagonales en arreglo tipo chevron, para lo cual se realiza el siguiente procedimiento:

- Se seleccionan los puntos donde se asignarán los disipadores
- 'Assign'
- 'Joint/Point'
- 'Panel zone...'
- 'Specified Link Propertie'
- En la opción connectivity se selecciona 'Beam-Brace'

Figura 10-5 Asignación de Panel-Zone



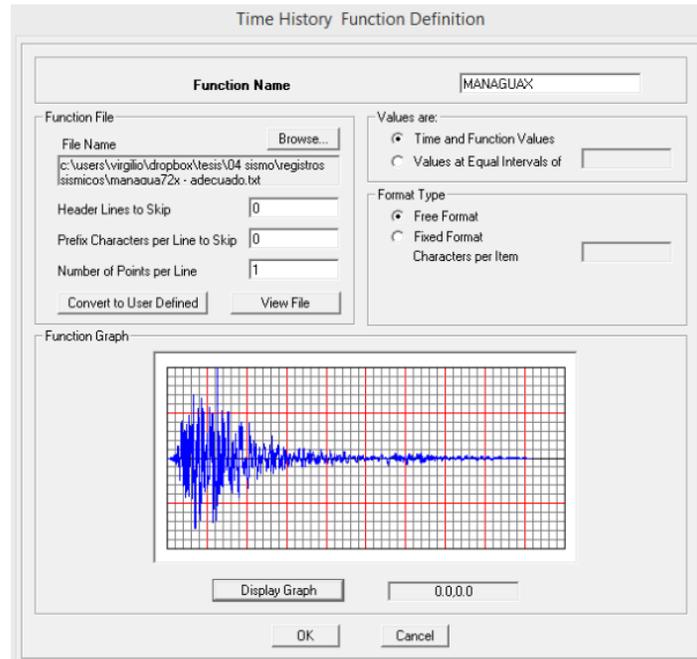
Fuente: Elaboración propia (2015)

10.3.3. Análisis tiempo-historia

Para realizar el análisis tiempo-historia en ETABS, lo primero es definir un evento sísmico. Para esto debe generarse un archivo de texto con todos los datos obtenidos del acelerogramas adecuado al PGA de AGIES, lo cual se realiza a partir de los registros obtenidos, en el caso de esta investigación del PEER, y se adecua con el programa PRISM. Para introducir el acelerograma en el programa se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

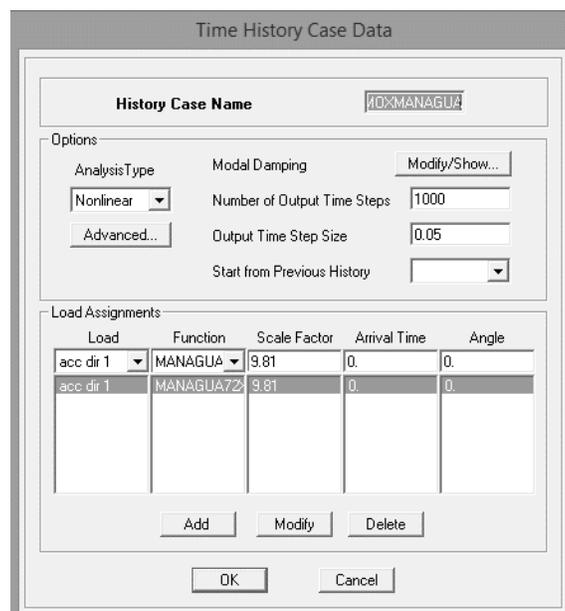
- *'Define'*
- *'Time History Functions...'*
- *'Function from File'*
- En *'Browse'* se busca la ubicación del archivo de texto que contiene el registro de sismo
- Se selecciona la opción *'Time and Function Values'*, ya que el programa genera la base de datos con los períodos y sus respectivas aceleraciones.

Figura 10-6 Definición de función Tiempo-historia



Fuente: Elaboración propia (2015)

Figura 10-7 Casos de análisis Tiempo-historia



Fuente: Elaboración propia (2015)

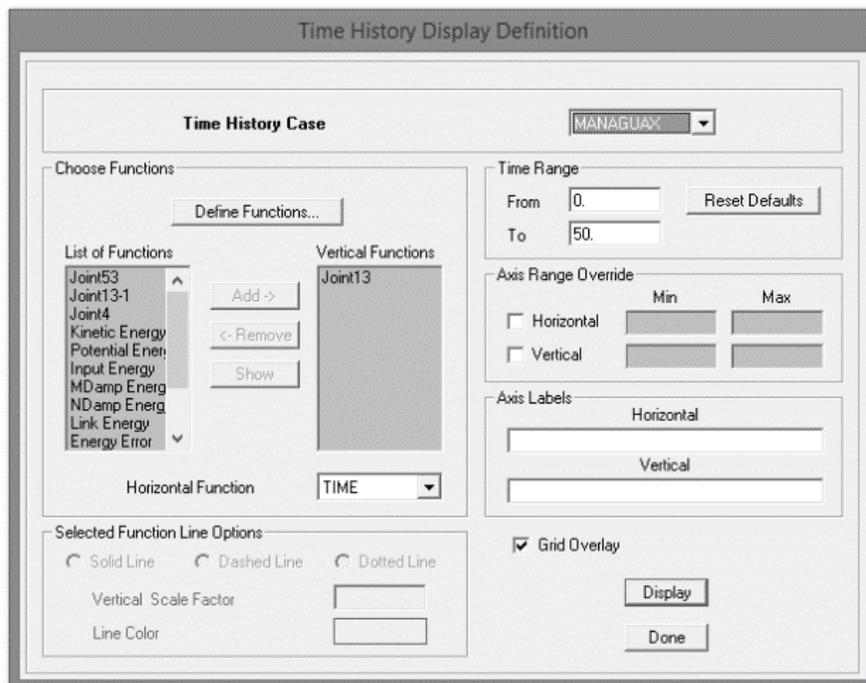
10.3.4. Resultados de análisis tiempo-historia

Para desplegar las gráficas de resultados del análisis tiempo historia se realiza el siguiente procedimiento:

- ‘Display’
- ‘Show Time History Traces...’

Esta última opción desplegará una ventana igual a la de la figura 10-8. En la cual puede seleccionarse los casos de sismo, y desplegarse los diferentes tipos de gráficos como de aceleración, deformación, cortante basal, ciclos de histéresis, entre otros.

Figura 10-8 Gráfica de análisis Tiempo-historia

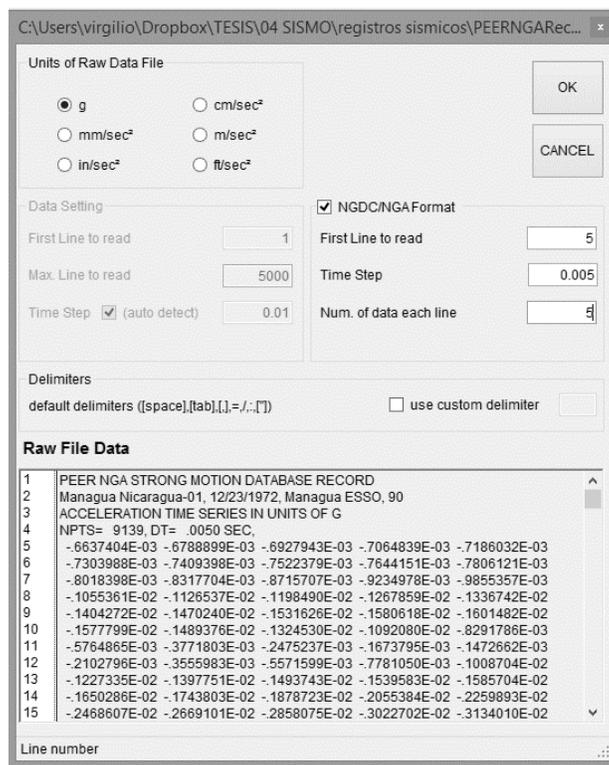


Fuente: Elaboración propia (2015)

10.4. Adecuación de los Acelerogramas mediante PRISM

Para la adecuación de los registros sísmicos se empleó el programa *PRISM for Earthquake Engineering 2.0.0.*, el cual es gratuito y fue hecho por el departamento de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad INHA de Core del Sur. Como una breve introducción al programa, a continuación se describirán los pasos para ingresar un registro, escalarlo a un PGA objetivo, y también obtener un espectro de respuesta de dicho registro.

Figura 10-9 Ingreso del registro en el programa



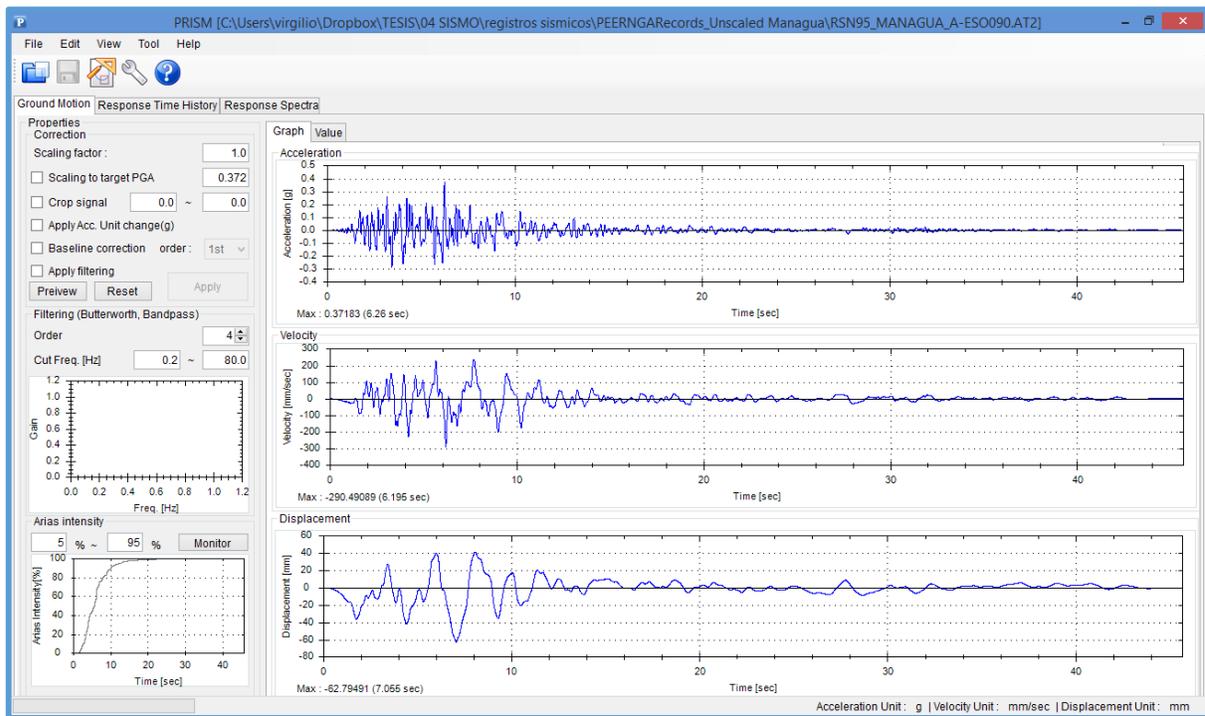
Fuente: Elaboración propia (2015)

El primer paso es ingresar el registro al programa. Para lo cual se selecciona la opción 'Open'. Esa abrirá una ventana similar a la que se presenta en la figura 10-8. Debido al formato en que se encuentran los registros descargados de la base de

datos del PEER, se debe seleccionar como unidades 'g', y posteriormente la opción 'NGDC/NGA Format', el cual permite ingresar qué fila es donde debe empezar el programa, el intervalo de tiempo del registro y la cantidad de columnas que debe leer, toda esta información se encuentra en el archivo de texto descargado.

Al seleccionar 'Ok', el programa despliega el registro, en la interfaz que es posible apreciar en la figura 10-9. En esta ventana es posible ingresar un factor de escala a utilizar en el registro, o un PGA objetivo para que el mismo programa calcule dicho factor. También es posible copiar los datos de tiempo y aceleración del registro, únicamente seleccionando la opción 'Value', la cual despliega dichos resultados.

Figura 10-10 Registro sísmico

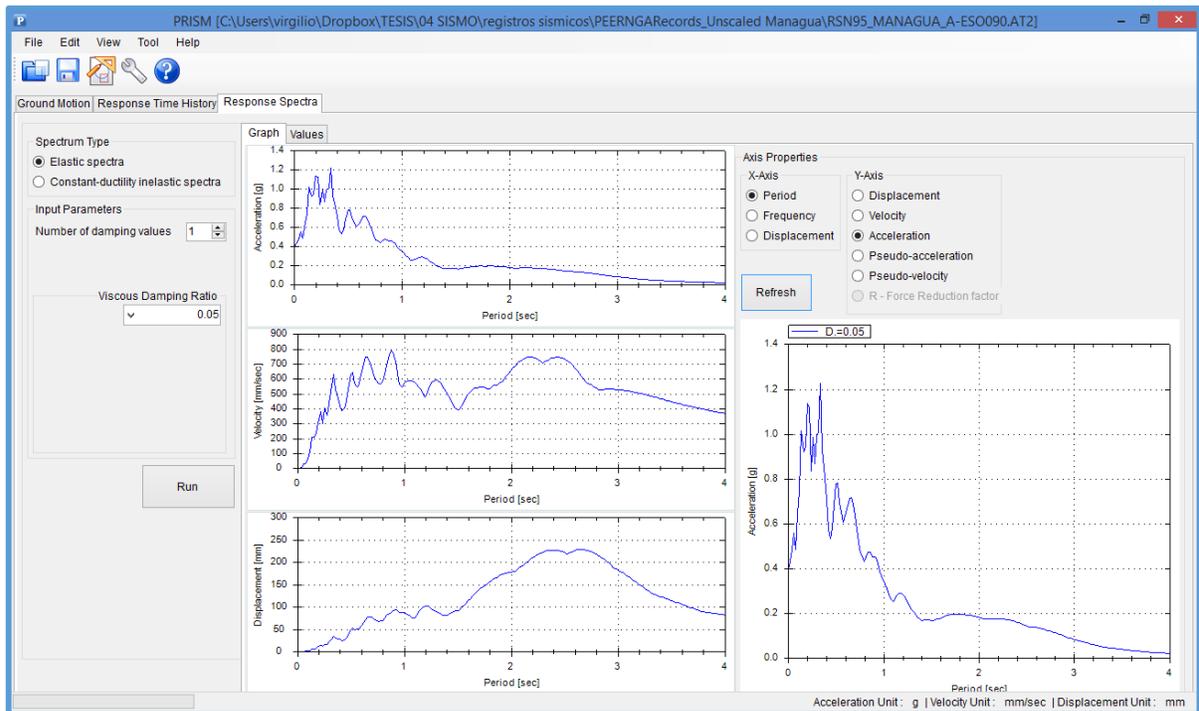


Fuente: Elaboración propia (2015)

Por último, el programa también permite generar un espectro de respuesta a partir del registro ingresado, para lo cual es necesario seleccionar la opción 'Response

Spectra'. Como se comparó el espectro de AGIES, con los correspondientes a los acelerogramas utilizados, se usó un '*Elastic Spectra*', con un 5% del amortiguamiento crítico. La interfaz para generar el espectro de respuesta se muestra en la figura 10-11.

Figura 10-11 Espectro de respuesta



Fuente: Elaboración propia (2015)