

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE ESTRUCTURAS E
INGENIERÍA HIDRAÚLICA
MÁSTER EN INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS



TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS Y REDISEÑO SÍSMICO DE UNA EDIFICACIÓN CON
DISIPADORES DE ENERGÍA ADAS EN LA CIUDAD
AYACUCHO-PERÚ

PRESENTADO POR:

ING. ROLANDO CISNEROS AYALA

DIRIGIDO POR:

DR. FRANCISCO LÓPEZ ALMANSA

GRANADA - JULIO 2016

Presentación

El presente Trabajo Fin de Máster es ostentada como parte de los requisitos para optar el título académico de Máster en Ingeniería de Estructuras, en la Universidad de Granada, la cual no ha sido presentado anteriormente para la obtención de otro grado o título en esta universidad u otras. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el periodo del año 2016.

Rolando Cisneros Ayala

rolando@correo.ugr.es

MÁSTER EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Granada, Julio de 2016.

Dedicatoria

A DIOS por iluminar y bendecir mi camino. A mis padres: Abrahan Cisneros Mitma y María Ayala Gómez quienes me apoyaron de manera incondicional en mi formación académica; gracias a ustedes padres por apostar siempre en la educación de su hijo.

Agradecimientos

A mis padres: Abraham Cisneros Mitma y María Ayala Gómez por su apoyo incondicional y por su paciencia interminable durante mi formación académica de grado y post-grado.

Al Dr. Francisco López Almasa, eminencia en Ingeniería Estructural, director y asesor del presente trabajo de investigación, por su revisión constante y sugerencia que direccionaron al éxito de este trabajo.

Al Dr. Rafael Gallego Sevilla, Coordinador del Máster, por la gran deferencia mostrada como docente y compartir sus conocimientos.

A la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, mi alma máter, y en especial a la escuela profesional de Ingeniería Civil, mi segunda casa, por haberme formado Ingeniero Civil.

Finalmente, a la Universidad de Granada, nuestra alma máter, y en especial a la E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, mi tercera casa, por haberme acogido en sus aulas durante mis periodos de estudiante.

Resumen

La presente investigación nace con el propósito de contribuir a la Ingeniería Civil en el área de Estructuras, con el desarrollo de un trabajo concerniente al Análisis y Rediseño Sísmico de una edificación con disipadores de energía ADAS (Added Damping And Stiffness).

La investigación comienza dando una visión general acerca de los antecedentes de los disipadores de energía a nivel mundial así como su primera aplicación en el Perú. Se estudia la causa principal de los terremotos en borde occidental de America del Sur, mencionando los terremotos más relevantes ocurridos en las ultimas décadas en el territorio Peruano. Así mismo se generan registros sísmicos artificiales compatibles con el espectro de diseño propuesto en la Normativa Peruana E.030, para realizar el análisis sísmico.

Finalmente se realiza el Análisis y Rediseño Sísmico de una estructura real con y sin la incorporación de los disipadores de energía ADAS en la estructura, mediante el método de Análisis Dinámico no Lineal, utilizando los registros sísmicos artificiales, empleando el programa computacional ETABS, presentando las respuestas máximas en el tiempo en forma comparativa.

Abstract

This research was created with the purpose of contributing to the Civil Engineering Structures in the area, with the development of work concerning the Seismic Analysis and Redesign of a building with energy-dissipating ADAS (Added Damping And Stiffness)

The research begins by giving an overview about the background of dissipating energy worldwide and its first application in Peru. The main cause of earthquakes is studied western edge of South America, mentioning the most significant earthquakes in recent decades in the Peruvian territory. Also compatible artificial seismic records are generated with the design spectrum proposed in Peruvian legislation E.030, for seismic analysis.

Finally Analysis and Seismic Redesign of a real structure with and without the inclusion of energy-dissipating ADAS in the structure by the method of nonlinear dynamic analysis is performed using artificial seismic records using the ETABS computer program, presenting the maximum responses over time comparatively.

Índice general

Portada

Presentación I

Dedicatoria II

Agradecimientos III

Resumen IV

Abstract V

Índice General VI

Índice de Cuadros X

Índice de Figuras XII

1. Introducción 1

1.1. Antecedentes 1

1.1.1. En el Mundo 1

VI

1.1.2. En el Perú	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.2.1. Problemas principales	3
1.2.2. Problemas secundarios	3
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Generales	4
1.4.2. Específicos	4
1.5. Organización del Estudio	5
2. Estado del Arte	6
2.1. Sismicidad en el Perú	6
2.1.1. Introducción	6
2.1.2. Origen de los Sismos en el Perú	8
2.2. Normatividad y Regularidad Estructural de las Edificaciones en el Perú . .	9
2.2.1. Alcances de la Norma	9
2.2.2. Filosofía y Principios de Diseño Sismoresistente de la Norma Peruana .	10
2.2.3. Peligro Sísmico	10
2.2.4. Sistemas Estructurales Empleados en las Construcciones Peruanas .	13
2.2.5. Regularidad Estructural de las Edificaciones Peruanas	14
2.3. Sistema de Reforzamiento tradicional	14
2.3.1. Reforzamiento de columnas	15

2.3.2.	Pórticos Arriostrados	16
2.4.	Sistema de Reforzamiento con Disipadores de Energía	18
2.4.1.	Tipos de Disipadores de Energía(Sistemas de control pasivo)	19
2.4.2.	Disposiciones Constructivas	27
2.4.3.	Sistemas de Conexión entre Disipadores y la Estructura Porticada	28
2.4.4.	Distribución Vertical del Sistema Disipativo	31
2.4.5.	Tipo de Disipador Utilizado en la Presente Investigación	33
2.4.6.	Bases Teóricas del Modelo Dinámico	34
2.4.7.	Disipación de Energía	37
2.4.8.	Modelización de disipadores con comportamiento histerético	40
2.4.9.	Procedimiento de Diseño de una Estructura Provistas con Disipa- dores de Energía Histeréticos	47
2.4.10.	Procedimientos Simplificados de Diseño de los Dispositivos tipo ADAS y el Contraviento	49
2.5.	Tipos de Análisis Sísmicos de Estructuras Provistas con Disipadores de Energía	52
2.5.1.	Procedimientos de Diseño	52
2.5.2.	Elección de Tipo de Análisis	53
2.6.	Generación de Registros Sintéticos o Artificiales	54
2.6.1.	Modelo	54
2.6.2.	Parámetros Espectrales	56
2.6.3.	Datos para Generar el Registro Sintético	59

3. Análisis Sísmico de la Estructura con Disipador de Energía ADAS	64
3.1. Aspectos Generales	64
3.1.1. Descripción General de la Estructura	64
3.2. Análisis Dinámico No Lineal	65
3.2.1. Análisis Sísmico sin Disipadores de Energía	65
3.2.2. Análisis Sísmico con Incorporación de Disipadores de Energía	76
4. Conclusiones y Recomendaciones	98
4.1. Conclusiones	98
4.2. Recomendaciones	99
Bibliografía	100

Índice de cuadros

2.1. Coeficientes de aceleración de gravedad, para cada zona.	12
2.2. Datos para simular el movimiento del suelo.	59
2.3. Parámetros sísmicos, para la obtención de espectro de diseño.	60
3.1. Características del hormigón y acero.	65
3.2. Características de la albañilería	65
3.3. Metrado de carga que gravitará en los forjados(losa).	65
3.4. Metrado de carga que gravitará en los forjados(losa).	66
3.5. Dimensiones de los pilares(columnas).	66
3.6. Espesor del forjado(losa).	66
3.7. Metrado de tabiquería en la dirección “X”, de la estructura.	68
3.8. Metrado de tabiquería en la dirección “X” de la estructura.	68
3.9. Metrado de tabiquería en la dirección “X”, de la estructura.	69
3.10. Metrado de tabiquería en la dirección “X” de la estructura.	69
3.11. Deriva máxima de piso de la estructura.	75
3.12. Rigidez por Piso de la Estructura, en la Dirección X.	77
3.13. Rigidez por Piso de la Estructura, en la Dirección Y.	77

3.14. Cortante de piso.	78
3.15. Disipadores requeridos en la dirección X de la estructura	78
3.16. Disipadores requeridos en la dirección Y de la estructura	79
3.17. Geometría de las placas en cada nivel de la estructura.	80
3.18. Propiedades del disipador en función de número placas, en la dirección X. .	80
3.19. Propiedades del disipador en función de número placas, en la dirección Y. .	80
3.20. Área requerido de los Contravientos Chevron.	82
3.21. Perfiles de los Contravientos Chevron.	83
3.22. Deriva máxima de piso de la estructura.	85
3.23. Esbeltez y resistencia a tracción.	86
3.24. Esbeltez y resistencia a tracción.	87
3.25. Esbeltez y resistencia a tracción.	87
3.26. Esbeltez y resistencia a tracción.	88
3.27. Esbeltez y resistencia a compresión.	89
3.28. Esbeltez y resistencia a compresión.	89
3.29. Esbeltez y resistencia a compresión.	89
3.30. Esbeltez y resistencia a compresión.	90
3.31. Porcentaje de energía absorbida por el disipador de energía.	93
3.32. Energía absorbida por el amortiguamiento modal de la estructura.	93

Índice de figuras

2.1. Epicentros con magnitud mayor a 4 ocurridos entre 1964-2008, Fuente(IGP)	7
2.2. Configuración de la placa de Nazca y la placa Sudamericana.Fuente:[19]	8
2.3. Proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa continental.Fuente:[19]	9
2.4. Mapa de Zonificación Sísmica del Perú. Fuente:[2]	11
2.5. Edificaciones que fallaron en el sismo del año 2007. Fuente:[20]	14
2.6. Diagonales sencillas de un pórtico.	16
2.7. Arriostramiento tipo cruz.	17
2.8. Arriostramiento tipo V invertida	17
2.9. Clasificación de los disipadores de energía según la ASCE.	20
2.10. Disipador fluido viscoso	21
2.11. Disipador Viscoelástico	22
2.12. Sistema ADAS	23
2.13. Dispositivo TADAS	24
2.14. Disipador Honey-Comb	25
2.15. Conexión tipo SBC (Slotted Bolted Connection).	26

2.16. Esquema disipador de energía tipo Pall.	27
2.17. Subsistemas estructurales de una estructura sismorresistente con disipadores de energía.	28
2.18. Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada	29
2.19. Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada	29
2.20. Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada	30
2.21. Distribución vertical del sistema disipativo, configuración 1 y 2.	31
2.22. Distribución vertical del sistema disipativo, configuración 3 y 4.	32
2.23. Distribución vertical del sistema disipativo, configuración 5 y 6.	33
2.24. Respuesta histerética ADAS en los primeros ciclos de carga.	34
2.25. Modelo Bilineal	41
2.26. Modelo de Bouc-Wen, disipador de cobre tipo ADAS. Fuente:[9]	43
2.27. Modelo Bilineal, para la interpretación geométrica.	44
2.28. Curva fuerza-deformación de un disipador de energía con comportamiento bilineal.	49
2.29. Función tipo compuesta. Fuente:[15]	57
2.30. Función de Intensidad.	60
2.31. Espectro de Diseño Elástico de la Norma Técnica Peruana E.030.	61
2.32. Primer Acelelograma Sintético Generado.	61
2.33. Comparación del Primer Espectro Generado y el objetivo.	62
2.34. Segundo Acelelograma Sintético Generado.	62
2.35. Comparación del Segundo Espectro Generado y el objetivo.	62

2.36. Tercer Acelelograma Sintético Generado.	63
2.37. Comparación del Tercer Espectro Generado y objetivo.	63
3.1. Planta Típica del Módulo A.	67
3.2. Vista en planta de la edificación.	70
3.3. Vista de elevación posterior de la estructura.	70
3.4. Vista en elevación frontal de la estructura.	71
3.5. Definición del registro sísmico para el análisis sísmico.	71
3.6. Desplazamiento de C.M. en la dirección X del sexto nivel.	72
3.7. Desplazamiento de C.M. en la dirección X del quinto nivel.	72
3.8. Desplazamiento de C.M. en la dirección X del cuarto nivel.	73
3.9. Desplazamiento de C.M. en la dirección X del tercer nivel.	73
3.10. Desplazamiento de C.M. en la dirección X del segundo nivel.	74
3.11. Desplazamiento de C.M. en la dirección X del primer nivel.	74
3.12. Balance de Energía en la Edificación.	75
3.13. Geometría del Dispositivo ADAS.	79
3.14. Modelo Bilineal del disipador ADAS, del primer piso en la dirección X . . .	81
3.15. Modelo Bilineal del disipador ADAS, del primer piso en la dirección Y . . .	81
3.16. Sección transversal de los Contravientos Chevron.	82
3.17. Propiedades direccionales del disipador de energía.	83
3.18. Distribución de disipadores de energía en altura, eje B-B.	84
3.19. Distribución de disipadores de energía en altura, eje 1-1.	84

3.20. Desplazamientos de C.M con y sin Disipador de la estructura.	85
3.21. Comportamiento histerético del disipador ADAS en el eje 1-1 de la estructura.	90
3.22. Comporamiento histerético del disipador ADAS en el eje 6-6 de la estructura.	91
3.23. Comportamiento histerético del disipador ADAS en el eje B-B de la estructura.	91
3.24. Comportamiento histerético del disipador ADAS en el eje E-E de la estructura.	92
3.25. Balance de energía con incorporación de Disipadores de Energía.	92
3.26. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 6 piso, dirección X. . . .	94
3.27. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 5 piso, dirección X. . . .	94
3.28. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 4 piso, dirección X. . . .	94
3.29. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 3 piso, dirección X. . . .	95
3.30. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 2 piso, dirección X. . . .	95
3.31. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 1 piso, dirección X. . . .	95
3.32. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 6 piso, dirección Y. . . .	96
3.33. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 5 piso, dirección Y. . . .	96
3.34. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 4 piso, dirección Y. . . .	96
3.35. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 3 piso, dirección Y. . . .	97
3.36. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 2 piso, dirección Y. . . .	97
3.37. Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 1 piso, dirección Y. . . .	97

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. En el Mundo

Estados Unidos y Japón son los principales precursores del uso de la tecnología de protección sísmica. Los sistemas de protección sísmica presentaron su mayor auge luego de los terremotos de Northridge (EEUU) en 1994 y Kobe (Japón) en 1995. En ambos terremotos se observó que las construcciones que poseían sistemas de disipación de energía se comportaron de excelente forma frente a los convencionales, lo que estimuló la masificación de este tipo de tecnología.

1.1.2. En el Perú

En Perú, ejemplos de daño estructural y no estructural muy severo, que ha generado gastos macroeconómicos al país, no sólo por los costos de reparación, sino por el tiempo de funcionalidad de la estructura que se ha perdido por la reparación de daños, se ha podido observar en los sismos de las últimas décadas como: la ciudad de Nazca del año 1996,

Moquegua en 2001 y Pisco e Ica en 2007. Estos eventos naturales es un claro ejemplo de la necesidad de empleo de otros sistemas de diseño y reforzamiento estructural. La primera edificación construida en Perú con disipadores de energía fue en el año 2003, estructura denominada Casino Mubarak. Y la segunda edificación luego de post-sismo del año 2007 fue la torre del aeropuerto Internacional Jorge Chavez, empleando disipadores viscosos.

1.2. Planteamiento del Problema

Actualmente en la mayoría de los países, los códigos normalmente presentan para la concepción y reforzamiento estructural el diseño convencional y sistemas de reforzamiento tradicional, el cual consiste en crear estructuras suficientemente rígidas pero a la vez dúctiles. Esto se puede conseguir empleando sistemas estructurales tradicionales como: el aporticado, dual y elementos de reforzamiento tales como arriostres metálicos, entre otros de tal forma que la estructura sea capaz de soportar diferentes sollicitaciones sísmicas producidas por una excitación telúrica. Edificaciones concebidas y diseñadas bajo este sistema de concepción y reforzamiento, no debería presentar problemas estructurales y no estructurales durante movimientos sísmicos dentro de la vida media útil de la estructura, sin embargo el comportamiento observado de estructuras durante sismos de distintas características en diversas partes del mundo evidencia que los objetivos plateados no se ha alcanzado de manera satisfactoria. Lo anterior sugiere la necesidad de emplear otros sistemas alternativos de diseño sísmico, como el empleo de los sistemas de protección sísmica. Puntualmente se empleará en el presente trabajo de investigación LOS DISIPADORES DE ENERGÍA ADAS. Por lo tanto los problemas quedan planteadas de la siguiente manera:

1.2.1. Problemas principales

- ¿De qué manera se comportará la estructura rediseñada, con incorporación de disipadores de energía ADAS frente al reforzamiento tradicional existente?
- ¿De qué manera mejorará el nivel de desempeño estructural y no estructural de la edificación la incorporación de los sistemas de Protección Sísmica?

1.2.2. Problemas secundarios

- ¿En que medida aminorará los daños producidos en los elementos estructurales y no estructurales la incorporación de los disipadores de energía ADAS, en el rediseño sísmico?
- ¿Cuáles son las variables más importantes para obtener un diseño sismo-resistente eficiente para un sistema de reforzamiento con disipadores de energía ADAS?

1.3. Justificación

Actualmente el trabajo de diseño sísmico y reforzamiento de edificios lo realizan los ingenieros estructurales, para ello utilizan los sistemas de estructuración y reforzamiento tradicional estipulado en la Norma Técnica Peruana de diseño sismo resistente (E.030) y suponen un buen comportamiento de los edificios diseñados y reforzados bajo estos sistemas de reforzamiento tradicional frente al sismo de diseño, pero se ha registrado sismos de menor magnitud que no ha llevado al colapso de la estructura pero ha producido grandes daños en elementos no estructurales, las mismas que se agravan cuando se tienen que suspender las labores para reparar estos daños y por ende estas reparaciones representan varios miles de soles para el estado Peruano, como ejemplo claro podríamos mencionar el desastre sísmico del año 2007 en la ciudad de Ica.

Está reconocido entonces que el proceso de diseño y reforzamiento tradicional hasta ahora, no puede satisfacer las necesidades de la sociedad Peruana, en cuanto no se defina de manera confiable el diseño estructural, esto me ha motivado realizar el rediseño sísmico con disipadores de energía ADAS.

1.4. Objetivos

Los objetivos planteados en el plan de investigación inicial propuesta se han mantenido y ha direccionado la ejecución del presente trabajo, los cuales se menciona en los renglones siguientes:

1.4.1. Generales

- Determinar el comportamiento de la estructura con incorporación de disipadores de energía ADAS, frente al espectro local del sismo.
- Incrementar el amortiguamiento de la estructura, con la incorporación de disipadores de energía ADAS.

1.4.2. Específicos

- Realizar el modelamiento estructural, con la incorporación de disipadores de energía ADAS, utilizando el software computacional ETABS 2015.
- Mostrar y comparar las respuestas obtenidos entre el sistema de reforzamiento tradicional y el sistema de reforzamiento con disipadores de energía ADAS.

1.5. Organización del Estudio

Por lo general, los Trabajos de Fin de Máster son muy voluminosos, y generalmente se centran en la descripción teórica, lo cual dificulta el proceso de investigación científica, es por ello que me tomé el reto de organizar el presente Trabajo Fin de Máster sólo en cuatro capítulos, describiendo la teoría en forma sucinta, seria y con el rigor científico.

- En el **Capítulo 1**, se describe antecedentes del tema de investigación, planteamiento del problema, justificación, objetivos y organización del estudio.
- En el **Capítulo 2**, se presenta el marco teórico sobre disipadores de energía. Se inicia el capítulo con una breve introducción sobre la sismicidad en Perú, posteriormente en forma breve se menciona la normatividad y la regularidad estructural de las edificaciones peruanas, sistemas de reforzamiento tradicional, sistemas de reforzamiento con disipadores de energía, tipos de análisis sísmico de estructuras provistas con disipadores de energía y finalmente se generan los registros sísmicos artificiales compatibles con el espectro de diseño de la Norma Peruana.
- En el **Capítulo 3**, se presenta exclusivamente al análisis y rediseño de la edificación sin y con disipadores de energía ADAS.
- En el **Capítulo 4**, se presenta las conclusiones y recomendaciones sobre la investigación realizada.
- La **Bibliografía**, presenta una lista detallada del material bibliográfico utilizado.

Los cálculos y gráficos han sido realizados con los siguientes programas computacionales: ETABS, autoCAD, MathType, Adobe Acrobat y el procesamiento en \LaTeX .

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Sismicidad en el Perú

2.1.1. Introducción

El borde occidental de América del Sur se caracteriza por ser una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo. El Perú forma parte de esta región y su actividad sísmica más importante está asociada al proceso de subducción de la placa oceánica bajo la placa continental, generando terremotos de magnitud elevada con relativa frecuencia. Un segundo tipo de actividad sísmica está producida por las deformaciones corticales presentes a lo largo de la cordillera de los andes, con terremotos menores en magnitud y frecuencia.^[4] Por lo tanto podemos definir la sismicidad como el estudio de cantidad de sismos que ocurren en algún lugar específico. Un lugar puede tener alta o baja sismicidad, dependiendo de la ocurrencia del mismo. Hoy en día el concepto de sismicidad relaciona la actividad sísmica con su distribución espacial y temporal, además de las características fisiográficas y geológicas de cada región.

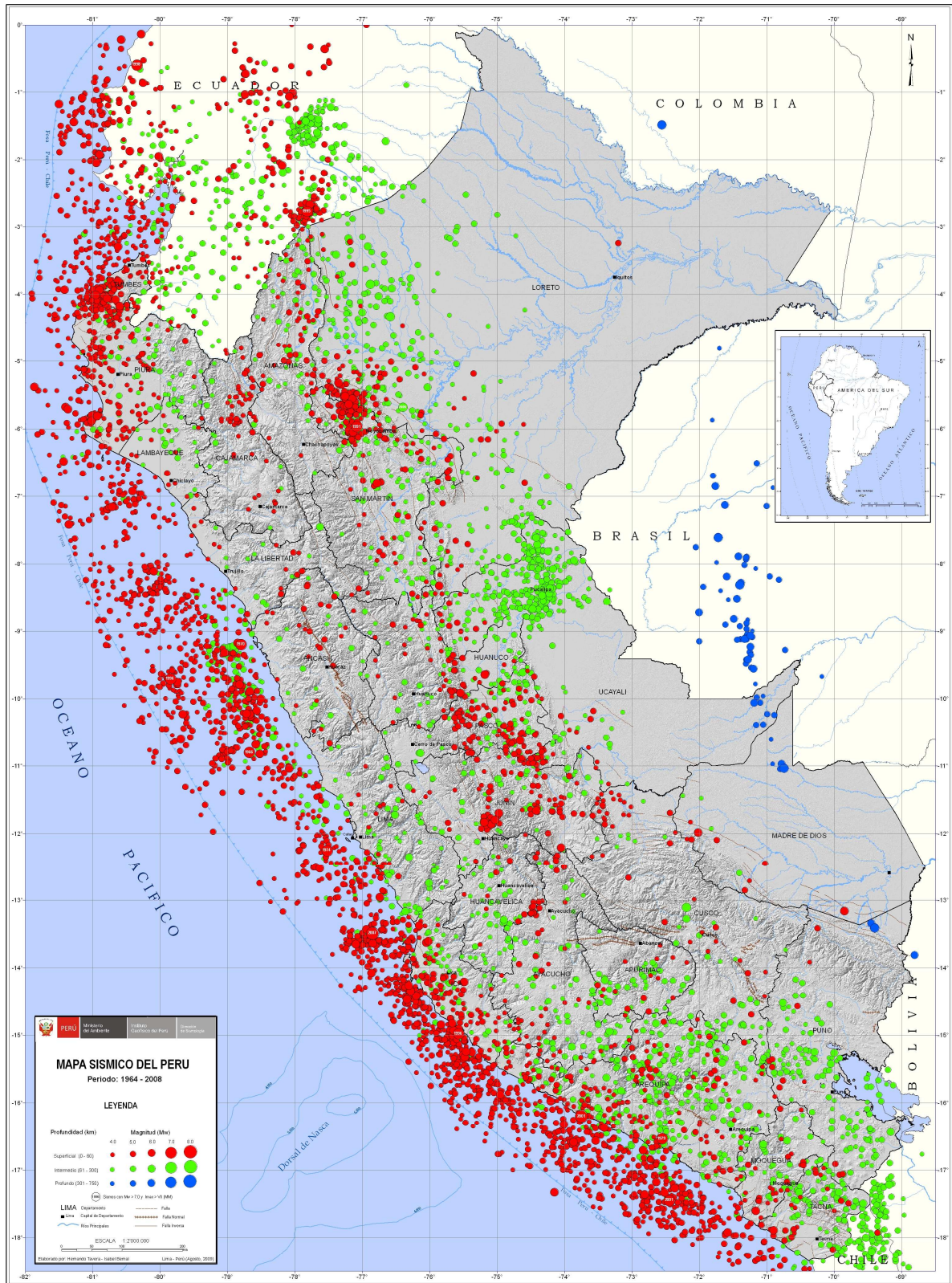


Figura 2.1: Epicentros con magnitud mayor a 4 ocurridos entre 1964-2008, Fuente(IGP)

2.1.2. Origen de los Sismos en el Perú

La actividad sísmica en el Perú está asociada al proceso de subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa sudamericana, la cual se realiza a lo largo de gran parte del borde occidental del continente sudamericano con una velocidad relativa de 10cm al año. Este proceso genera en el continente un alto índice de deformación que da origen a la formación de las cordilleras (Cordillera de los Andes) y a la fosa Peruano-Chilena. En el flanco oriental del continente Sudamericano, la placa Oceánica de Nazca se mueve con una velocidad de, aproximadamente, 10 cm al año contra la placa continental que lo hace 4 cm al año en sentido contrario. En el proceso de subducción, la placa de Nazca se introduce por debajo de la placa Sudamericana, este movimiento produce la acumulación de energía en ciertas zonas, las cuales se resisten a los desplazamientos de las placas, posteriormente esta energía se libera por medio de sismos o erupciones volcánicas.[19]

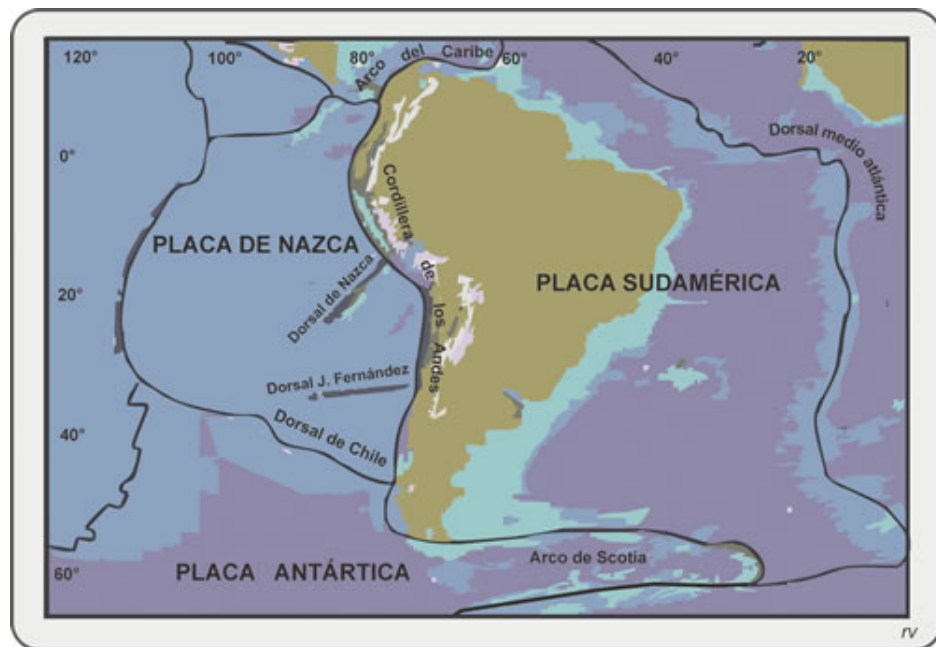


Figura 2.2: Configuración de la placa de Nazca y la placa Sudamericana.Fuente:[19]

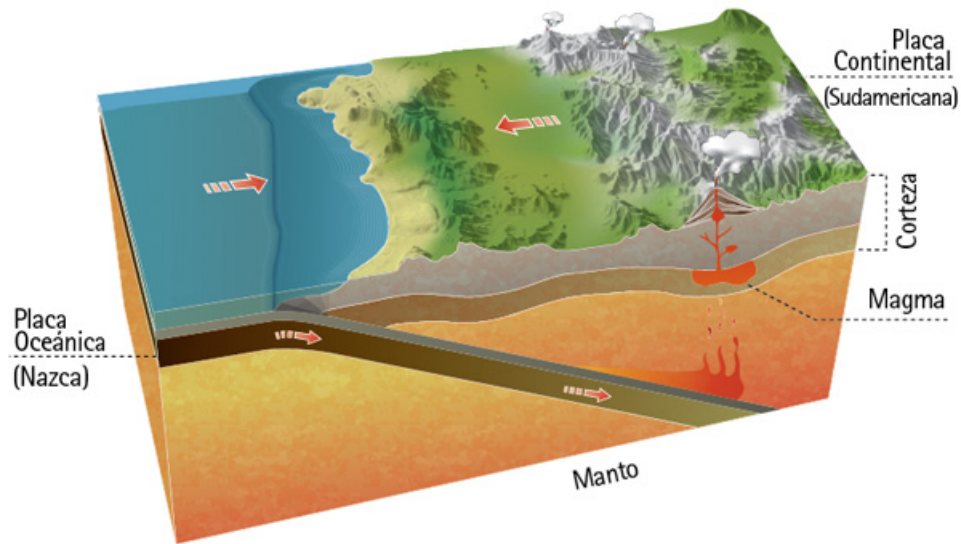


Figura 2.3: Proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa continental. Fuente: [19]

2.2. Normatividad y Regularidad Estructural de las Edificaciones en el Perú

2.2.1. Alcances de la Norma

Esta norma¹ establece las condiciones mínimas para que las edificaciones diseñadas según sus requerimientos tengan un comportamiento sísmico adecuado y acorde con los principios señalados en el ítem 2.2.2 Se aplica al diseño de todas las edificaciones nuevas, a la evaluación y reforzamiento de las existentes y a la reparación de las que resultaran dañadas por la acción de los sismos, para el caso de estructuras especiales, y todas aquellas cuyo comportamiento difiera del de las edificaciones, se requieren consideraciones adicionales que complementen las exigencias aplicables de la presente Norma. [2]

¹La Norma Actual de Diseño Sismorresistente fue publicada el 24 de enero de 2016, en el diario Oficial El Peruano para todo el territorio Peruano.

2.2.2. Filosofía y Principios de Diseño Sismoresistente de la Norma Peruana

La esencia de la presente norma, y la finalidad de la misma consiste en:

- Evitar pérdidas de vidas.
- Asegurar la continuidad de los servicios básicos.
- Minimizar los daños a la propiedad.

Se reconoce que dar protección completa frente a todos los sismos no es técnica ni económicamente factible para la mayoría de las estructuras. En concordancia con tal filosofía se establecen en esta Norma los siguientes principios para el diseño:

- La estructura no debería colapsar, ni causar daños graves a las personas debido a movimientos sísmicos severos que puedan ocurrir en el sitio.
- La estructura debería soportar movimientos sísmicos moderados, que puedan ocurrir en el sitio durante su vida de servicio, experimentando posibles daños dentro de límites aceptables.

2.2.3. Peligro Sísmico

El Perú se encuentra ubicado en una zona de alta sismicidad y según la clasificación mundial le corresponde 9 grados en la escala Mercalli Modificada. Cerca de 18 millones de peruanos viven en zonas sísmicas y están expuestos a las constantes amenazas de ocurrencias de sismos. Cabe indicar, que en investigaciones sísmicas, aún están lejos de poder resolver el peligro sísmico, el cual se incrementa y al que están expuestos cotidianamente.[6]

Zonificación

El territorio Peruano se considera dividido en cuatro zonas, como se muestra en la Figura 2.4. La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como en información neotectónica.



Figura 2.4: Mapa de Zonificación Sísmica del Perú. Fuente:[2]

A cada zona se asigna un factor Z según se indica en el Cuadro 2.1. Este factor se interpreta como la aceleración máxima del terreno con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años.

Factor de de Zona	
Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Cuadro 2.1: Coeficientes de aceleración de gravedad, para cada zona.

Perfiles de Suelo

los perfiles de suelo¹ se clasifican tomando en cuenta la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte \bar{V}_S , o alternativamente, para suelos granulares, el promedio ponderado de los \bar{N}_{60} obtenidos mediante un ensayo de penetración estándar (SPT), o el promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada \bar{S}_u para suelos cohesivos.

a) Perfil Tipo S_0 : Roca Dura

A este tipo corresponden las rocas sanas con velocidad de propagación de ondas de corte \bar{V}_S mayor que 1500 m/s.

b) Perfil Tipo S_1 : Roca o Suelos Muy Rígidos

A este tipo corresponden las rocas con diferentes grados de fracturación, de macizos homogéneos y los suelos muy rígidos con velocidades de propagación de onda de corte \bar{V}_S , entre 500 m/s y 1500 m/s.

c) Perfil Tipo S_2 : Suelos Intermedios

A este tipo corresponden los suelos medianamente rígidos, con velocidades de propagación de onda de corte \bar{V}_S , entre 180 m/s y 500 m/s.

¹ \bar{V}_S :Velocidad promedio de propagación de las ondas de corte, \bar{N}_{60} :Promedio ponderado de los ensayos de penetración estándar y \bar{S}_u :Promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada.

d) Perfil Tipo S_3 : Suelos Blandos

Corresponden a este tipo los suelos flexibles con velocidades de propagación de onda de corte \bar{V}_S , menor o igual a 180 m/s.

e) Perfil Tipo S_4 : Condiciones Excepcionales

A este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables, en los cuales se requiere efectuar un estudio específico para el sitio.

2.2.4. Sistemas Estructurales Empleados en las Construcciones Peruanas

En el Perú existe una gran variedad de edificaciones, desde construcciones tradicionales de adobe hasta edificios modernos con muros de hormigón armado. Existen estructuras de adobe, madera, de hormigón armado, acero entre otras. Las estructuras de madera y adobe son las más vulnerables frente a una demanda sísmica. Asimismo, se puede presenciar que las estructuras de hormigón armado sufren problemas estructurales como el de columnas cortas, cambio de rigidez en la estructura, entre otras fallas, como consecuencia del sismo. Cabe de precisar Las construcciones en zonas sísmicas se incrementan a diario en el territorio Peruano. En consecuencia, la seguridad estructural tiene un valor importante en el desarrollo nacional. La reducción de los costos, con la consecuente seguridad de las obras en zonas sísmicas es el problema central de la construcción en el territorio Peruano.[6] Un sismo devastador en la última década que se ha registrado, fue el sismo del año 2007, en las ciudades de Ica y Pisco al sur de la capital del Perú.



Figura 2.5: Edificaciones que fallaron en el sismo del año 2007. Fuente:[20]

2.2.5. Regularidad Estructural de las Edificaciones Peruanas

Las edificaciones Peruanas en su mayoría han sido construídas y actualmente se edifican de manera autónoma, es decir sin asistencia técnica, esto como consecuencia ha traído edificaciones irregulares tanto en elevación como en planta, constituyéndose en estructuras altamente vulnerables frente a las demandas sísmicas. Las irregularidades normalmente observadas son: Piso blando, irregularidad de masa, irregularidad geométrica vertical, discontinuidad en los sistemas resistentes, irregularidad torsional, esquinas entrantes y discontinuidad del diafragma.

2.3. Sistema de Reforzamiento tradicional

Desde el punto de vista estructural, el reforzamiento consiste en una modificación de las características estructurales de la edificación tales como la resistencia, rigidez, masa, capacidad de disipación de energía; las cuales permiten que la estructura tenga un desempeño sísmico aceptable. Así pues, el reforzamiento estructural es el proceso que se realiza con

el fin de conseguir una respuesta aceptable de una estructura existente ante la acción de las fuerzas sísmicas. Este refuerzo dependerá de las condiciones en las que se encuentra la estructura y se consigue mediante modificaciones en el diseño o mediante cambios y refuerzos en los componentes estructurales. Por lo tanto, no existe una única solución que logre el objetivo establecido, sino que esta depende de los materiales de construcción y del incremento de capacidad de carga requerido. Dentro de las medidas estructurales tradicionales necesarias para garantizar un adecuado desempeño sísmico se consideran; las técnicas de rigidización y las técnicas para reducir la demanda sísmica. Estas técnicas se implementan a través de la inclusión de elementos adicionales como muros de corte, pórticos arriostrados, reforzamiento de vigas y columnas, entre otros.

En la siguiente sección se dará a conocer ciertas técnicas de reforzamiento tradicional utilizadas en la construcción, las cuales dependen de las solicitaciones y del diagnóstico estructural de la edificación.

2.3.1. Reforzamiento de columnas

El reforzamiento de las columnas tiene como principal objetivo proporcionar a la edificación un adecuado comportamiento sísmico, es decir, en el análisis estructural se debe evitar una falla frágil, sobretodo en elementos estructurales que cumplen un rol fundamental dentro de la configuración estructural como son las columnas. Se considera como reforzamiento de columnas al aumento de sección transversal de estos elementos, para así, incrementar la ductilidad y evitar tener una falla frágil por cortante. Este método se aplica a las estructuras que no cuentan con suficientes muros de corte y a las columnas que posean una resistencia última menor al corte con respecto a su resistencia última a flexión.

2.3.2. Pórticos Arriostrados

Se llama arriostre al elemento de refuerzo estructural diagonal que se inserta en las áreas rectangulares de un marco estructural (pórtico). Los arriostres son empleados para rigidizar la estructura, y se usan habitualmente en estructuras de acero laminado para limitar los desplazamientos de entrepiso; Sin embargo, también se ha utilizado en estructuras de concreto armado, donde se combinan pórticos dúctiles de concreto con diagonales metálicas. Las diagonales usadas para rigidizar pórticos en concreto armado o acero se

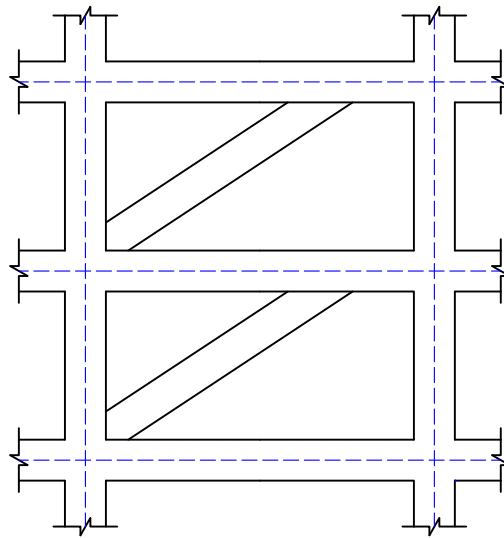


Figura 2.6: Diagonales sencillas de un pórtico.

denominan concéntricas y las usadas para el acero estructural se denominan excéntricas. Una diagonal es concéntrica cuando sus dos extremos llegan a las conexiones entre viga y columna del pórtico, y es excéntrica cuando uno de sus extremos llega a un punto sobre la viga alejado de la conexión viga columna, como se muestra en la figura 2.6. Los tipos de arriostramiento se muestran a continuación y se seleccionan de acuerdo a diversos factores resistentes, funcionales, arquitectónicos y constructivos; en general, se busca limitar los desplazamientos relativos en plantas para resistir las fuerzas laterales que se producen en un sismo.

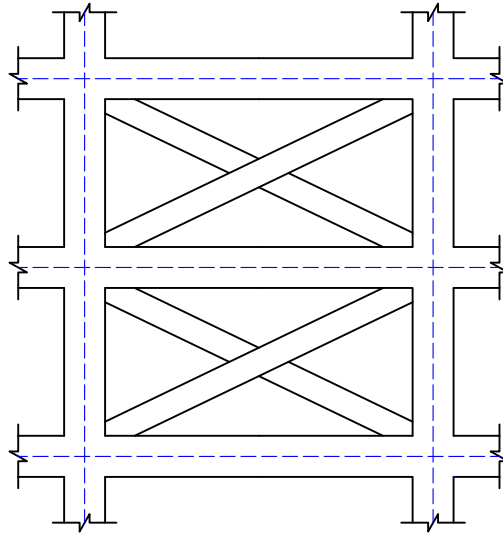


Figura 2.7: Arriostramiento tipo cruz.

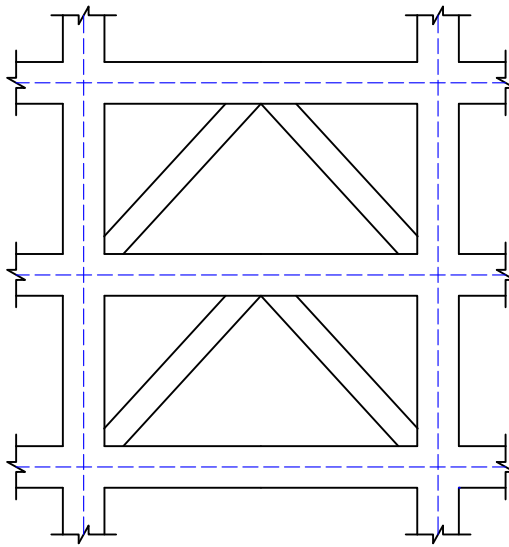


Figura 2.8: Arriostramiento tipo V invertida

Otro aspecto a considerar en el sistema de arriostramiento es la distribución de estos en altura, la selección de los arriostres depende de diversos parámetros tales como la intensidad de las cargas sísmicas, el tipo y calidad de cimentación, el tipo de suelo y las restricciones arquitectónicas. Es recomendable, en zonas de alta sismicidad y suelos blandos, emplear sistemas aporticados sin contar con elementos excesivamente rígidos que concentren la transmisión de cargas o variar su ubicación en altura.

2.4. Sistema de Reforzamiento con Disipadores de Energía

Procedimientos de diseño alternativo han sido desarrollados con incorporación de sistemas de protección sismorresistente en la estructura, estos sistemas pueden tomar la forma de sistemas de aislamiento sísmico o dispositivos suplementarios de disipación de energía. Un análisis al comportamiento y efectos de estos sistemas puede comenzar con la consideración de la distribución de la energía en la estructura. Durante un evento sísmico, una cantidad finita de energía entra a la estructura. Esta energía de entrada es transformada en energía cinética y energía potencial (deformación), las cuales deben ser absorbidas o disipadas a través del calor. Si no hubiese amortiguamiento, las vibraciones podrían existir por todo el tiempo. Por otro lado, siempre existe algún nivel de amortiguación inherente la cual absorbe parte de la energía de entrada y reduce la amplitud de vibración hasta que el movimiento cese. El desempeño estructural puede ser mejorado si una porción de la energía de entrada es absorbida, no por la estructura misma, pero si por algún tipo de dispositivo suplementario. Esto se muestra claramente en la relación 2.4.1 de la conservación de la energía.[5]

$$E = E_K + E_S + E_H + E_D \quad (2.4.1)$$

Donde:

E : Energía de entrada del movimiento sísmico.

E_K : Energía de cinética.

E_S : Energía de deformación elástica recuperable.

E_H : Energía irrecuperable, disipada por el sistema estructural a través de la inelasticidad u otras formas de acción.

E_D : Energía disipada por los dispositivos de amortiguamientos suplementarios.

Para que el sistema estructural sea capaz de soportar las sollicitaciones sísmicas, la capacidad de respuesta de esta debe ser mayor que la demanda sísmica. En otras palabras la energía de entrada (E) debe ser absorbida o disipada por la suma de la energía cinética (EK), elástica(ES), de inelasticidad (EH) e amortiguamiento suplementario(ED).

Entonces otra opción de reforzar y/o diseñar edificaciones sismorresistentes es considerando en el diseño dispositivos de disipación de energía, los mismos que se incorporan a la estructura con la finalidad de incrementar el amortiguamiento y consecuentemente reducir los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, en otras palabras, estos reducen la respuesta dinámica que la estructura experimenta.

2.4.1. Tipos de Disipadores de Energía(Sistemas de control pasivo)

Los dispositivos pasivos son elementos de carácter reactivo cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo en que se encuentran. Estos intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio, provocando una reducción de su respuesta estructural. Tienen ventajas de competitividad económica. Los sistemas de control pasivo se pueden clasificar en[5]:

- Control pasivo con aislamiento en la base.
- Control pasivo con sistemas inerciales acoplados.
- Control pasivo con disipadores de energía.

En la presente investigación sólo nos abocaremos al control pasivo con disipadores de energía, por la complejidad y amplitud del mismo, también dentro ello desarrollaremos de manera concisa sus distintas clasificaciones a excepción del disipador histerético que si dilucidaremos a profundidad, puesto que es el disipador que se pretende estudiar en esta investigación.

Control Pasivo con Disipadores de Energía

Estos dispositivos, como su nombre lo dice, disipan grandes cantidades de energía, asegurándose de esta manera que otros elementos estructurales no sean sobre exigidos. Estos dispositivos captan la fuerza telúrica a través del comportamiento plástico de metales dúctiles, la fricción entre superficies en contacto bajo presión, las deformaciones de corte de polímeros, la pérdida de energía en fluidos viscosos circulando a través de orificios, etc. y así evitan que el edificio reciba todo el impacto, generando una reducción en las deformaciones de la estructura.[5]

Clasificación de los Disipadores de Energía

El ASCE(American Society of Civil Engineers) 7-10 en su capítulo 18 señala que estos dispositivos se clasifican según su comportamiento en 3 categorías diferentes: Dependientes del desplazamiento, dependientes de la velocidad y dependientes del desplazamiento y de la velocidad a la vez.

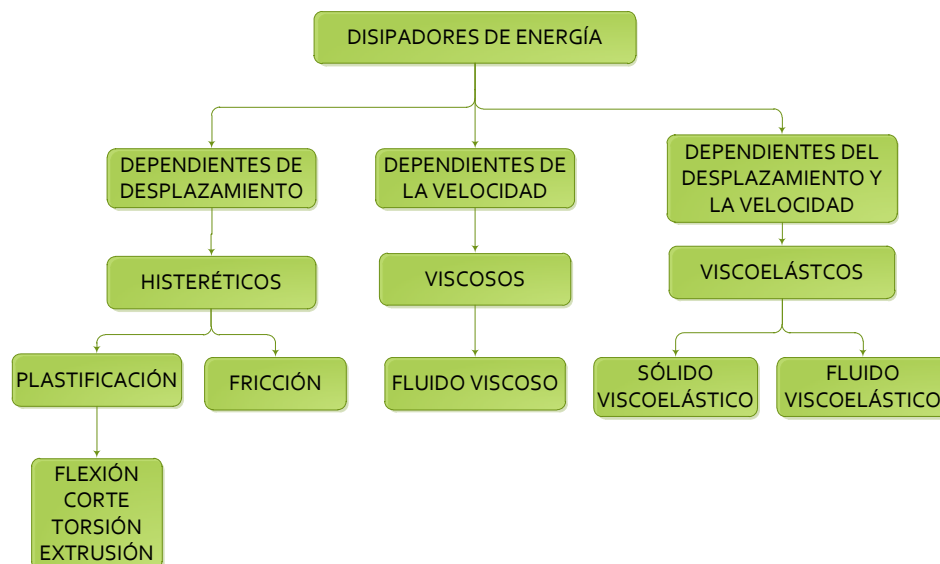


Figura 2.9: Clasificación de los disipadores de energía según la ASCE.

Disipadores Viscosos

También son conocidos como amortiguadores fluido viscosos. Inicialmente su aplicación se limitaba a la industria militar y aeronáutica. Sin embargo en años recientes su uso se ha extendido a la industria de la construcción, aplicándose exitosamente en edificaciones y puentes. Un disipador de fluido viscoso es un dispositivo que disipa energía aplicando una fuerza resistiva a un desplazamiento finito. La fuerza de salida del disipador es resistiva y actúa en la dirección opuesta al movimiento de entrada. Debido a que el disipador se comporta de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos, el valor de la fuerza resistiva varía con respecto a la velocidad traslacional del disipador en cualquier punto en el tiempo.[5]

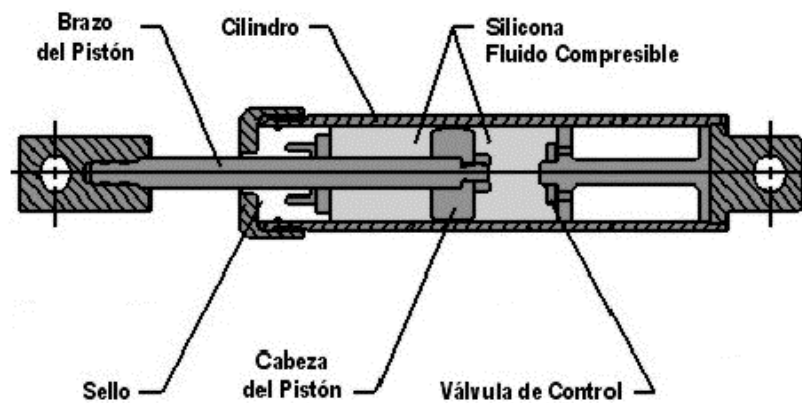


Figura 2.10: Disipador fluido viscoso

Disipadores Viscoelásticos

Los disipadores viscoelásticos han sido empleados con éxito, durante los últimos treinta años, para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento. De forma más reciente se ha estudiado su utilización con fines sismorresistentes. Los disipadores viscoelásticos sólidos están formados con chapas metálicas unidas con capas finas de material viscoelástico figura 2.11. Su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural.[18]

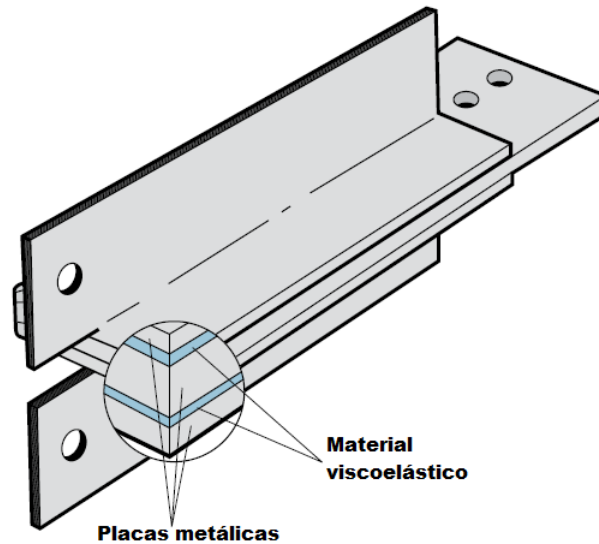


Figura 2.11: Disipador Viscoelástico

Disipadores Histeréticos

a.- Disipadores por Plastificación de Metales o Disipadores metálicos

Estos dispositivos disipan energía por medio de la fluencia de metales sometidos a esfuerzos de flexión, corte, torsión, o una combinación de ellos. La plastificación de metales¹ en disipadores se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión. Cualquier esfuerzo, sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a procesos de plastificación en metales. El acero ha sido sin duda el metal más empleado en disipadores. Entre sus virtudes están las posibilidades constructivas que ofrece, su bajo costo y su elevada ductilidad[5]. Estos dispositivos aprovechan la plastificación de los metales (cuando se deforman en el rango inelástico) para disipar energía. Se concluye que para reducir la respuesta estructural, es preferible disipar energía a partir de rangos bajos de fuerza y desplazamiento[18]. Las características particularmente deseables de

¹Existen resultados experimentales que indican que el acero ensayado bajo condiciones cuasiestáticas puede llegar a manifestar valores del límite de fluencia y de tensión máxima de rotura inferiores en un 17% y 3% respectivamente a los obtenidos con velocidades de deformación del 10%/s.

estos dispositivos son su comportamiento estable, su fiabilidad a largo plazo, y en general la buena resistencia que tienen ante los factores ambientales y de temperatura.

■ **Disipador ADAS**

Uno de los disipadores más conocidos y estudiados es el conocido sistema con el nombre de ADAS (Added Damping And Stiffness), el cual es un dispositivo formado por un conjunto de chapas en paralelo, de espesor constante y sección variable en forma de “X” Figura 2.12. Este sistema frontalmente es similar a dos trapecios unidos por la base menor. El número frontal de chapas en paralelo resulta variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura a la cual se incorpora. Cada placa del dispositivo se encuentra impedida de giro en ambos extremos, de forma que un desplazamiento relativo entre estos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétricos y con doble curvatura[18]. El ancho del disipador

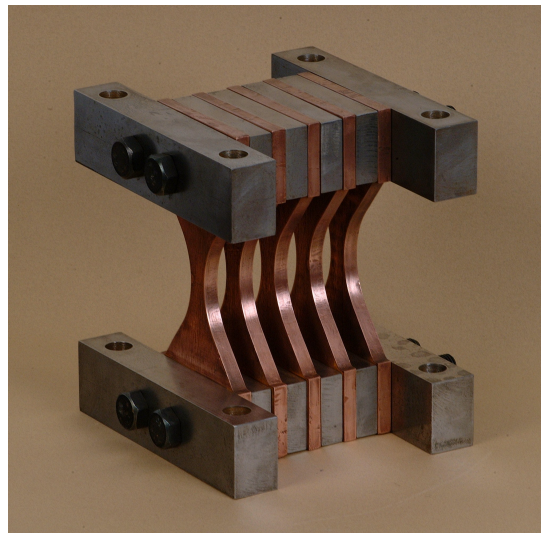


Figura 2.12: Sistema ADAS

se proporciona linealmente con la distribución de momentos flectores, lo cual deriva en una generalización de la plastificación en un corto intervalo de desplazamiento. La plastificación se produce de forma uniforme y estable, optimizando el proceso de disipación de energía.

■ **Disipador TADAS**

Cuya sigla en inglés es “Triangular Plate Added Damping And Stiffness”. Al igual que el ADAS, está formado por un conjunto de placas trapezoidales de acero paralelas y de espesor constante. El hecho de que las placas se encuentren con un extremo empotrado y el otro articulado, condiciona la forma trapezoidal, que posibilita también una distribución global de la plastificación. La base menor de la placa se conecta al nivel de viga a una estructura aporticada, mientras que la otra se articula con una unión de bulón a dos contravientos dirigidos a la base de los pilares del pórtico. Con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple. Al incorporar este sistema en un pórtico de acero a escala natural se ha observado que las reducciones en la respuesta son similares a las obtenidas con el ADAS.[5]



Figura 2.13: Dispositivo TADAS

■ **Disipador Honey-Comb**

Recibe este nombre por su similitud a un panel de abejas (Honeycomb), es de desempeño unidireccional, de acero hysterético, formado por una placa con aberturas en forma de rejilla en el centro del mismo. Geométricamente el amortiguador es concebido para tener una alta rigidez y capacidad de disipación de energía, induciendo una deformación plástica homogénea en todo el elemento.

Este dispositivo disipa energía, a través de su plastificación utilizando la deformación entre miembros estructurales. La tensión de fluencia de los amortiguadores es seleccionada de acuerdo a la excitación de la perturbación de entrada. [15]



Figura 2.14: Disipador Honey-Comb

b.- Disipadores por Friccion

Estos dispositivos disipan energía por medio de la fricción que se produce durante el desplazamiento relativo entre dos o más superficies en contacto. Estos disipadores son diseñados para activarse una vez que se alcanza un determinado nivel de carga en el dispositivo. Mientras la sollicitación no alcance dicha carga, el mecanismo de disipación se mantiene inactivo. La Figura 2.15 muestra un esquema de un disipador friccional. Estos

disipadores pueden ser materializados de varias maneras, incluyendo conexiones deslizantes con orificios ovalados o SBC (Slotted Bolted Connection).

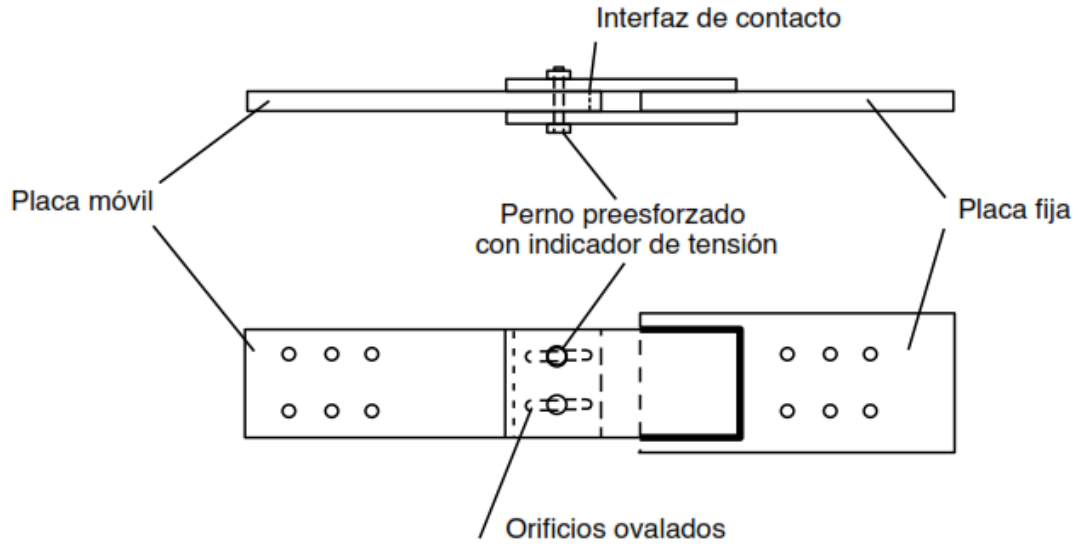


Figura 2.15: Conexión tipo SBC (Slotted Bolted Connection).

La Figura 2.16 muestra un esquema del disipador friccional tipo Pall. Una desventaja importante de este tipo de dispositivo radica en la incertidumbre de la activación de los dispositivos durante un sismo y en el aumento de la probabilidad de observar deformaciones residuales en la estructura. El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos disipadores es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto. Consecuentemente, resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores. Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en rango lineal, mientras que esta influencia puede ser significativa si esta entra en rango no lineal.

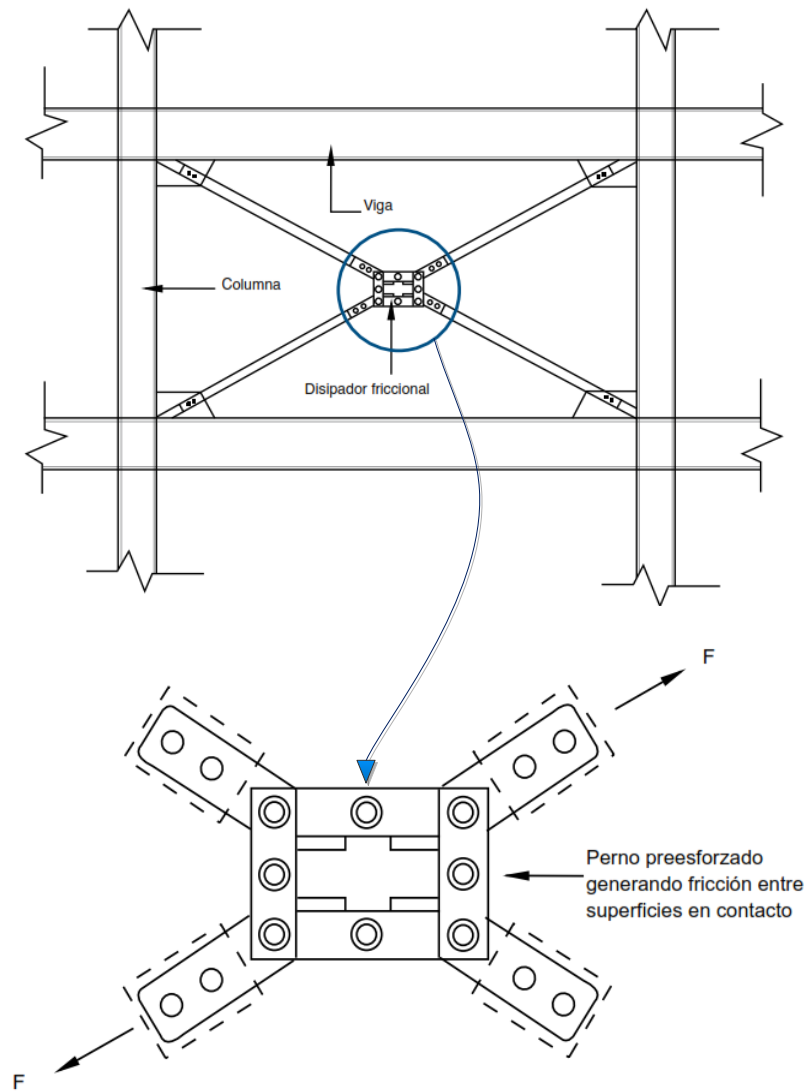


Figura 2.16: Esquema disipador de energía tipo Pall.

2.4.2. Disposiciones Constructivas

Normalmente, los disipadores se colocan cuando la estructura principal porticada ya soporta la mayor parte de la carga vertical, de forma que el sistema disipativo se limita a resistir las acciones horizontales. Tal como se indica en la Figura 2.17, el sistema dual no estándar (con disipadores), con la finalidad de analizar el comportamiento y dimen-

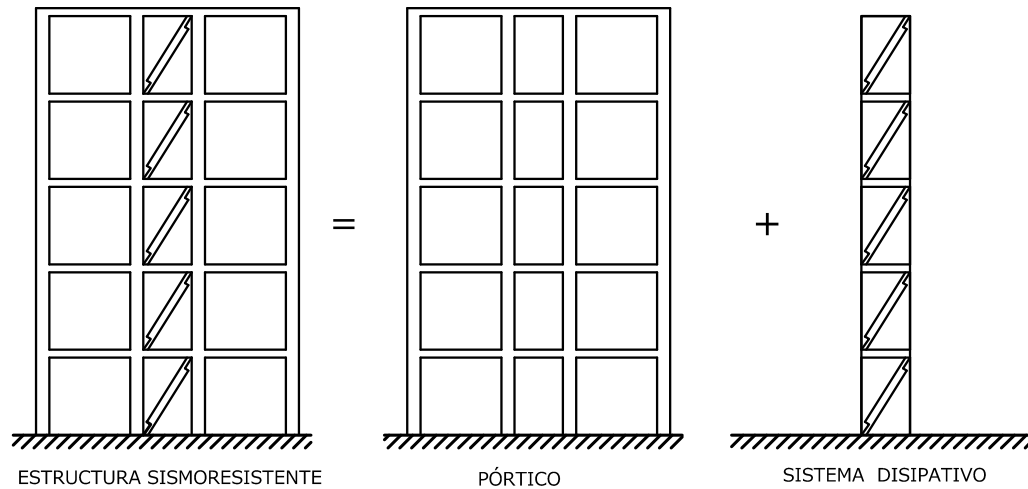


Figura 2.17: Subsistemas estructurales de una estructura sismorresistente con disipadores de energía.

sionamiento, se divide en dos subsistemas: uno constituido por la estructura porticada convencional (subsistema flexible) y otro consistente en el sistema disipativo (subsistema rígido). Establecer que los dispositivos no están condicionados por las acciones verticales es una hipótesis adoptada con frecuencia, y que se cumple, en mayor o menor grado, en función de la configuración adoptada por el conjunto del sistemas disipativo.[17]

2.4.3. Sistemas de Conexión entre Disipadores y la Estructura Porticada

En las siguientes figuras se representan las configuraciones más recurridas, en el proceso de colocación de los distintos tipos de los disipadores de energía. En los casos C, E y F resulta conveniente efectuar el montaje del sistema disipativo con la mayor parte de la carga vertical presente, pues ésta pueden afectar negativamente al comportamiento de las diagonales y al de los propios disipadores.[17] El sistema A se ha propuesto o utilizado entre otros con los siguientes disipadores: Disipadores viscoelásticos, y sistemas de

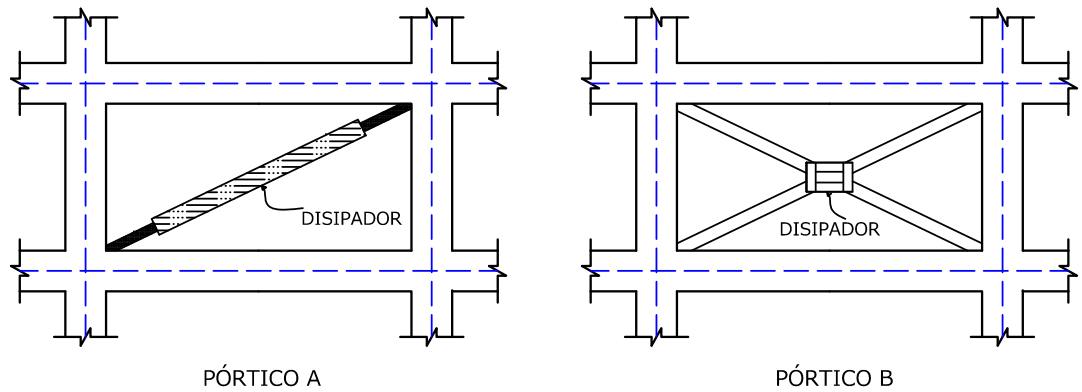


Figura 2.18: Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada

fricción, principalmente. El sistema B se emplea básicamente en el dispositivo de fricción de Pall y Marsh como indicado en la Figura 2.16. Ambos sistemas presentan ventajas

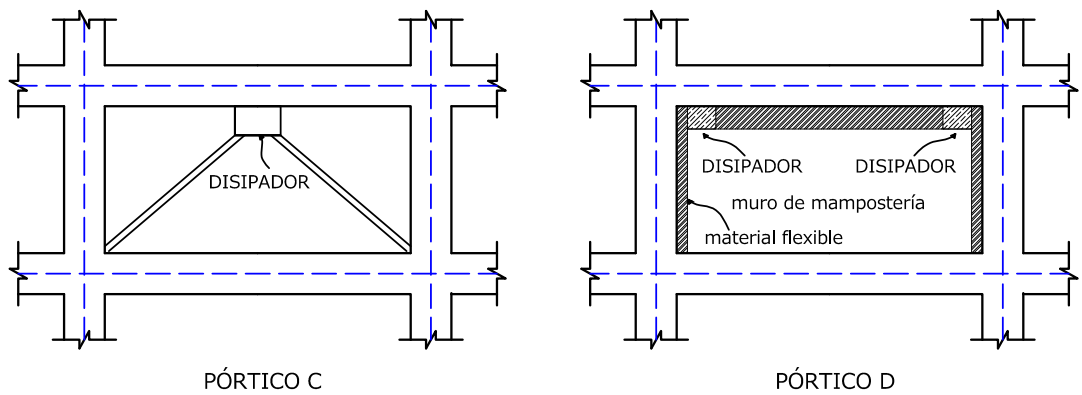


Figura 2.19: Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada

como: independencia de las cargas verticales, y menor inclinación de las barras que en el arriostramiento en forma de A, lo cual supone menores cargas en las diagonales y menores componentes verticales en los disipadores. El sistema C se ha empleado para la sujeción de una amplia variedad de dispositivos como el sistema ADAS, TADAS y en varios tipos

de disipadores por plastificación por corte. No obstante a que se ha utilizado en varios tipos de disipadores presenta inconveniencias. Las diagonales y los disipadores pueden verse afectados por cargas verticales debidas a flechas diferidas en el hormigón o debidas a cargas posteriores a la fijación del sistema o por acciones verticales de origen sísmico. Así mismo la mayor inclinación de las diagonales produce mayores componentes verticales en los disipadores.[17]

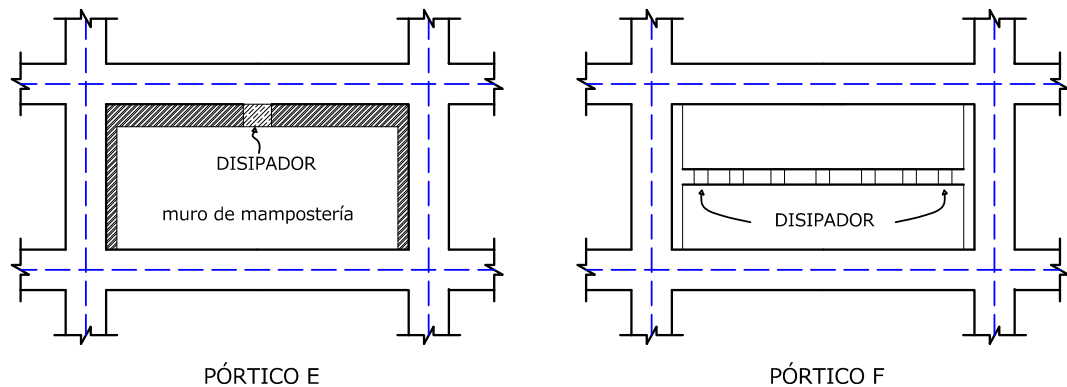


Figura 2.20: Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada

El sistema E impone una carga vertical considerable a los propios dispositivos, por lo cual deben manifestar una determinada resistencia respecto a este componente. Este sistema se ha propuesto, para el caso de los disipadores tipo panal o "honeycomp", como la mostrada en la Figura 2.14. Las configuraciones D y E se proponen para la rehabilitación de edificios porticados con particiones de mampostería, reforzando adecuadamente las mismas o partiendo de su capacidad real para su aprovechamiento como elementos estructurales frente a las acciones sísmicas.[17]

2.4.4. Distribución Vertical del Sistema Disipativo

Un aspecto muy importante a considerar dentro de las disposiciones constructivas es la distribución vertical del sistema disipativo. En las figuras: 2.21, 2.22 y 2.23 se pueden observar disposiciones con arriostramientos en A y en diagonal. Si bien es cierto que los arriostramientos resultan eficientes para reducir los desplazamientos laterales, resulta que, en comportamiento elástico, aumentan notablemente el cortante de base. La introducción de mecanismos disipativos en el sistema de respuesta horizontal permite controlar de forma efectiva los desplazamientos de entre piso con valores aceptables del cortante de base. Otro aspecto a considerar en la distribución vertical, es si resulta más conveniente instalar disipadores en todas las plantas o sólo en algunas de ellas.

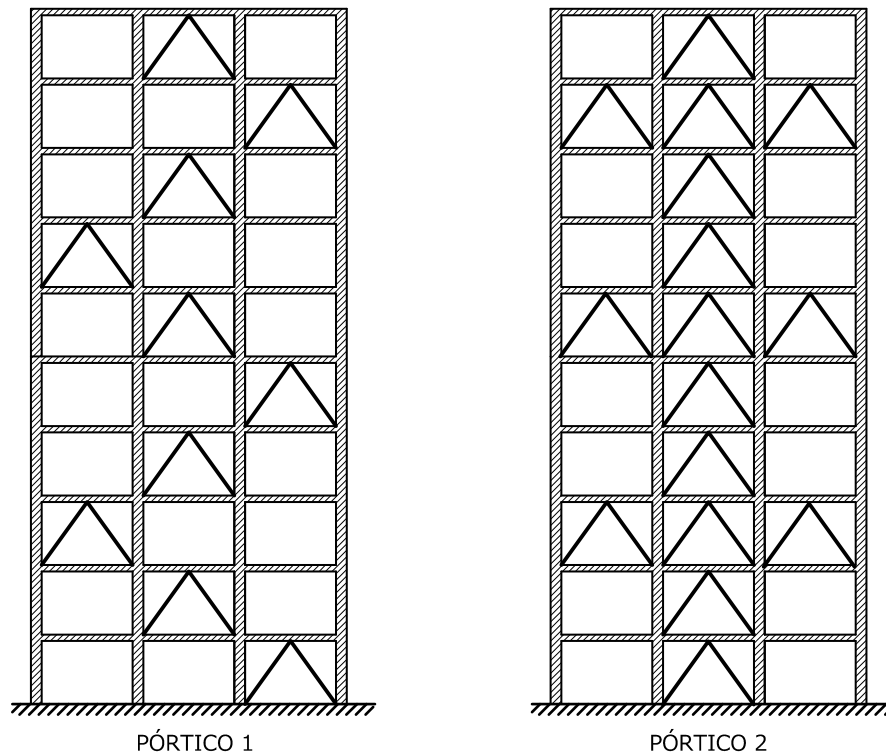


Figura 2.21: Distribución vertical del sistema disipativo, configuración 1 y 2.

Para encontrar la respuesta a la pregunta planteada en el renglón anterior se han realizado estudios comparativos mediante el Método de Elementos Finitos del comportamiento ante

acción sísmica de edificios en ambas situaciones. Con disipadores de energía en cada planta de la edificación y cada cinco plantas. Este estudio se ha realizado en edificaciones de 5, 10 y 15 plantas. Los resultados muestran un mejor comportamiento de las estructuras que presentan la segunda distribución, es decir cada 5 plantas, por varias razones, entre ellas el “input” energético resulta notablemente inferior con la distribución de disipadores cada 5 plantas y los disipadores concentrados en cada 5 plantas absorben un mayor porcentaje de la energía introducida al sistema estructural (edificación).

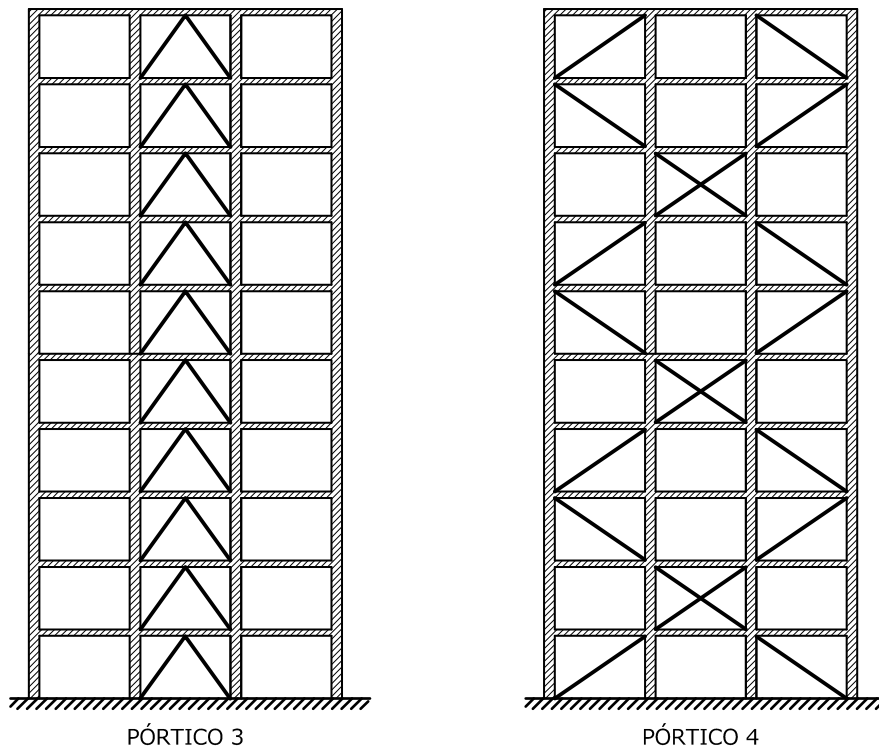


Figura 2.22: Distribución vertical del sistema disipativo, configuración 3 y 4.

En los últimos años se ha masificado el empleo de los disipadores de energía en los países como: Estados Unidos, Japón, México y Chile, gracias al buen comportamiento que estos presentaron en los terremotos de Northridge (1994) y Kobe (1995). Sin embargo, en algunos países como en el caso de Perú ésta tecnología es reciente a partir del año 2007, como hemos mencionado al inicio de la presente investigación. Por esta razón, nos interesa

conocer las ventajas y desventajas que puede tener la incorporación de la tecnología de disipadores de energía en la edificación Peruana.

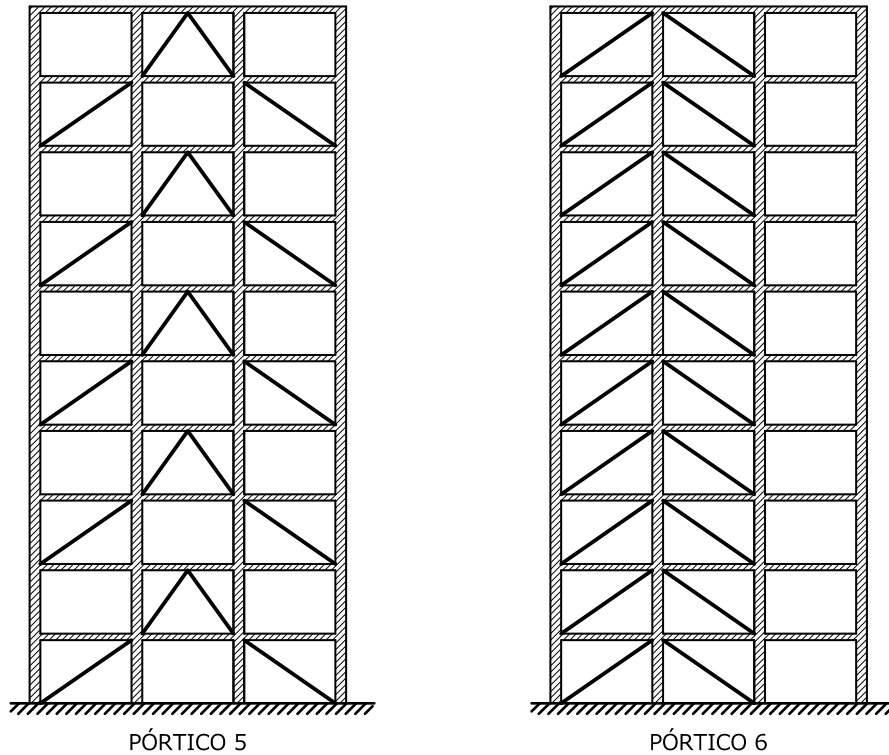


Figura 2.23: Distribución vertical del sistema disipativo, configuración 5 y 6.

2.4.5. Tipo de Disipador Utilizado en la Presente Investigación

El tipo de disipador empleado en la presente investigación es el disipador Histerético por Plastificación de Metales tipo ADAS como lo mostrado en la Figura 2.12. Los dispositivos ADAS al ser ensayadas frente a una carga perpendicular a su plano (asumiendo doble empotramiento) dan como resultado un diagrama de momentos con doble curvatura. Los resultados de los ensayos muestran que los disipadores del tipo ADAS:

- Tienen una respuesta estable que no depende de las amplitudes de excitación.
- Los ciclos de carga y descarga son simétricos.

- Los ciclos de carga y descarga no se ven afectados significativamente por las frecuencias de excitación.
- Para grandes deformaciones angulares, se presentan asimetrías como consecuencia de cargas axiales de tensión que originan deformaciones remanentes, produciendo pandeo al pasar por la posición original.
- Su comportamiento histerético no depende de la velocidad de deformación.

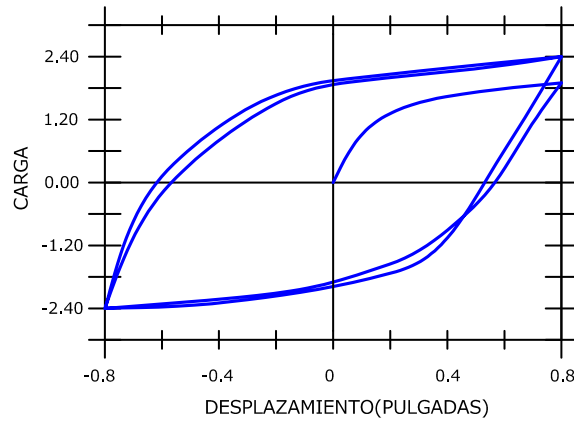


Figura 2.24: Respuesta histerética ADAS en los primeros ciclos de carga.

El mecanismo de incorporación de los disipadores, al sistema estructural, se hará a través de diagonales del tipo Chevron, como se muestra en la Figura 2.19-c. Las diagonales Chevron son elementos metálicos en forma de “V” invertida que unen el disipador de energía a los pórticos en el centro de la luz de la viga.

2.4.6. Bases Teóricas del Modelo Dinámico

La ecuación de equilibrio dinámico del movimiento de una estructura plana o tridimensional de varios grados de libertad, se puede expresar como:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + L^T f = -Mr\ddot{u}_g \quad (2.4.2)$$

En donde:

M = Matriz de masa de la estructura lineal.

K = Matriz de rigidez de la estructura lineal.

C = Matriz de amortiguamiento de la estructura lineal.

r = Vector de influencia del input \ddot{u}_g .

$f = f(v, \dot{v}, t)$, es el vector de fuerzas no-lineales de los disipadores, y depende de las deformaciones y velocidades de deformación de los sistemas de protección sísmica¹.

L= Es la matriz de transformación cinemática que relaciona las deformaciones v de los sistemas de protección sísmica con los grados de libertad u de la estructura, esto es:

$$v = Lu \tag{2.4.3}$$

Con:

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}_{n \times n}$$

Dónde “n” es el número de pisos de la estructura analizada. Para la resolución de la ecuación 2.4.2, normalmente se emplea el Método de Espacio de Estado, que analiza la respuesta de un sistema usando el desplazamiento y la velocidad como variables independientes, y estas variables son llamadas *estado*[13].

La interpretación de las ecuaciones de movimiento de una estructura a través de una formulación de primer orden en espacio de estado permite usar algoritmos de diferenciación numérica como Runge-Kutta. De esta forma es posible integrar en forma exacta el comportamiento lineal de la estructura y concentrar el análisis del comportamiento no-lineal

¹Sistemas de Protección Sísmica, son sistemas de control estructural ante sismo, los cuales se clasifican en: Pasivos, activos, semiactivos e híbridos.

a los disipadores con el término $L^T f$ en la ecuación 2.4.2. En problemas estructurales, el estado del sistema se define como el vector de desplazamientos y velocidades de las masas en movimiento, para poder aplicar este método, es preferible como primer paso, reescribir la ecuación del movimiento 2.4.2 como:

$$\ddot{u} = -M^{-1}Ku - M^{-1}C\dot{u} - M^{-1}L^T f - r\ddot{u}_g \quad (2.4.4)$$

Dónde:

$L^T f$ = Corresponde a la contribución de fuerzas no lineales.

Se define el vector x para representar el desplazamiento y velocidad del sistema:

$$x = \begin{pmatrix} u \\ \dot{u} \end{pmatrix}; \text{ Como el vector estado.}$$

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \ddot{u} \end{pmatrix}; \text{ Como la derivada del vector de estado.}$$

Finalmente la ecuación 2.4.4 se compacta como:

$$\dot{x} = Ax + B_f f + B_u \ddot{u}_g \quad (2.4.5)$$

Dónde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2nx2n}$$

$$B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}L^T \end{bmatrix}_{2n \times n}$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ -r \end{bmatrix}_{2nx1}$$

Para un sistema de n G.D.L., el orden de las matrices del sistema esta definido por los $2n$ estados, estos son n desplazamientos y n velocidades. La ecuación 2.4.5 es una ecuación diferencial matricial lineal de primer orden del movimiento, en contraste con la ecuación 2.4.4 que es una ecuación diferencial lineal de segundo orden. Con esto, resolviendo la ecuación diferencial matricial de primer orden resultante mediante Runge-Kutta, se puede enfrentar la solución de cualquier sistema dinámico tanto para tiempo continuo como para valores discretos[15].

2.4.7. Disipación de Energía

La comprensión del concepto físico de conservación de energía, es la base para el planteamiento de innovaciones en cualquier sistema estructural[13]. Los tres tipos de elementos que forman los sistemas vibratorios son:

- **Elementos de inercia**

Almacenan y liberan energía cinética, y están asociados con la aceleración del sistema.

- **Elementos de rigidez**

Almacenan y liberan energía potencial, y están asociados con la deformación o desplazamientos.

- **Elementos de disipación**

Representan la pérdida de energía en el sistema y están asociados con la velocidad y desplazamiento.

La energía de respuesta de estos elementos se iguala a la energía externa provocada por una excitación del sistema por fuerzas y momentos externos, o por alteraciones externas provenientes de desplazamientos iniciales prescritos o de velocidades iniciales. Al integrar la ecuación 2.4.2 entre la posición inicial u_o y la posición final u de la estructura es posible obtener expresiones generales de energía en el sistema estructural[13]:

$$\int_{u_0}^u du^T (M\ddot{u}) + \int_{u_0}^u du^T (C\dot{u}) + \int_{u_0}^u du^T (Ku) + \int_{u_0}^u du^T (L^T f) = \int_{u_0}^u du^T (-Mrug) \quad (2.4.6)$$

De Dónde:

$$E_C = \int_{u_0}^u du^T M\ddot{u} = \int_{\dot{u}_0}^{\dot{u}} \dot{u}^T M d\dot{u} = \frac{1}{2} \dot{u}^T M \dot{u} \Big|_{\dot{u}_0}^{\dot{u}}; \text{ Es la energía cinética de la estructura.}$$

$$E_D = \int_{u_0}^u du^T C\dot{u} = \int_{t_0}^t \dot{u}^T C \dot{u} dt; \text{ Energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura.}$$

$$E_S = \int_{u_0}^u du^T Ku = \frac{1}{2} u^T Ku \Big|_{u_0}^u; \text{ Energía de deformación de la estructura.}$$

$$E_{SRV} = \int_{u_0}^u du^T L^T f = \int_{t_0}^t \dot{u}^T L^T f dt; \text{ Energía disipada por los SRV}^1.$$

$$E_I = \int_{u_0}^u du^T Mrug = \int_{t_0}^t \dot{u}^T Mr\ddot{u}_g dt; \text{ Energía impuesta por las cargas dinámicas (INPUT).}$$

De acuerdo al principio de balance de energía, en la medida en que se aumente la capacidad de disipación de los SRV, la disipación de energía por histéresis de la estructura disminuye y la participación de los componentes estructurales es menor, así el nivel de daño en la estructura se reduce y se concentra en los dispositivos adicionales, que son elementos totalmente identificados y fáciles de reemplazar.

¹SRV: Sistemas de control de vibraciones o sistemas de protección sísmica.

Linearización de la ecuación de movimiento

En general es posible representar, en forma aproximada, la fuerza restitutiva histerética de los disipadores f , como una combinación lineal de v y \dot{v} :

$$f = k_e v + c_e \dot{v} \quad (2.4.7)$$

Reemplazando en la ecuación 2.4.2, se obtiene:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + L^T (k_e v + c_e \dot{v}) = -Mr\ddot{u}_g \quad (2.4.8)$$

Y ahora reemplazando la ecuación 2.4.3 en esta ecuación:

$$M\ddot{u} + [C + L^T c_e(\omega)L] \dot{u} + [K + L^T k_e(\omega)L] u = -Mr\ddot{u}_g \quad (2.4.9)$$

Dónde:

$k_e = \text{diag}([k_{e1}, \dots, k_{en}])$ rigidez equivalente de los SRV en cada uno de los n pisos.

$c_e = \text{diag}([c_{e1}, \dots, c_{en}])$ amortiguamiento equivalente en cada uno de los n pisos.

$$C_e(\omega) = [C + L^T c_e(\omega)L]$$

$$K_e(\omega) = [K + L^T k_e(\omega)L]$$

Con esto se obtienen las nuevas matrices que incluyen el comportamiento de los SRV:

$$A_e = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K_e & -M^{-1}C_e \end{bmatrix}$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ -r \end{bmatrix}$$

Con esto se puede afirmar que, una vez linearizada la constitutiva de los dispositivos es posible formalizar la linearización de equilibrio dinámico de la estructura con SRV no-lineales[13].

2.4.8. Modelización de disipadores con comportamiento histerético

En el caso general no-lineal, la energía disipada en un ciclo de deformación por un sistema de reducción de vibraciones (SRV) cualquiera, está directamente relacionada con el área encerrada por el lazo de histéresis fuerza-deformación[13]. Existen varias técnicas utilizadas para introducir el comportamiento histerético del disipador a través de la variable no-lineal f a la ecuación dinámica general presentada en la sección anterior:

▪ Modelo Bilineal

Una vez obtenida la curva experimental de un disipador de energía, es necesario encontrar un modelo de comportamiento matemático que se ajuste bien a los datos y sea representativo del dispositivo. Los datos obtenidos se pueden adaptar al modelo bilineal, pues este modelo es el más recomendado para simular disipadores metálicos de comportamiento histerético. En el comportamiento del modelo bilineal, la histéresis obtenida en el test de carga cíclica es aproximada por medio de rectas, tal como lo muestra la figura 2.25, donde en ella se puede observar los siguiente:

- Una rigidez inicial k_1 , asociada a la reacción del dispositivo frente a cargas de baja magnitud.
- Una rigidez post-fluencia k_2 , asociada a la reacción del dispositivo frente a las cargas más altas del ciclo.

- F_y y d_y corresponden a la carga de fluencia y desplazamiento de fluencia. Estos parametros definen un valor de transicion para las relaciones carga-deformacion.

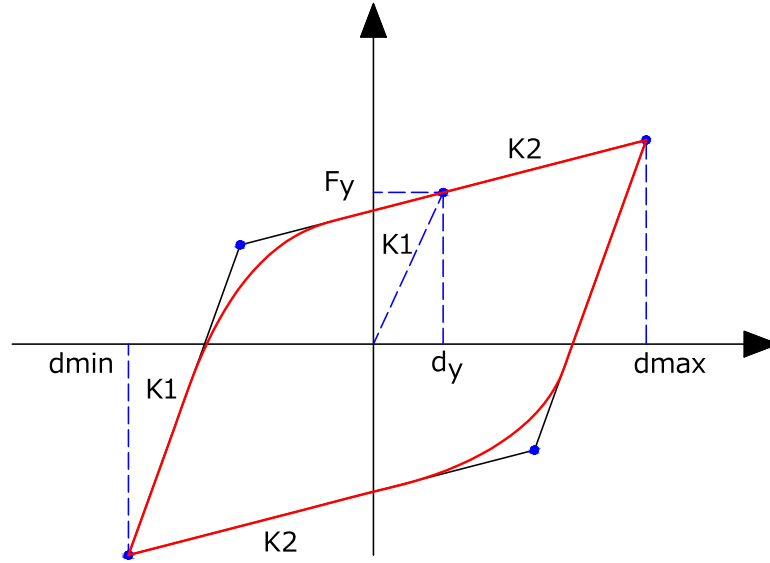


Figura 2.25: Modelo Bilineal

■ Modelo de Bouc-Wen

Este modelo se compone de una fuerza restauradora que utiliza como variable el desplazamiento, además de una variable adimensional denominada z [13].

$$f_r = \alpha k_1 x + (1 - \alpha) f_y z \quad (2.4.10)$$

La variable z es adimensional y su comportamiento viene dado por la siguiente ecuación diferencial[13]:

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta z |\dot{x}| |z|^{n-1} - \gamma \dot{x} |z|^n \quad (2.4.11)$$

2.4. Sistema de Reforzamiento con Disipadores de Energía

Los parametros A , α , β , γ , n que aparecen en la ecuacion 2.4.11 son coeficientes adimensionales que regulan la forma del ciclo histeretico, dónde “ A ” es el factor de escala general, “ α ” razón de proporción entre fuerza lineal y la fuerza no lineal, “ β ” y “ γ ” determinan la forma de la curva, “ n ” regula la suavidad de la transición entre la región lineal y no lineal.

Cabe de precisar que este modelo descrito mediante una ecuación diferencial, el cual al ser incorporado a la expresión general del dispositivo en movimiento resulta la siguiente ecuación:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f_{res}(x, z) = F(t) \quad (2.4.12)$$

Dónde:

$$f_{res}(x, z) = \alpha k_1 x + (1 - \alpha) f_y z$$

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta z |\dot{x}| |z|^{n-1} - \gamma \dot{x} |z|^n$$

La solución de la ecuación 2.4.12 esta basado en el modelo numérico de Runge-Kutta:

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i, h) h \quad (2.4.13)$$

Redefiniendo z :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{\delta_y} \left(A \frac{dx}{dt} - \beta z \left| \frac{dx}{dt} \right| |z|^{n-1} - \gamma \frac{dx}{dt} |z|^n \right) \quad (2.4.14)$$

Expresando la ecuación en forma discretizada:

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta_y} \left(A \frac{\Delta x}{\Delta t} - \beta z \left| \frac{\Delta x}{\Delta t} \right| |z|^{n-1} - \gamma \frac{\Delta x}{\Delta t} |z|^n \right) \quad (2.4.15)$$

Como Δt es una constante positiva para todos los valores del input y estableciendo

que: $|\Delta x| = \text{sign}(\Delta x)\Delta x$ la ecuación 2.4.14 queda como:

$$\Delta z = \frac{1}{\delta_y} (A\Delta x - \beta z|z|^{n-1} \text{sign}(\Delta x)\Delta x - \gamma\Delta x|z|^n) \quad (2.4.16)$$

Al factorizarse se puede resolverse por Runge-Kutta:

$$z_i = z_{i+1} + \frac{1}{\delta_y} (A - \beta z_{i-1}|z_{i-1}|^{n-1} \text{sign}(\Delta x) - \gamma|z_{i-1}|^n) \Delta x \quad (2.4.17)$$

Dónde la función de incremento viene dado por:

$$\phi = \frac{1}{\delta_y} (A - \beta z|z|^{n-1} \text{sign}(\Delta x) - \gamma|z|^n) \quad (2.4.18)$$

En la figura 2.26 se muestra el comportamiento histerético de un disipador de cobre, entre la curva experimental y la curva propuesta por el modelo de Bouc-Wen. Aquí se puede notar el nivel de aproximación que se puede lograr con esta técnica.

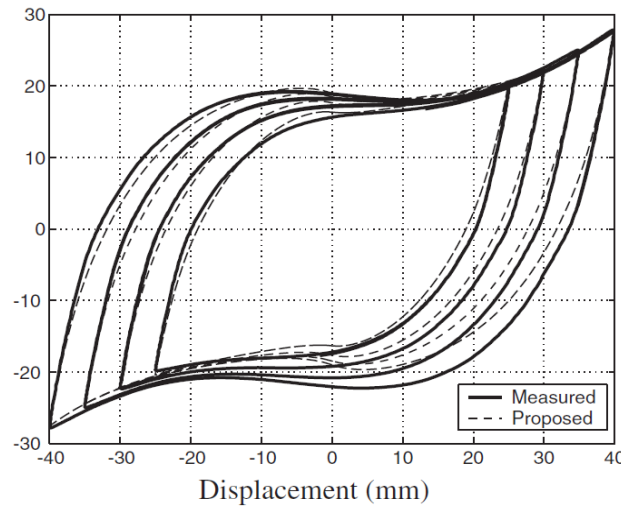


Figura 2.26: Modelo de Bouc-Wen, disipador de cobre tipo ADAS. Fuente:[9]

Interpretación Geométrica de Cada Ciclo Histerético

Una de las técnicas aproximadas más directas del análisis implica sustituir el sistema no lineal real por un sistema lineal equivalente. El amortiguamiento tiene directa relación con el área encerrada por la curva de histéresis que corresponde a la energía disipada en un ciclo. Y la rigidez secante corresponde a la pendiente de la recta relacionada con la deformación máxima alcanzada por el ciclo.

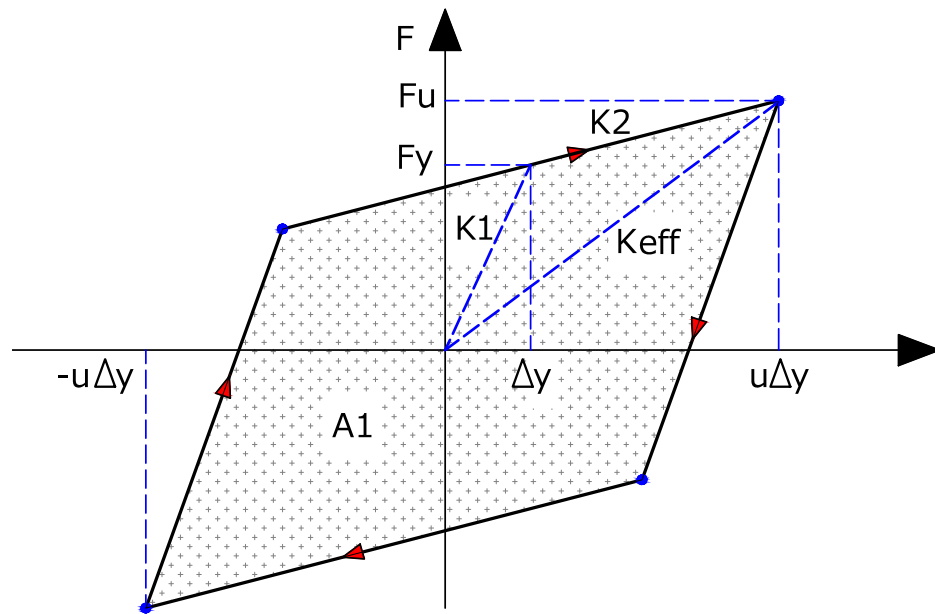


Figura 2.27: Modelo Bilineal, para la interpretación geométrica.

Este modelo considera una rigidez inicial k_1 , rigidez post-fluencia k_2 , la deformación de fluencia Δ_y , la deformación máxima $u\Delta_y$, fuerza de fluencia F_y y cortante último F_u . Se puede observar que el amortiguamiento equivalente es representado por el área $A1$ y la rigidez efectiva del ciclo es representada por la tangente de la recta K_{eff} . las características de la respuesta del sistema no lineal pueden entonces ser deducidas analizando la respuesta del sistema lineal. Esto genéricamente se refiere al método de linearización equivalente.

Linealización Equivalente

Este método consiste en minimizar la integral en un ciclo del error cuadrático entre la verdadera fuerza del sistema de reducción de vibraciones (SRV) y la estimación lineal de ella. Debido a que la deformación impuesta es armónica, el método recibe el nombre de linealización armónica[13].

Dado un SRV con comportamiento no-lineal general.

$$f = f(v, \dot{v}, z, t) \quad (2.4.19)$$

En que “z” es el vector de estado del SRV, se propone una estimación lineal de la forma:

$$\hat{f} = k_e v + c_e \dot{v} \quad (2.4.20)$$

El objetivo es minimizar la integral del error cuadrático en un ciclo:

$$J(k_e, c_e) = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} e^2 dt \quad (2.4.21)$$

Si minimizamos el error cuadrático en un ciclo derivando con respecto a los vectores de rigidez y amortiguamiento igualando a cero, se obtiene:

$$k_e = \frac{\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (v, \dot{v}, z, t) v(t) dt}{\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} v(t)^2 dt} = \frac{\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (v, \dot{v}, z, t) \delta_0 \sin(\omega t) d\omega t}{\pi \delta_o^2} \quad (2.4.22)$$

La primera igualdad es válida cualquiera sea la historia de deformación $v(t)$ y la segunda es válida solo en el caso armónico estudiado.

Al derivar con respecto a C_e , se obtiene

$$C_e = \frac{\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (v, \dot{v}, z, t) \dot{v}(t) dt}{\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \dot{v}(t)^2 dt} = \frac{\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (v, \dot{v}, z, t) \delta_0 \sin(\omega t) d\omega t}{\pi \delta_o^2 \omega} = \frac{W_d}{\pi \delta_0^2 \omega} \quad (2.4.23)$$

Linearización Equivalente Para Modelo Bilineal

El ciclo de fuerza-deformación bilineal puede ser descrita básicamente por las rigideces representadas por las pendientes de las rectas que lo conforman: rigidez inicial k_1 y rigidez post-fluencia K_2 , como lo mostrado en la figura 2.25. A partir de las ecuaciones 2.4.22 y 2.4.23 es factible determinar las propiedades equivalentes para un modelo bilineal sometido a una carga armónica.

Rigidez equivalente:

$$k_e = \frac{\delta_y}{\delta_0 \pi} \left((k_1 - k_2) \left[\left(2 - \frac{\delta_0}{\delta_y} \right) A + B \right] + (k_1 + k_2) \frac{\delta_0 \pi}{2 \delta_y} \right) \quad (2.4.24)$$

Dónde:

$$A = 2 \sqrt{\frac{(\delta_0 - \delta_y) \delta_y}{\delta_0^2}} \quad (2.4.25)$$

$$B = -\frac{\delta_0}{\delta_y} \arcsin \left(\frac{\delta_0 - 2\delta_y}{\delta_0} \right) \quad (2.4.26)$$

Amortiguamiento equivalente:

$$C_e = \frac{4 (k_1 - k_2) (\delta_0 - \delta_y) \delta_y}{\delta_0^2 \omega \pi} \quad (2.4.27)$$

Dónde:

δ_y =Deformación de fluencia y δ_0 =deformación máxima del ciclo histerético.

2.4.9. Procedimiento de Diseño de una Estructura Provistas con Disipadores de Energía Histeréticos

1. Se impone la siguiente relación, que aproximadamente varía entre 0.50 a 0.75.

$$\beta = \frac{k_1}{k_{diag}} \quad (2.4.28)$$

2. Se determina el cortante basal sísmico de diseño V_{basal} , a partir de un espectro de diseño.
3. Se determina la proporción de la rigidez lateral que van a aportar los pórticos y el sistema contraviento-disipador, a través de las siguientes expresiones:

$$K_{total} = K_{pórticos} + K_{contraviento-disipador} \quad (2.4.29)$$

$$K_{pórticos} = \alpha K_{total} \quad (2.4.30)$$

4. Se determina el cortante basal de diseño que, comportándose elásticamente, deben resistir los pórticos en ausencia de los contravientos, calculándose simplemente como:

$$V_{pórticos} = \alpha V_{total} \quad (2.4.31)$$

5. Se prediseñan columnas y vigas del marco sin contraviento para soportar la combinación de cargas laterales y verticales de diseño. Una vez prediseñados los elementos estructurales del marco, se procede a calcular su rigidez lateral.
6. A partir de conocer la rigidez y la resistencia lateral que le toca aportar al sistema contraviento-disipador, éstos se prediseñan con:

$$K_{contraviento-disipador} = (1 - \alpha) K_{total} = nK_{eq} \quad (2.4.32)$$

2.4. Sistema de Reforzamiento con Disipadores de Energía

Dónde n es el número de contravientos que se utiliza para montar los disipadores de energía y K_{eq} es la rigidez de un elemento axial equivalente, que toma en cuenta la rigidez elástica del contraviento (k_{diag}) y la rigidez efectiva del disipador de energía (k_{eff}) a la ductilidad u que se le permite desarrollar, definido en la ecuación 2.4.42. En el caso de un contraviento chevrón con un ángulo de inclinación θ , se puede demostrar que K_{eq} se calcula como:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{k_{diag}} + \frac{2\cos^2\theta}{k_{eff}} \quad (2.4.33)$$

Dónde:

$$k_{diag} = \frac{E_{diag}A_{diag}}{L_{diag}}\cos^2\theta \quad (2.4.34)$$

7. El sistema contraviento-disipador debe aportar la siguiente resistencia:

$$V_{contraviento-disipador} = (1 - \alpha) V_{total} = nV_{u_{C-D}} \quad (2.4.35)$$

Dónde $V_{u_{C-D}}$ es el cortante que aporta cada diagonal equivalente contraviento-disipador. Esta resistencia estará controlada por la fluencia de los disipadores a la capacidad de deformación u . Por lo tanto, en una configuración del tipo chevrón, se tiene que el cortante último de diseño de cada disipador V_{uDDE} se calcula como:

$$V_{uDDE} = 2V_{u_{C-D}} \quad (2.4.36)$$

De la curva bilineal primaria del disipador de la figura 3.14, se sabe que esta resistencia se desarrolla a la capacidad de deformación del dispositivo, por lo tanto, se calcula también como:

$$V_{uDDE} = F_u = (K_{eff})(u)(\Delta_y) \quad (2.4.37)$$

El mejor comportamiento que presentan las estructuras provistas del disipador hasta 15 pisos, es para un valor de $\alpha=0.25$, según Horacio de Jesús Nanguillasmú Hernández[14]

2.4.10. Procedimientos Simplificados de Diseño de los Dispositivos tipo ADAS y el Contraviento

La figura 2.28 representa el modelo bilineal de un disipador Tipo ADAS, en la cual la rigidez k_2 oscila alrededor de 5 a 10% de la k_1 , pero para fines de diseño se puede asumir 5% de la rigidez elástica. Así mismo los dispositivos ADAS son capaces de desarrollar demandas de ductilidad locales del orden de 10, esto permite tomar dicho valor como un indicador para fines de diseño[7].

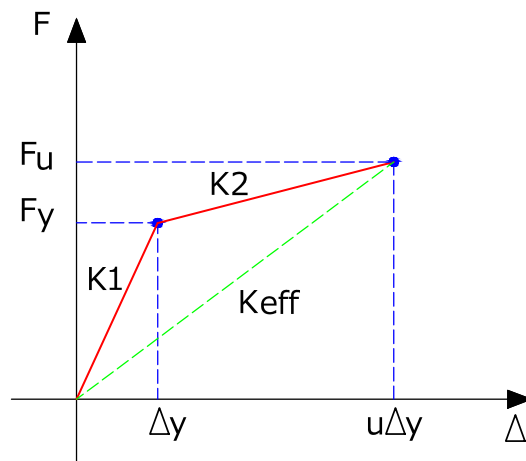


Figura 2.28: Curva fuerza-deformación de un disipador de energía con comportamiento bilineal.

Si se asume un modelo bilineal para representar el comportamiento mecánico del disipador se puede estimar los valores de esfuerzo de fluencia y el desplazamiento de fluencia mediante las siguientes expresiones que corresponden a una viga en forma de “X” doblemente empotrada[7].

▪ Fuerza de Fluencia

$$F_y = n \left(\frac{\sigma_y b t^2}{2h} \right) \quad (2.4.38)$$

▪ Desplazamiento de Fluencia

$$\Delta_y = \frac{3\sigma_y h^2}{4Et} \quad (2.4.39)$$

▪ Rigidez Elástica Inicial

$$k_1 = n \left(\frac{2Ebt^3}{3h^3} \right) \quad (2.4.40)$$

▪ Ductilidad

$$u = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2.4.41)$$

▪ Rigidez Efectiva

$$k_{eff} = \frac{k_1 + k_2(u - 1)}{u} \quad (2.4.42)$$

▪ Rigidez de los Contravientos

$$k_{diag} = \frac{E_{diag} A_{diag}}{L_{diag}} \cos^2 \theta \quad (2.4.43)$$

Es importante recalcar que en el diseño de los contravientos no basta con definir su rigidez con la ecuación 2.4.43 sino también revisar que estos se mantengan elásticos cuando los disipadores desarrollen su cortante ultimo a la ductilidad u . Por lo tanto, la carga axial máxima que debe resistir cada contraviento en montado chevron es:

$$P_{diag} \geq \frac{F_u}{2 \cos \theta} \quad (2.4.44)$$

Para ello se debe Diseñar de acuerdo a la Norma Técnica de Edificaciones E.090 de Estructuras Metálicas y/o AISC. En las expresiones anteriores “ n ” representa el número de disipadores, “ E ” módulo de elasticidad del disipador, “ b ” base del disipador, “ t ” espesor del disipador, “ h ” altura del disipador y σ_y esfuerzo de fluencia del disipador.

Contravientos Matéricos en Chevron.

Los contravientos metéricos se modelan como elementos axiales, considerando un comportamiento elástico a tensión y a compresión, determinando la capacidad a compresión de los contravientos considerando que sus condiciones de apoyo corresponden a un apoyo simple $k = 1$ y tomando en cuenta sus relaciones de esbeltez $\frac{kL}{r}$ a la hora de determinar su capacidad nominal conforme a las Norma E.090 y AISC.

▪ Resistencia a Tensión

$$P_{diag} = \phi P_n = \phi F_y A_g \quad (2.4.45)$$

Con: $\phi = 0,90$

F_y =Esfuerzo de fluencia.

A_g =Area total del elemento.

▪ Resistencia a Compresión

$$P_{diag} = \phi P_n = \phi F_{cr} A_g \quad (2.4.46)$$

Donde:

$$F_{cr} = \left(0,658\lambda_c^2\right) F_y \quad \text{si:} \quad \lambda_c \leq 1,5$$

$$F_{cr} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2}\right) F_y \quad \text{si:} \quad \lambda_c > 1,5$$

En la cual:

$$\lambda_c = \frac{kL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad ; \quad \phi = 0,85$$

2.5. Tipos de Análisis Sísmicos de Estructuras Provistas con Disipadores de Energía

2.5.1. Procedimientos de Diseño

Según ASCE/SEI 7-10, una estructura con un sistema de amortiguación será diseñado utilizando procedimientos lineales, procedimientos no lineales, o una combinación de procedimientos lineales y no lineales[1, Capítulo 18]. A continuación indicamos los procedimientos lineales y no lineales:

Análisis Lineales

- Análisis Estático o Fuerza Lateral Equivalente.
- Análisis de Respuesta Espectral o Dinámico Modal Espectral.

Análisis No Lineales

- Análisis Estático no Lineal o Pushover.
- Análisis Dinámico no Lineal.

Descripción breve de cada uno de ellos según ASCE/SEI:

Análisis Estático o Fuerza Lateral-Equivalente

- En la dirección de análisis sísmico se tiene por lo menos dos disipadores de energía por piso, para resistir la torsión.
- El amortiguamiento efectivo total en el modo fundamental de la estructura en la dirección de análisis no sea mayor que el 35 % ($\beta_{1D} \leq 35\%$).

2.5. Tipos de Análisis Sísmicos de Estructuras Provistas con Disipadores de Energía

- El sistema sismo resistente no tiene irregularidades tanto en planta como en elevación.
- Los diafragmas de piso (forjados o losa) son completamente rígidos.
- La altura de la estructura como máximo 30m.

Análisis de Respuesta Espectral o Dinámico Modal Espectral

- En la dirección de análisis sísmico se tiene por lo menos dos disipadores de energía por piso, para resistir la torsión.
- El amortiguamiento efectivo total en el modo fundamental de la estructura en la dirección de análisis no sea mayor que el 35 % ($\beta_{1D} \leq 35\%$).

Análisis Estático no Lineal

Son aplicados para el diseño de todas las estructuras con sistemas de amortiguación, siguiendo el procedimiento indicado en el numeral 18.3.2 de ASCE/SEI 7-10.

Análisis Dinámico no Lineal

También son aplicados para el diseño de todas las estructuras con sistemas de amortiguación, siguiendo el procedimiento indicado en el numeral 18.3.1 de ASCE/SEI 7-10.

2.5.2. Elección de Tipo de Análisis

Para la presente investigación el tipo de análisis sísmico elegido es el Análisis Dinámico no lineal o llamado también Historias de Tiempo. La elección de la metodología del diseño obedece a la tipología estructural y el lugar de emplazamiento del proyecto o la edificación

Rediseñada. Así mismo debo destacar que la Norma ASCE/SEI 7-10[1] menciona claramente como procedimiento obligatorio los análisis dinámicos si la estructura analizada se encuentra ubicado en una zona dónde la aceleración del suelo es 0.6g. Cabe de señalar que la estructura rediseñada en la presente investigación se encuentra emplazada en una zona tipo 2, aceleración máxima de 0.25g del suelo según la Norma técnica Peruana de Edificaciones E.030[2], por lo que este análisis realizado constituyá una aproximación mucho más realista.

2.6. Generación de Registros Sintéticos o Artificiales

Para la generación de acelerogramas sintéticos emplearemos la metodología desarrollada por [Gasparini D., Vanmarcke E.H.(1976)][8]. Para dicho fin emplearemos el programa ***SeismoArtif*** de SEISMOSOFT, de distribución completamente libre en el mercado para fines académicos. Este software emplea cuatro opciones para generar acelerogramas sintéticos, en esta investigación emplearemos sólo la opción que genera acelerogramas sintéticos compatibles con el espectro de diseño propuesto en las normativas sísmicas.

2.6.1. Modelo

Los acelerogramas que el modelo permite generar se expresan como historias de aceleraciones compatibles con un espectro de respuesta dado. El método se basa en el hecho de que, bajo determinadas condiciones, cualquier función que use las características de las señales sísmicas puede ser expresada como una superposición de ondas sinusoidales moduladas por una función temporal envolvente que, para nuestro caso, define la forma del acelerograma[15]:

$$\ddot{X}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (2.6.1)$$

Dónde:

A_i =Amplitudes, generadas a partir de una *Función de Densidad Espectral de Potencia*.

ϕ_i =Angulo de fase de la i -ésima contribución sinusoidal (varía entre 0 y 2π).

Para simular la naturaleza transitoria de los terremotos , los movimientos de estado estacionario se multiplican por una forma determinista (o función de intensidad) $I(t)$:

$$\ddot{Z}(t) = I(t) \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (2.6.2)$$

La energía total de un movimiento estacionario es:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i^2}{2} \right) \quad (2.6.3)$$

Estas amplitudes se calculan utilizando la función de densidad espectral de potencia, los ángulos de fase varían de 0 a 2π , siguiendo una probabilidad de distribución uniforme, las amplitudes están relacionadas con la función de densidad espectral de potencia como sigue:

$$G(\omega_i)\Delta\omega = \frac{A_i^2}{2} \quad (2.6.4)$$

$G(\omega)\Delta\omega$ representa la contribución a la potencia total del movimiento de la senoide con frecuencia ω_i . Si el número de ondas sinusoidales considerados en el movimiento es muy grande , la potencia total se convertirá en el área bajo la curva continua $G(\omega)$, como se indica en la siguiente expresión :

$$\sum \frac{A_i^2}{2} = \sum G(\omega_i)\Delta\omega \approx \int_0^{\infty} G(\omega)d\omega \quad (2.6.5)$$

Este método de generación de acelelograma artificial es iterativo, para cada ciclo i el espectro de respuesta generado por el movimiento de terreno simulado, se compara con el de destino (en un conjunto de frecuencias de control). La relación entre la respuesta

deseada y la respuesta calculada se define en cada ciclo y la correspondiente función de densidad espectral de potencia, se vuelve a calcular como una función del cuadrado de la relación antes mencionada como se indica en la siguiente expresión:

$$G(\omega)_{i+1} = G(\omega)_i \left(\frac{S_v^{(\omega)}}{S_v^{(i)}} \right)^2 \quad (2.6.6)$$

Dónde:

S_v =Pseúdo espectro de velocidad objetivo.

$S_v^{(i)}$ =Espectro de velocidad calculada.

2.6.2. Parámetros Espectrales

Forma de envolventes

La duración del sismo y la variación de la intensidad en el tiempo se definen mediante las Funciones de Intensidad. Por lo tanto para simular el carácter transitorio de los terremotos reales, el programa *SeismoArtif* presenta 6 formas de intensidad envolventes:

- Estacionario
- Trapezoidal
- Exponencial
- Compuesta
- Saragoni y Hart
- Trigonométrica

Para la presente investigación emplearemos la función **compuesta**, la cual representa mejor la forma típica de los terremotos *interplaca subductivos*.

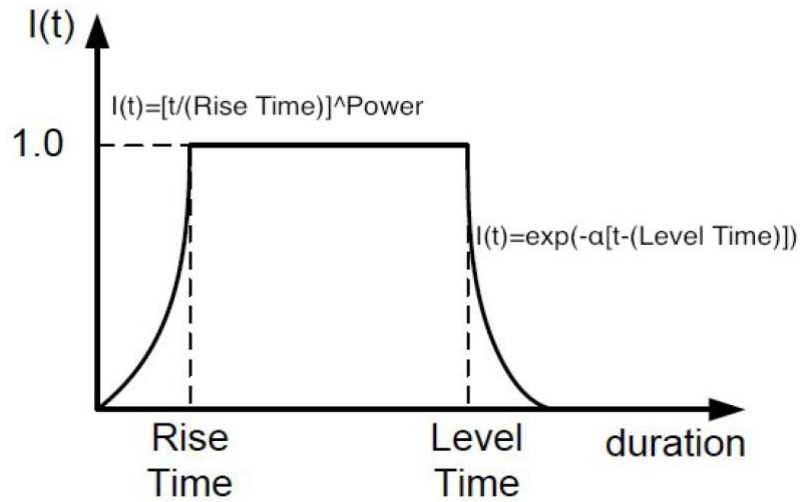


Figura 2.29: Función tipo compuesta. Fuente:[15]

Esta función tiene tres tramos:

- El primero de tipo “potencial”, asociado al incremento de las aceleraciones en la fase inicial de un terremoto.
- El segundo de tipo “constante”, modela la parte fuerte del movimiento, que son las mayores aceleraciones del suelo.
- El tercer tramo que es de tipo exponencial, representa decaimiento de las aceleraciones.

Para definir esta función de envolvente es necesario definir algunos términos asociados a la curva como:

Rise Time

Tiempo de elevación, Gatica[15] menciona en su investigación que para terremotos interplaca de subducción un valor característico de 17 segundos.

Tiempo de duración de movimiento fuerte

Tiempo comprendido entre Rise Time y Level Time, Gatica[15] menciona formulas de atenuación para la duracion del movimiento fuerte de terremotos Interplaca subductivos:

$$\Delta t_s = 0,285e^{0,596M_L} \quad (2.6.7)$$

Para $D < 55\text{Km}$

$$\Delta t_s = \frac{0,0902e^{0,8M_L}}{R^{0,174}} \quad (2.6.8)$$

Para $D > 55\text{Km}$

Dónde:

M_L =Magnitud Richter, R =Distancia hipocentral (Km).

Level Time

Se define como el tiempo que demora el terremoto en desaparecer, y se obtiene como la suma de los tiempos Rise Time y Level Time.

Power

Corresponde al exponente de la función del tipo “potencial” para el tramo inicial de la función de intensidad. Se asume el valor 3 por defecto.

Duration

Duración aparente de un sismo. Valor asociado a los efectos destructivos, dependiente de los mecanismos de fuente y terreno. Gatica[15] cita la siguiente relación empírica para

calcular la duración:

$$\ln(D) = -1,04 + 0,44M_w + 0,19\ln(R) + 0,004S + 0,48 \quad (2.6.9)$$

Dónde:

D=Duración del movimiento sísmico(seg).

M_w =Magnitud del momento.

R=Distancia hipocentral(Km).

S=Parámetro relativo al tipo de suelo(S=1 para $V \leq 750m/s$ y S=0 para roca).

2.6.3. Datos para Generar el Registro Sintético

Se presentan los datos sísmicos¹ que sirven de base para la generación del acelelograma artificial compatible con el suelo clasificado como *suelo intermedio* según la Norma Técnica Peruana E.030, en la Ciudad de Ayacucho Perú.

DATOS SÍSMICOS	
M_L	6,6
Duración	60 seg
Rise Time	17 seg
Level Time	31 seg
Máxima aceleración del suelo	0,25g

Cuadro 2.2: Datos para simular el movimiento del suelo.

El espectro de respuesta objetivo es el Pseudo Espectro de Aceleración propuesta en la Norma Técnica de Edificaciones de Diseño Sismoresistente E.030[2], para un amortiguamiento típico de 5 %.

¹El sismo se registró el 24 de agosto de 2014, en el Localidad de Cora-Cora, departamento Ayacucho-Perú, presentando una magnitud moderada (6.6 M_L /6.8 M_W). Su epicentro fue localizado a 35Km al norte de la localidad de Cora-Cora, presentando foco a una profundidad de 108km[21].

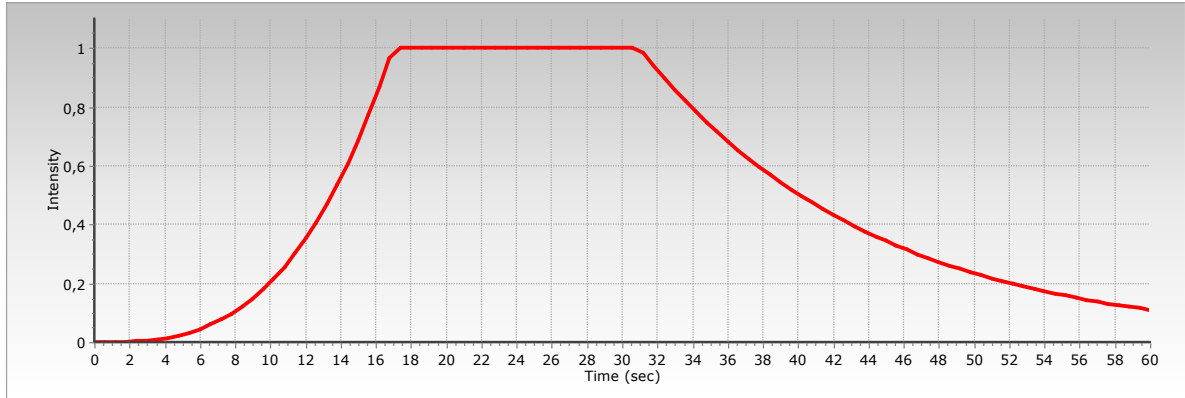


Figura 2.30: Función de Intensidad.

Espectro de Diseño de la Norma Técnica Peruana E.030

El espectro de diseño de la Norma Técnica Peruana está dado por:

$$S_a = \frac{Z.U.C.S}{R}g \quad (2.6.10)$$

Dónde “C” es:

$$C = 2,5 \quad \text{si :} \quad T < T_P \quad (2.6.11)$$

$$C = 2,5 \left(\frac{T_P}{T} \right) \quad \text{si :} \quad T_P < T < T_L \quad (2.6.12)$$

$$C = 2,5 \left(\frac{T_P \cdot T_L}{T^2} \right) \quad \text{si :} \quad T > T_L \quad (2.6.13)$$

Parámetros sísmicos	
Aceleración máxima del suelo	Z 0,25
Factor de uso e importancia	U 1
Factor de amplificación del suelo	S 1,2
Periodo que define la plataforma del factor C	T_P 0,6
Periodo que define el inicio de zona del factor C	T_L 2
Factor de reducción de las fuerzas sísmicas	R 1

Cuadro 2.3: Parámetros sísmicos, para la obtención de espectro de diseño.

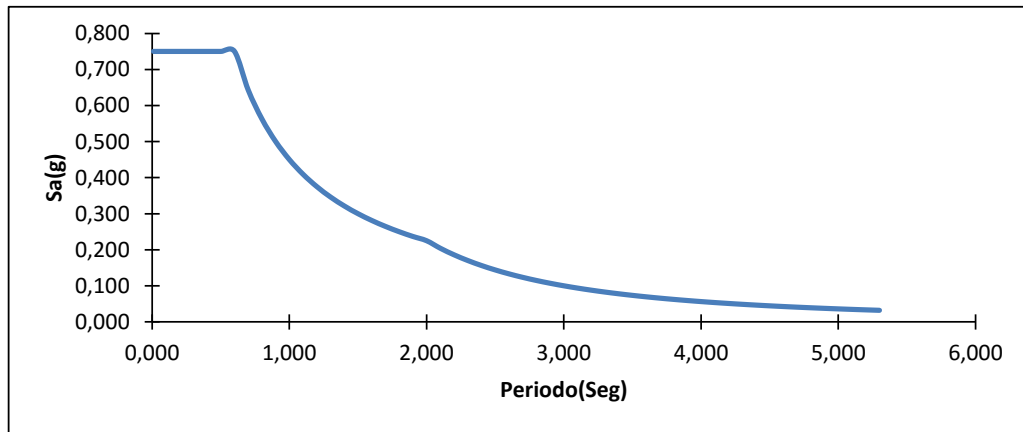


Figura 2.31: Espectro de Diseño Elástico de la Norma Técnica Peruana E.030.

Espectros Sintéticos Generados

El primer acelelograma presenta una aceleración máxima de $245,027\text{cm}/\text{s}^2$, una velocidad de $34,044\text{cm}/\text{s}$ y un desplazamiento de 24cm . Este acelelograma tiene una aceleración máxima de $0,25\text{g}$ compatible con el suelo de emplazamiento de la estructura, dónde se espera la misma aceleración máxima. El registro sísmico completo tiene intervalos de tiempo de $0,01\text{seg}$, con una duración de 60 segundos. En la figura 2.33 se muestra el espectro de respuesta comparado con el espectro de diseño presentado en la Norma Técnica Peruana E.030. Como se aprecia en la gráfica presentada el espectro de respuesta de aceleración calculada es bastante similar al espectro objetivo, presentando un error media de $5,50\%$, que es bastante pequeño.

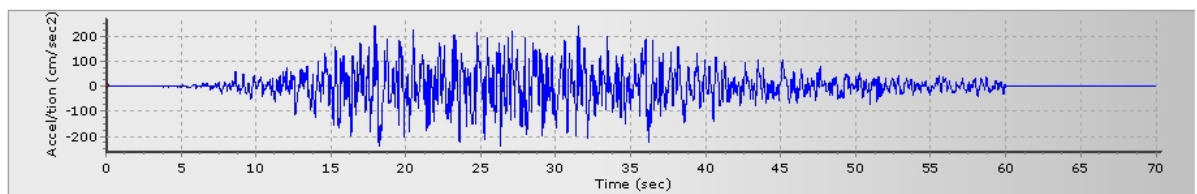


Figura 2.32: Primer Acelelograma Sintético Generado.

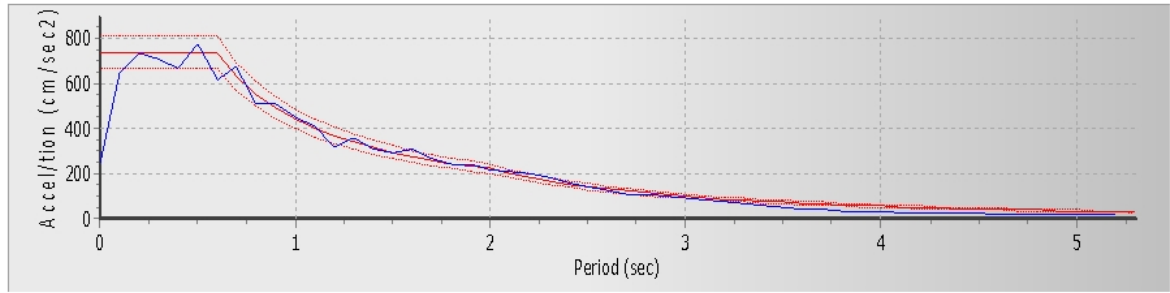


Figura 2.33: Comparación del Primer Espectro Generado y el objetivo.

El segundo espectro presenta una aceleración máxima de $245,180\text{cm}/\text{s}^2$, una velocidad $26,312\text{cm}/\text{s}$ y un desplazamiento de 11cm . El espectro de respuesta de aceleración calculado y el objetivo son bastante similares presentando un error media de 7.19% de ajuste.

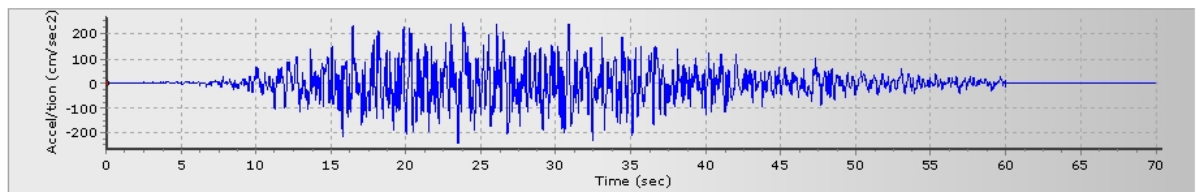


Figura 2.34: Segundo Acelelograma Sintético Generado.

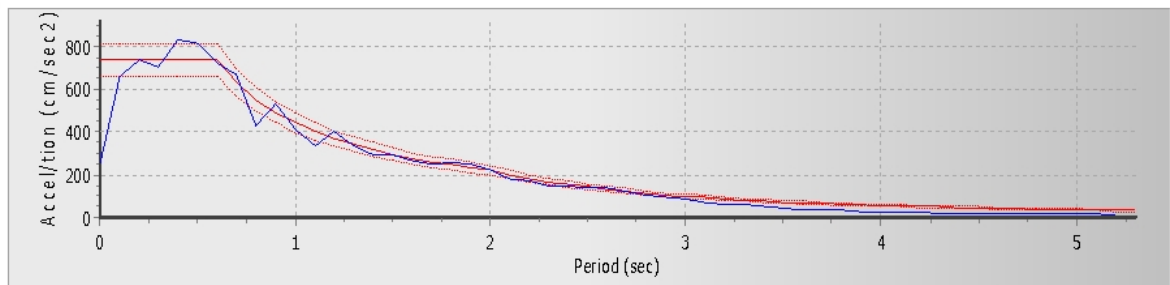


Figura 2.35: Comparación del Segundo Espectro Generado y el objetivo.

El tercer registro sintético presenta una aceleración máxima de $245,146\text{cm}/\text{s}^2$, una velocidad de $27,142\text{cm}/\text{s}$ y un desplazamiento de 22cm . El espectro de respuesta calculado y el objetivo presentan un ajuste bastante cercanos con un error de 8.43% .

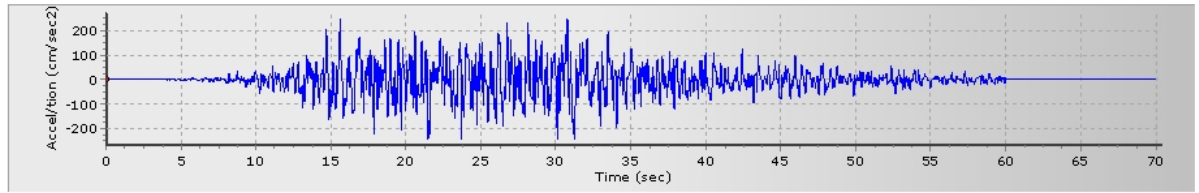


Figura 2.36: Tercer Acelelograma Sintético Generado.

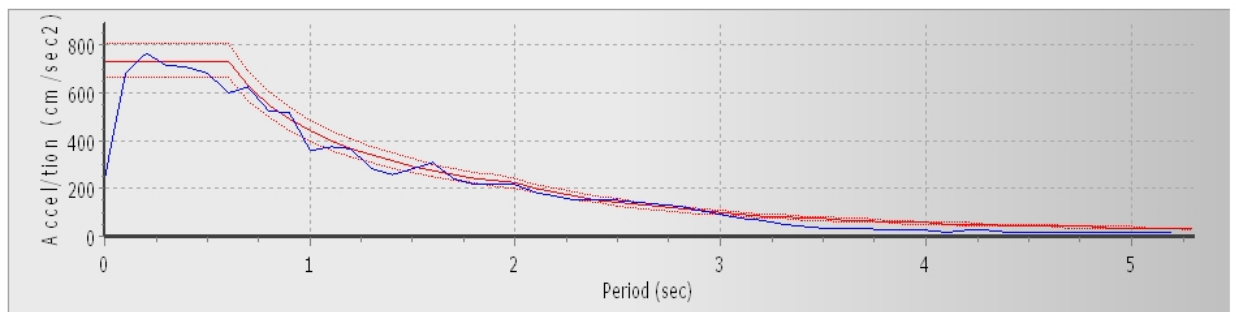


Figura 2.37: Comparación del Tercer Espectro Generado y objetivo.

Los acelelogramas presentados son utilizados en el siguiente capítulo para el análisis dinámico no lineal de la estructura.

Capítulo 3

Análisis Sísmico de la Estructura con Disipador de Energía ADAS

3.1. Aspectos Generales

3.1.1. Descripción General de la Estructura

Edificación destinado para la atención de desarrollo socio emocional y de capacidades para víctimas de violencia familiar y sexual en situaciones de riesgo del área metropolitano en la provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho-Perú. La estructura consta de tres módulos totalmente independientes. Los módulos tienen nomenclatura y están identificados por las letras “A”, “B” y “C”. El módulo “A” consta de cinco niveles y está destinado para vivienda y oficina, el módulo “B” consta de cinco pisos destinado para vivienda y el módulo “C” consta de cuatro pisos destinado para oficina. Como alcance de la presente investigación sólo se rediseña el módulo A, la planta típica de este módulo se presenta en la figura [3.1](#).

3.2. Análisis Dinámico No Lineal

3.2.1. Analisis Sísmico sin Disipadores de Energía

En las siguientes tablas se muestran las características y propiedades de: hormigón, acero y albañilería para el análisis sísmico.

Características del hormigón y acero		
$f'c$	210 kg/cm^2	Resistencia a compresión del hormigón
Ec	217370,65 kg/cm^2	Módulo de elasticidad del hormigón
γc	2400 kg/m^3	Peso específico del hormigón
v	0,20	Coefficiente de poisson de hormigón
$f'y$	4200 kg/cm^2	Esfuerzo de fluencia de acero de refuerzo

Cuadro 3.1: Características del hormigón y acero.

Características de la albañilería		
$f'm$	35 kg/cm^2	Resistencia a compresión axial de la albañilería
Em	17500 kg/cm^2	Módulo de elasticidad de la albañilería
γm	1800 kg/m^3	Peso específico de la albañilería
v	0,25	Coefficiente de poisson de albañilería

Cuadro 3.2: Características de la albañilería

Metrado de cargas que gravitará en los forjados(losa aligerada)

	Losa aligerada	Acabados	Tabiquería móvil	CM	CV
	Kg/m^2	Kg/m^2	Kg/m^2	Kg/m^2	Kg/m^2
Primer nivel	300	100	-	400	200
Segundo nivel	300	100	-	400	200
Tercer nivel	300	100	-	400	200
cuarto nivel	300	100	100	500	250

Cuadro 3.3: Metrado de carga que gravitará en los forjados(losa).

	Losa aligerada	Acabados de Azotea	Tabiquería móvil	CM	CV
	<i>Kg/m²</i>	<i>Kg/m²</i>	<i>Kg/m²</i>	<i>Kg/m²</i>	<i>Kg/m²</i>
Quinto nivel	300	40	-	340	200

Cuadro 3.4: Metrado de carga que gravitará en los forjados(losa).

Dimensiones de los pilares (columnas) y forjado(losa aligerada) de la estructura:

Columna	Dimensión
	cm
C1	22x27
C2	22x22
C3	22x97
C4	22x22
C6	27x22
C7	40
C8	22x97
C10	22x22
C14	15x22
C15	22x37
CC	12x22
PL2	22x100

Cuadro 3.5: Dimensiones de los pilares(columnas).

Forjado	Dimensión
	cm
Losa aligerada	20

Cuadro 3.6: Espesor del forjado(losa).

En la Figura 3.1 se presenta la planta típica de la estructura, la cual es idéntico en todos los niveles de la estructura. Las dimensiones de las vigas(jácenas) son idénticos en todos los niveles a excepción de los pisos uno y dos que varían en 15cm en el eje E-E entre los ejes 1 y 5, es decir la dimensiones son 22x60cm. Así mismo la carga viva en los pasadizos y corredores es de 400kg/m².

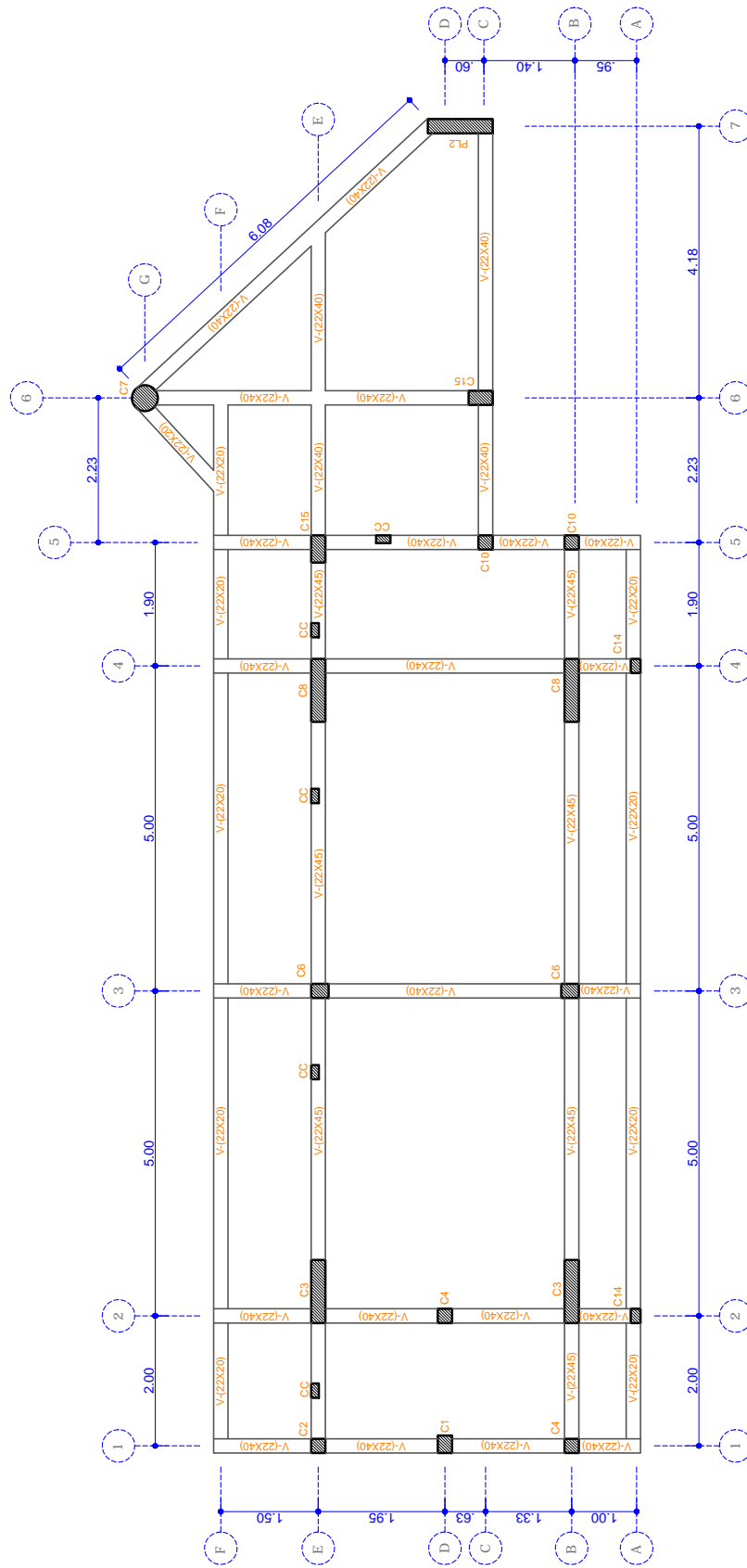


Figura 3.1: Planta Típica del Módulo A.

Metrado de Muros no Estructurales

Metrado de muros que actúan en el primer nivel				
Eje	Espesor de muro	Altura	Peso específico	Carga
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Kg/m³</i>	<i>Kg/m</i>
Eje A-A entre los ejes 1-1 y 2-2	0,25	2,50	1800	1125
Eje A-A entre los ejes 4-4 y 5-5	0,25	2,50	1800	1125
Eje B-B entre los ejes 2-2 y 3-3(costado de ventanas)	0,25	2,85	1800	1282,5
Eje B-B entre los ejes 2-2 y 3-3(Alféizar)	0,25	1,20	1800	540
Eje B-B entre los ejes 3-3 y 4-4(costado de ventanas)	0,25	2,85	1800	1282,5
Eje B-B entre los ejes 3-3 y 4-4(Alféizar)	0,25	1,20	1800	540
Eje E-E entre los ejes 1-1 y 2-2	0,15	1,70	1800	459
Eje E-E entre los ejes 2-2 y 3-3	0,15	2,75	1800	742,5
Eje E-E entre los ejes 3-3 y 4-4	0,15	2,75	1800	742,5
Eje E-E entre los ejes 4-4 y 5-5	0,15	2,75	1800	742,5

Cuadro 3.7: Metrado de tabiquería en la dirección “X”, de la estructura.

Metrado de muros que actúan en el segundo nivel				
Eje	Espesor de muro	Altura	Peso específico	Carga
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Kg/m³</i>	<i>Kg/m</i>
Eje A-A entre los ejes 1-1 y 2-2	0,25	2,50	1800	1125
Eje A-A entre los ejes 4-4 y 5-5	0,25	2,50	1800	1125
Eje B-B entre los ejes 2-2 y 3-3(costado de ventanas)	0,25	2,85	1800	1282,5
Eje B-B entre los ejes 2-2 y 3-3(Alféizar)	0,25	1,20	1800	540
Eje B-B entre los ejes 3-3 y 4-4(costado de ventanas)	0,25	2,85	1800	1282,5
Eje B-B entre los ejes 3-3 y 4-4(Alféizar)	0,25	1,20	1800	540
Eje E-E entre los ejes 1-1 y 2-2	0,15	1,70	1800	459
Eje E-E entre los ejes 2-2 y 3-3	0,15	2,75	1800	742,5
Eje E-E entre los ejes 3-3 y 4-4	0,15	2,75	1800	742,5
Eje E-E entre los ejes 4-4 y 5-5	0,15	2,75	1800	742,5

Cuadro 3.8: Metrado de tabiquería en la dirección “X” de la estructura.

En el último Nivel existe parapeto la cual modelaremos como carga gravitacional de 189Kg/m.

Metrado de muros que actúan en el tercer nivel				
Eje	Espeor de muro	Altura	Peso específico	Carga
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Kg/m³</i>	<i>Kg/m</i>
Eje A-A entre los ejes 1-1 y 2-2	0,25	2,50	1800	1125
Eje A-A entre los ejes 4-4 y 5-5	0,25	2,50	1800	1125
Eje B-B entre los ejes 2-2 y 3-3(costado de ventanas)	0,25	2,85	1800	1282,5
Eje B-B entre los ejes 2-2 y 3-3(Alféizar)	0,25	1,20	1800	540
Eje B-B entre los ejes 3-3 y 4-4(costado de ventanas)	0,25	2,85	1800	1282,5
Eje B-B entre los ejes 3-3 y 4-4(Alféizar)	0,25	1,20	1800	540
Eje E-E entre los ejes 1-1 y 2-2	0,15	1,70	1800	459
Eje E-E entre los ejes 2-2 y 3-3	0,15	2,75	1800	742,5
Eje E-E entre los ejes 3-3 y 4-4	0,15	2,75	1800	742,5
Eje E-E entre los ejes 4-4 y 5-5	0,15	2,75	1800	742,5

Cuadro 3.9: Metrado de tabiquería en la dirección “X”, de la estructura.

Metrado de muros que actúan en el cuarto nivel				
Eje	Espeor de muro	Altura	Peso específico	Carga
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Kg/m³</i>	<i>Kg/m</i>
Eje A-A entre los ejes 1-1 y 2-2	0,25	2,50	1800	1125
Eje A-A entre los ejes 4-4 y 5-5	0,25	2,50	1800	1125
Eje B-B entre los ejes 2-2 y 3-3(costado de ventanas)	0,25	2,85	1800	1282,5
Eje B-B entre los ejes 2-2 y 3-3(Alféizar)	0,25	1,20	1800	540
Eje B-B entre los ejes 3-3 y 4-4(costado de ventanas)	0,25	2,85	1800	1282,5
Eje B-B entre los ejes 3-3 y 4-4(Alféizar)	0,25	1,20	1800	540
Eje E-E entre los ejes 1-1 y 2-2	0,15	1,70	1800	459
Eje E-E entre los ejes 2-2 y 3-3	0,15	2,75	1800	742,5
Eje E-E entre los ejes 3-3 y 4-4	0,15	2,75	1800	742,5
Eje E-E entre los ejes 4-4 y 5-5	0,15	2,75	1800	742,5

Cuadro 3.10: Metrado de tabiquería en la dirección “X” de la estructura.

Modelamiento Estructural en ETABS

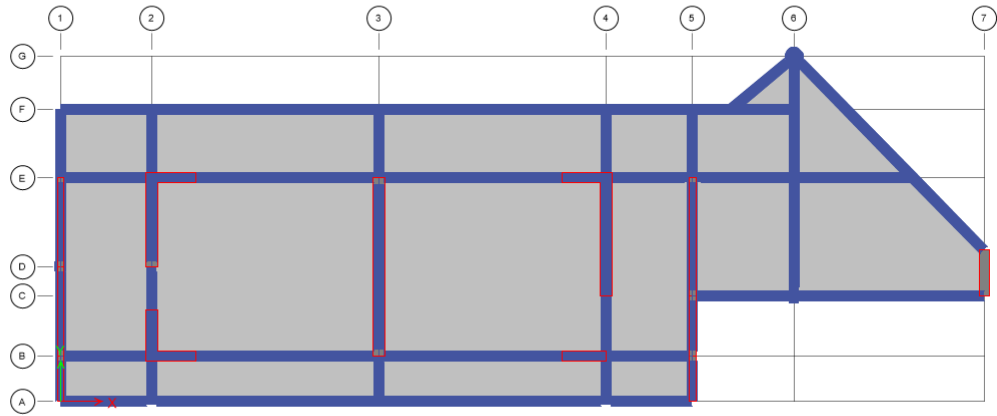


Figura 3.2: Vista en planta de la edificación.

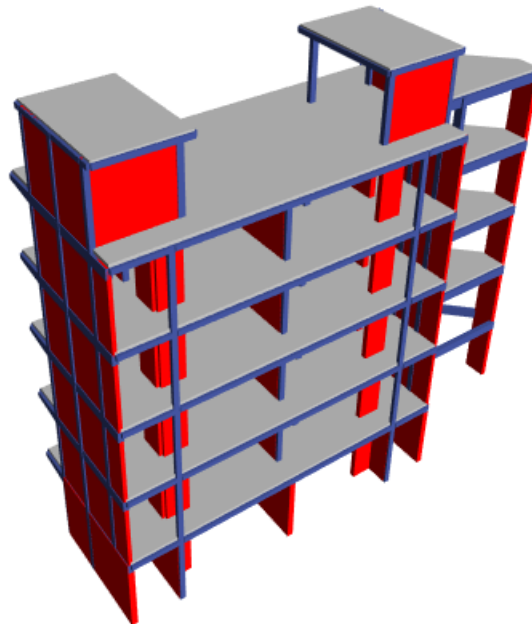


Figura 3.3: Vista de elevación posterior de la estructura.

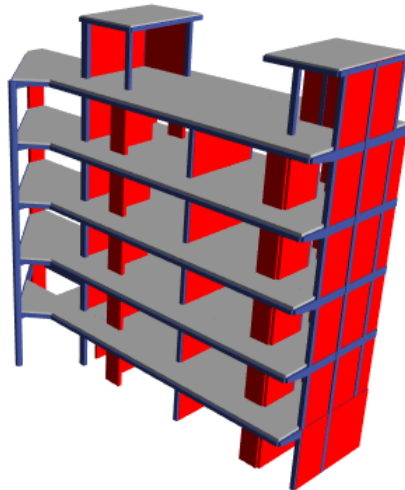


Figura 3.4: Vista en elevación frontal de la estructura.

Definición del Acelerograma en ETABS

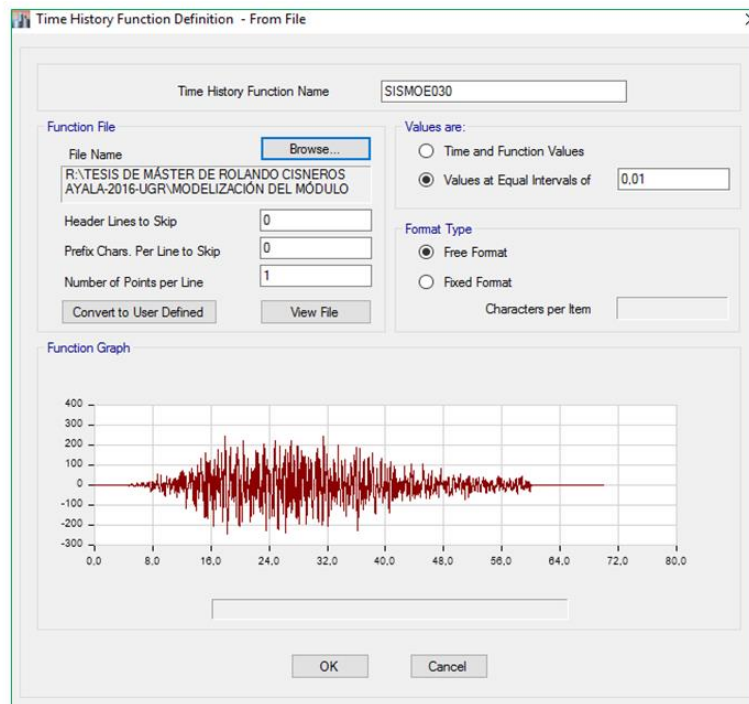


Figura 3.5: Definición del registro sísmico para el análisis sísmico.

Resultados del Análisis Sísmico

En los siguientes gráficos mostramos los desplazamiento del Centro de Masa(C.M.) de cada piso de la estructura:

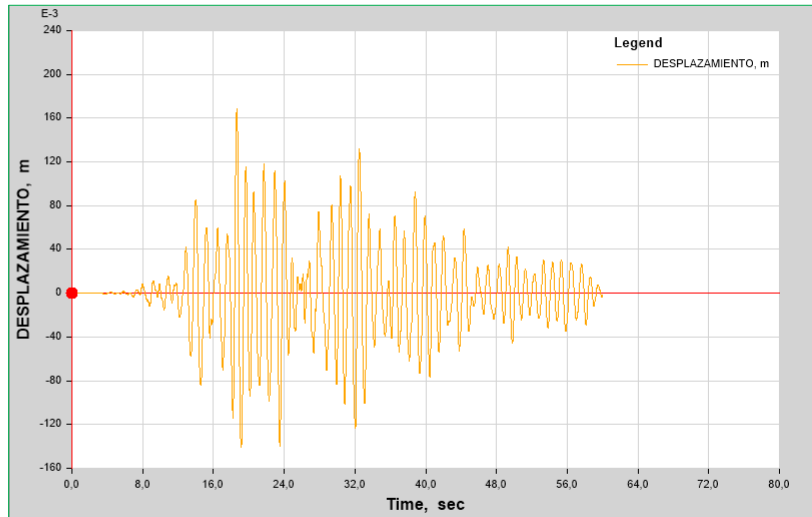


Figura 3.6: Desplazamiento de C.M. en la dirección X del sexto nivel.

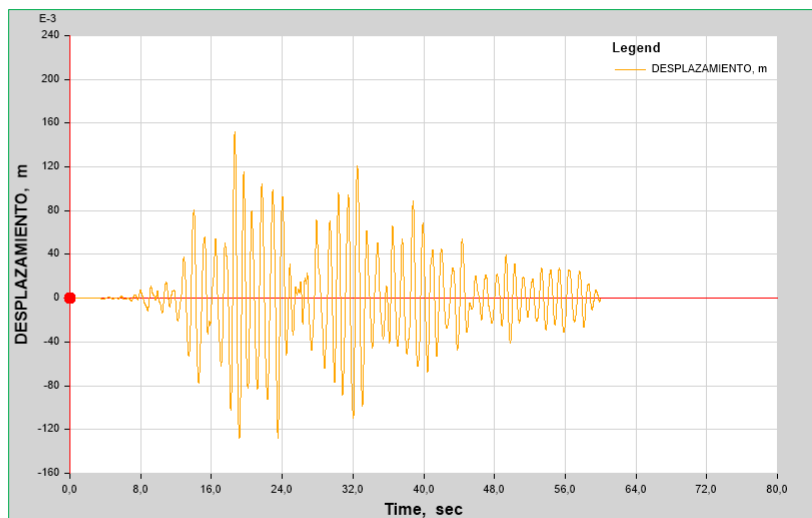


Figura 3.7: Desplazamiento de C.M. en la dirección X del quinto nivel.

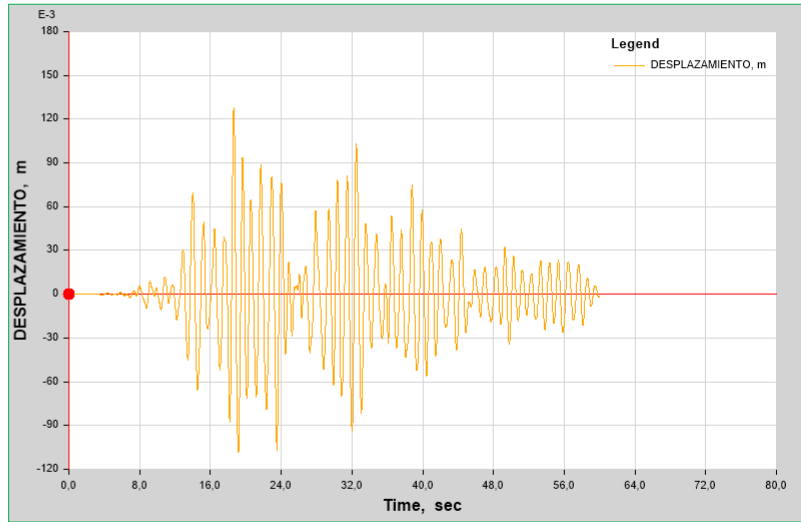


Figura 3.8: Desplazamiento de C.M. en la dirección X del cuarto nivel.

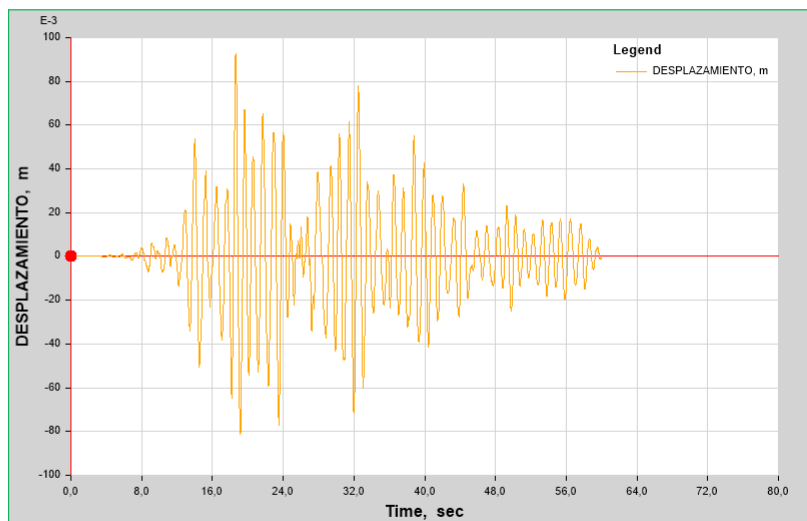


Figura 3.9: Desplazamiento de C.M. en la dirección X del tercer nivel.

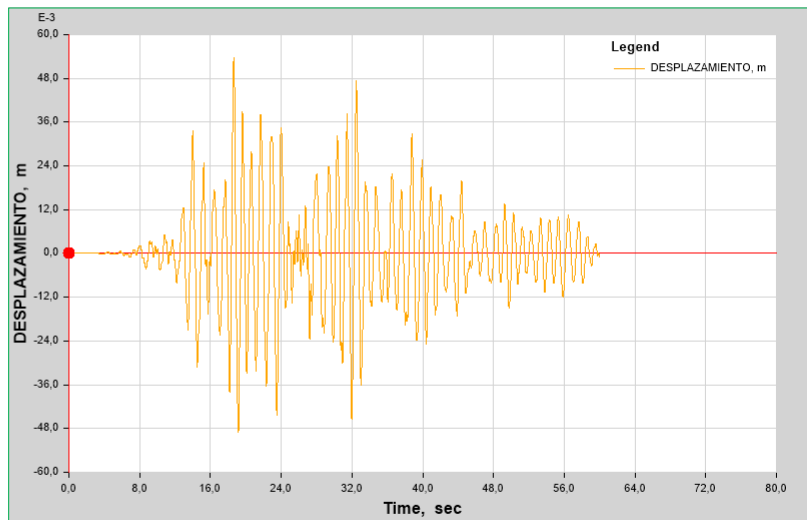


Figura 3.10: Desplazamiento de C.M. en la dirección X del segundo nivel.

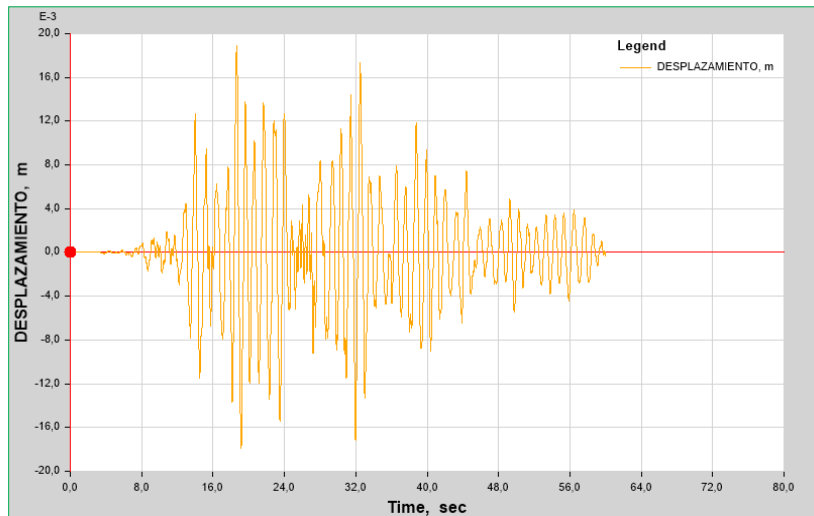


Figura 3.11: Desplazamiento de C.M. en la dirección X del primer nivel.

Deriva Máxima de Piso

En la siguiente tabla se presenta los desplazamientos máximos de piso y las derivas de piso en ambas direcciones de análisis sísmico. Los gráficos en la dirección “Y” son similares a

los gráficos anteriores presentados.

Piso	Desp. X m	Desp. Y m	Alt. de edif. m	Drift en X -	Drift en Y -	Drift máx por Norma en X -	Drift máx por Norma en Y -
Piso 6	0,169	0,119	3,00	0,006	0,014	0,007	0,005
Piso 5	0,152	0,076	3,10	0,008	0,006	0,007	0,005
Piso 4	0,128	0,059	3,10	0,011	0,006	0,007	0,005
Piso 3	0,093	0,042	3,10	0,013	0,006	0,007	0,005
Piso 2	0,054	0,024	3,10	0,011	0,005	0,007	0,005
Piso 1	0,019	0,008	3,20	0,006	0,003	0,007	0,005

Cuadro 3.11: Deriva máxima de piso de la estructura.

La derivas de piso no cumplen en ambas direcciones. La razón por la cual que no cumple es por que esta estructura fue diseñada con la Norma E.030 del 2006. Cabe de indicar que la edificación estamos rediseñando con la norma vigente del año 2016.

Balance de Energía de la Edificación

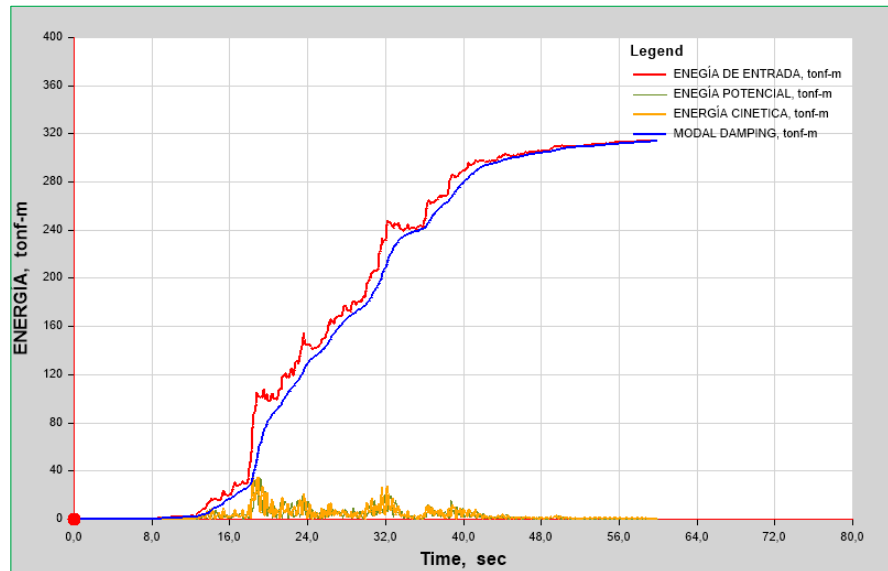


Figura 3.12: Balance de Energía en la Edificación.

En la gráfica anterior se muestra la distribución de energía sin disipadores: energía de entrada(Sismo de Ayacucho), energía cinética, energía potencial y energía modal de amor-

tiguamiento de la edificación. Se observa que la energía de entrada es asumido por la amortiguación de la estructura durante todo el sismo casi en su totalidad.

3.2.2. Análisis Sísmico con Incorporación de Disipadores de Energía

Los valores de los parámetros establecidos son: $\alpha = 0,25$; $\beta = 0,50$; $u = 10$ y la rigidez post-fluencia del disipador es el 5% de la rigidez elástica. Con estos valores impuestos se inicia el cálculo propiamente dicho.

Rigidez de Entrepiso

Se calcula la rigidez de los pórticos a través de las siguientes fórmulas de Wilbur y Norris(1948), que son aproximados para cada piso de la estructura:

- **Primer Piso**

$$K_1 = \frac{48E}{h_1 \left(\frac{4h_1}{\sum_{i=1}^{ncol} \frac{I_{ci}}{h_{ci}}} + \frac{h_1+h_2}{\sum_{j=1}^{nvigas} \frac{I_{tj}}{l_{tj}} + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{ncol} \frac{I_{ci}}{h_{ci}}} \right)} \quad (3.2.1)$$

- **Segundo Piso**

$$K_2 = \frac{48E}{h_2 \left(\frac{4h_2}{\sum_{i=1}^{ncol} \frac{I_{ci}}{h_{ci}}} + \frac{h_{n-1}+h_n}{\sum_{j=1}^{nvigas} \frac{I_{tjn-1}}{l_{tj}} + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{ncol} \frac{I_{ci-1}}{h_{ci-1}}} + \frac{h_n+h_{n+1}}{\sum_{j=1}^{nvigas} \frac{I_{tjn}}{l_{tj}}} \right)} \quad (3.2.2)$$

- **Piso Intermedio**

$$K_n = \frac{48E}{h_n \left(\frac{4h_n}{\sum_{i=1}^{ncol} \frac{I_{ci}}{h_{ci}}} + \frac{h_{n-1}+h_n}{\sum_{j=1}^{nvigas} \frac{I_{tjn-1}}{l_{tj}}} + \frac{h_n+h_{n+1}}{\sum_{j=1}^{nvigas} \frac{I_{tjn}}{l_{tj}}} \right)} \quad (3.2.3)$$

Dónde: E es el módulo de elasticidad, h_{n-1} , h_n y h_{n+1} son altura de los pisos $n - 1$, n y $n + 1$ respectivamente, I_{ci} es el momento de inercia de la columna i del piso n , h_{ci} es la altura de la columna i del piso n , $I_{tj_{n-1}}$, I_{tj_n} son los momentos de inercia de las vigas j de los piso $n - 1$ y n y l_{tj} es la luz de la viga j en el piso n .

Rigidez de piso de la Estructura

Las rigideces: total, contraviento-disipador, equivalente, de diagonal, elástica del disipador, post fluencia, efectiva y el desplazamiento han sido obtenidas con las fórmulas descritas en la sección 2.4.9, a partir de la rigideces halladas con las expresiones de Wilbur.

Piso	Rigidez del piso <i>kg/cm</i>	Rigidez total <i>kg/cm</i>	Rigidez cd <i>kg/cm</i>	Rigidez equivalente <i>kg/cm</i>	Rigidez de diagonal <i>kg/cm</i>	Rigidez elástica <i>kg/cm</i>	Rigidez post fluencia <i>kg/cm</i>	Rigidez efectiva <i>kg/cm</i>	Δ_y <i>cm</i>	F_y <i>kg</i>
piso 1	242822,79	971291,18	728468,38	364234,19	4003374,08	2001687,04	100084,35	290244,62	0,022	44712,89
piso 2	135000,18	540000,71	405000,53	202500,27	2225722,74	1112861,37	55643,07	161364,90	0,038	42594,88
piso 3	112665,55	450662,18	337996,64	168998,32	1857495,82	928747,91	46437,40	134668,45	0,040	37121,35
piso 4	96208,84	384835,35	288626,51	144313,25	1586177,13	793088,56	39654,43	114997,84	0,035	28066,44
piso 5	62159,79	248639,16	186479,37	93239,69	1024816,86	512408,43	25620,42	74299,22	0,030	15304,17

Cuadro 3.12: Rigidez por Piso de la Estructura, en la Dirección X.

Piso	Rigidez del piso <i>kg/cm</i>	Rigidez total <i>kg/cm</i>	Rigidez cd <i>kg/cm</i>	Rigidez equivalente <i>kg/cm</i>	Rigidez de diagonal <i>kg/cm</i>	Rigidez elástica <i>kg/cm</i>	Rigidez post fluencia <i>kg/cm</i>	Rigidez efectiva <i>kg/cm</i>	Δ_y <i>cm</i>	F_y <i>kg</i>
piso 1	424013,92	1696055,67	1272041,76	636020,88	2688443,20	1344221,60	67211,08	194912,13	0,043	57461,20
piso 2	190073,38	760293,50	570220,13	285110,06	1205152,60	602576,30	30128,81	87373,56	0,090	54072,60
piso 3	141698,42	566793,70	425095,27	212547,64	898433,16	449216,58	22460,83	65136,40	0,103	46320,73
piso 4	113066,92	452267,70	339200,77	169600,39	716896,28	358448,14	17922,41	51974,98	0,096	34387,94
piso 5	53930,02	215720,10	161790,07	80895,04	341941,15	170970,57	8548,53	24790,73	0,108	18410,59

Cuadro 3.13: Rigidez por Piso de la Estructura, en la Dirección Y.

Se precisa que para obtener el desplazamiento Δ_y en la tablas anteriores se ha calculado con el 75 % de fuerza cortante que debe resistir los disipadores de energía, cabe de indicar que para obtener los cortantes en cada piso se debe distribuir el cortante basal de acuerdo

a la normativa sísmica.

$$F_i = \frac{P_i(h_i)^k}{\sum_{j=1}^n P_j(h_j)^k} V \quad (3.2.4)$$

Dónde: V Cortante basal, h_i altura hasta el piso i , P_i peso sísmico y k exponente.

Fuerza Cortante Actuante en cada Piso de la Estructura

Piso	Cortante en X	75 % (cortante en X)	Cortante en Y	75 % (cortante en Y)
	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf
piso 1	86444,91	64833,69	111091,65	83318,73
piso 2	82350,11	61762,58	104540,36	78405,27
piso 3	71767,95	53825,96	89553,40	67165,05
piso 4	54261,78	40696,34	66483,35	49862,51
piso 5	29588,06	22191,05	35593,82	26695,36

Cuadro 3.14: Cortante de piso.

Una vez conocidos la rigidez elástica, el desplazamiento de fluencia, el cortante y la rigidez post-fluencia, se determina las dimensiones y el número de placas con las ecuaciones descritas en la sección 2.4.10, que presentamos en las siguientes tablas:

Número de Disipadores por piso

piso	Número de disipadores
piso 1	11
piso 2	11
piso 3	9
piso 4	7
piso 5	4

Cuadro 3.15: Disipadores requeridos en la dirección X de la estructura

piso	Número de disipadores
piso 1	15
piso 2	14
piso 3	12
piso 4	9
piso 5	5

Cuadro 3.16: Disipadores requeridos en la dirección Y de la estructura

Dimensiones de los dispositivos

El Investigador Roberto Aguiar Falconí[11], propone que la base “b” sea la mitad de la altura del dispositivo es decir $0,5h$ y b_1 sea el 10% de la altura. Con estas medidas establecidos se determinó la cantidad de disipadores requeridos por piso, que se presentó en las tablas 3.15 y 3.16. Las dimensiones de las chapas se presenta en la tabla 3.17.

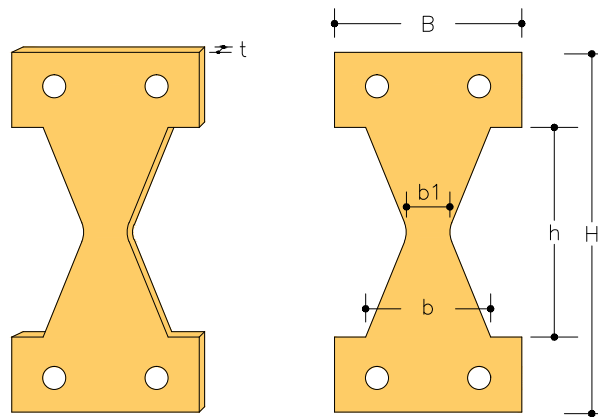


Figura 3.13: Geometría del Dispositivo ADAS.

Los dispositivos ADAS son de acero estructural A-36 que tiene esfuerzo de fluencia de $\sigma_y = 2530kg/cm^2$ y módulo de elasticidad de $E = 2100000kg/cm^2$.

	<i>h</i>	<i>b1</i>	<i>b</i>	<i>t</i>
Piso	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>
1	30	3	15	2.5
2	30	3	15	2.5
3	30	3	15	2.5
4	30	3	15	2.5
5	30	3	15	2.5

Cuadro 3.17: Geometría de las placas en cada nivel de la estructura.

Cálculo de las propiedades del disipador en función del número de chapas

Se colocará la mitad de los disipadores presentados en las tablas 3.15 y 3.16 por cada facha de la estructura en las direcciones X e Y, para los cuales se calcula las propiedades del disipador para la modelización bilineal en el programa computacional ETABS.

Numero de disipadores	<i>Piso</i>	F_y	k_1	Δ_y	$u\Delta_y$	k_{eff}	F_u
		<i>kg</i>	<i>kg/cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>kg/cm</i>	<i>kg</i>
6	1	23718,75	72916,67	0,33	3,25	10572,92	34392,188
6	2	23718,75	72916,67	0,33	3,25	10572,92	34392,188
5	3	19765,63	60763,89	0,33	3,25	8810,76	28660,156
4	4	15812,50	48611,11	0,33	3,25	7048,61	22928,125
2	5	7906,25	24305,56	0,33	3,25	3524,31	11464,063

Cuadro 3.18: Propiedades del disipador en función de número placas, en la dirección X.

Numero de disipadores	<i>Piso</i>	F_y	k_1	Δ_y	$u\Delta_y$	k_{eff}	F_u
		<i>kg</i>	<i>kg/cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>kg/cm</i>	<i>kg</i>
8	1	31625,00	97222,22	0,33	3,25	14097,22	45856,25
7	2	27671,88	85069,44	0,33	3,25	12335,07	40124,22
6	3	23718,75	72916,67	0,33	3,25	10572,92	34392,19
5	4	19765,63	60763,89	0,33	3,25	8810,76	28660,16
3	5	11859,38	36458,33	0,33	3,25	5286,46	17196,09

Cuadro 3.19: Propiedades del disipador en función de número placas, en la dirección Y.

Modelo de Histéresis bilineal del disipador ADAS de acero A-36

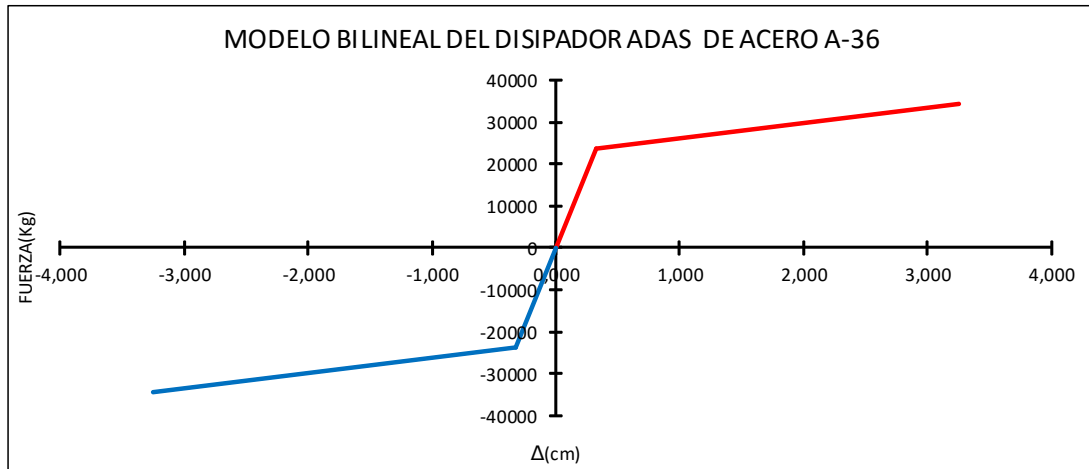


Figura 3.14: Modelo Bilineal del disipador ADAS, del primer piso en la dirección X

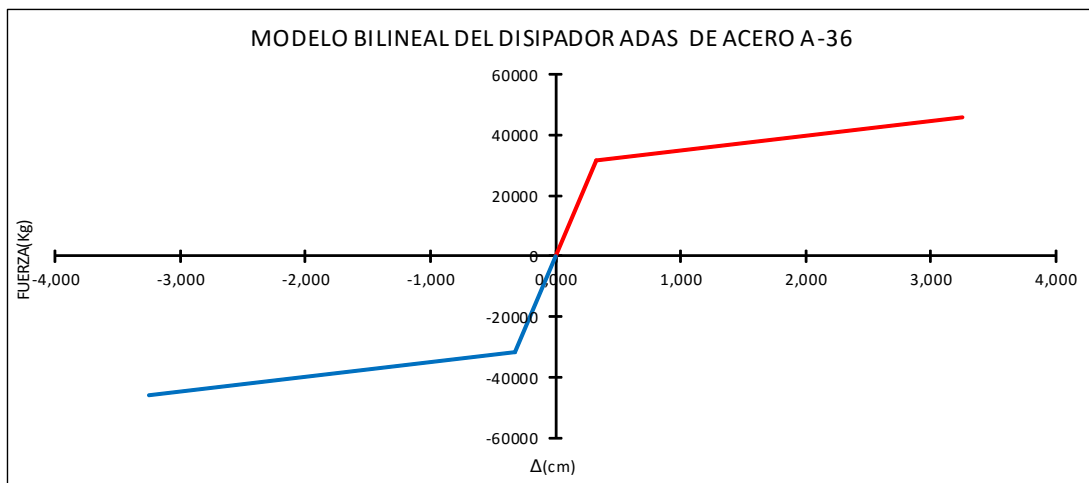


Figura 3.15: Modelo Bilineal del disipador ADAS, del primer piso en la dirección Y

Determinación de Diagonales Chevron

A partir de la rigidez de la diagonal de las tablas 3.12 y 3.13, se halla el área requerido empleando la expresión 3.2.5, en las direcciones X e Y de la estructura, las cuales son similares, como se presenta en la siguiente tabla 3.20:

$$k_{diag} = \frac{E_{diag} A_{diag}}{L_{diag}} \cos^2 \theta \quad (3.2.5)$$

Las secciones serán de tipo “W” de los catálogos propuestos del AISC¹

Área de diagonal requerido	
Piso	in^2
piso 1	28
piso 2	13
piso 3	10
piso 4	8
piso 5	4

Cuadro 3.20: Área requerido de los Contravientos Chevron.

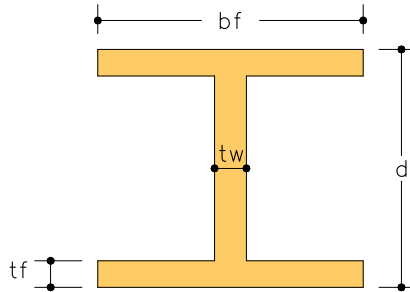


Figura 3.16: Sección transversal de los Contravientos Chevron.

A partir de las áreas requeridas se determina el perfil requerido de los Contravientos Chevron, que se presenta en la tabla 3.21:

¹American Institute of Steel Construction.

		Características de la sección						
		d	b_f	t_f	t_w	$area$	r_x	r_y
Piso	Sección	inches	inches	inches	inches	in2	inches	inches
1	W10x100	11,1	10,3	1,12	0,68	29,4	4,60	2,65
2	W8x48	8,45	8,11	0,685	0,4	14,1	3,61	2,08
3	W8x40	8,25	8,07	0,56	0,36	11,7	3,53	2,04
4	W8x35	8,12	8,02	0,495	0,31	10,3	3,51	2,03
5	W6x25	6,38	6,08	0,455	0,32	7,34	2,70	1,52

Cuadro 3.21: Perfiles de los Contravientos Chevron.

Modelización de Histéresis Bilineal de los Disipadores en ETABS

Para la modelación en ETABS de los disipadores de energía se utilizará el comando “link”, la cual será de tipo Multilinear Plastic donde se define el comportamiento histerético del disipador del grado de libertad por la cual se deforma el disipador. Los parámetros asociados y tipo de histéresis considerado es “Kinematic”, para lo cual se debe ingresar las pendientes antes y después de la fluencia.

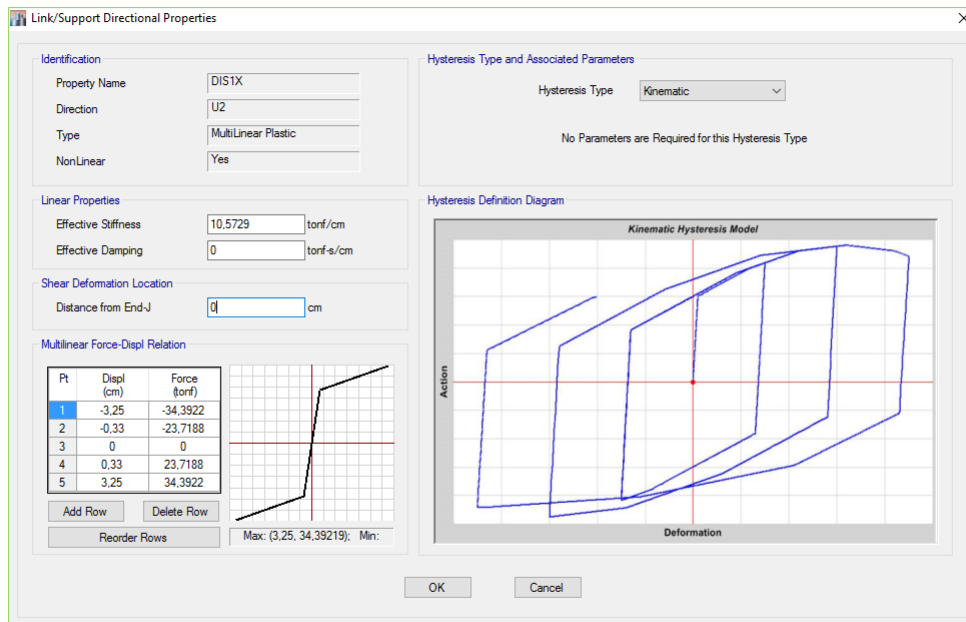


Figura 3.17: Propiedades direccionales del disipador de energía.

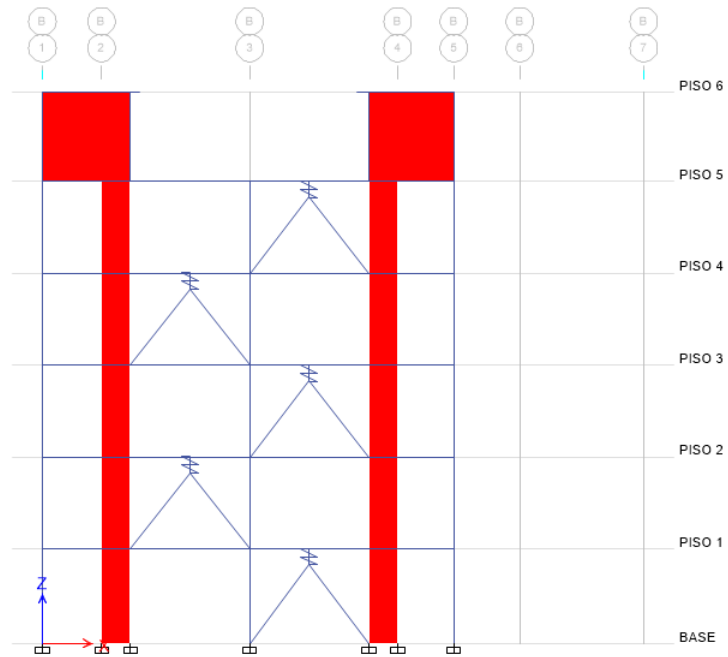


Figura 3.18: Distribución de disipadores de energía en altura, eje B-B.

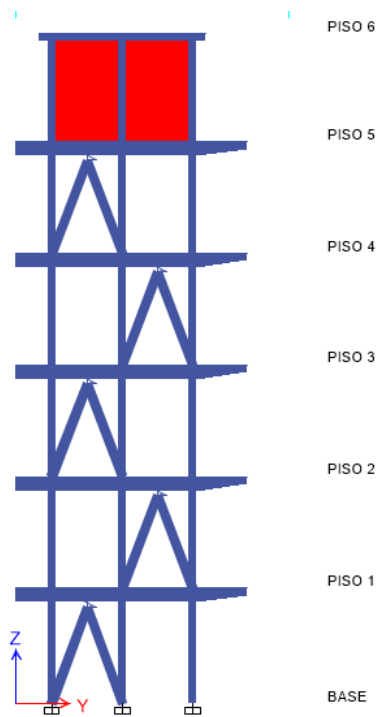


Figura 3.19: Distribución de disipadores de energía en altura, eje 1-1.

Deriva Máxima de Piso

Piso	Desp. X m	Desp. Y m	Alt. de edif. m	Drift en X -	Drift en Y -	Drift permitido por Norma X -	Drift permitido por Norma Y -
Piso 6	0,115	0,061	3,000	0,006	0,005	0,007	0,005
Piso 5	0,097	0,042	3,100	0,005	0,002	0,007	0,005
Piso 4	0,080	0,037	3,100	0,007	0,004	0,007	0,005
Piso 3	0,058	0,025	3,100	0,007	0,003	0,007	0,005
Piso 2	0,034	0,015	3,100	0,007	0,003	0,007	0,005
Piso 1	0,013	0,005	3,200	0,004	0,002	0,007	0,005

Cuadro 3.22: Deriva máxima de piso de la estructura.

En la tabla anterior se presenta los desplazamientos de Centro de Masa (C.M) de cada pisos de la estructura y la deriva máxima de piso. La incorporación de los disipadores de energía en ambas direcciones de la estructura ha disminuido considerablemente la deriva máxima de piso con respecto a las derivas sin disipadores de energía.

Comparación de Desplazamientos con y sin Disipador de Energía.

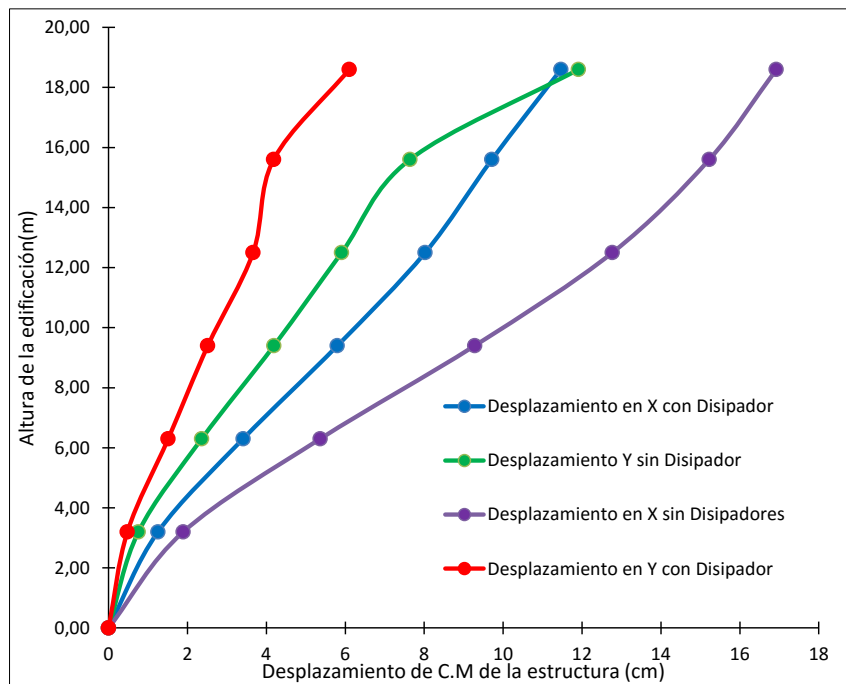


Figura 3.20: Desplazamientos de C.M. con y sin Disipador de la estructura.

Verificación de la Resistencia a Tracción de las Diagonales Chevron

Las diagonales se menciona por piso y por la dirección de análisis, así mismo los cálculos explícitos sólo se halla para el primer piso, para los demás pisos se muestra en las tablas siguientes: 3.23, 3.24, 3.25 y 3.26.

■ Esbeltez y Resistencia a Tracción de las Diagonales del eje 1-1

$$\frac{L_x}{r_x} \leq 300 \quad (3.2.6)$$

$$\frac{L_y}{r_y} \leq 300 \quad (3.2.7)$$

$$\frac{L_x}{r_x} = \left(\frac{9,42ft}{4,6in} \right) \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 24,56 \leq 300$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \left(\frac{9,42ft}{2,65in} \right) \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 42,64 \leq 300$$

$$P_{diag} = 0,90F_yA_g = 0,90 (36ksi) (29,40in^2) = 952,56kips = 432,07Ton$$

	Longitud de diagonal en el eje 1-1	Relación de esbeltez	Relación de esbeltez	Resistencia a tensión	Tensión actuante
<i>Piso</i>	<i>feet</i>	$L_x/r_x \leq 300$	$L_y/r_y \leq 300$	<i>Ton</i>	<i>Ton</i>
1	9.42	24,56	42,64	432,07	22,78
2	9.12	30,32	52,62	207,22	33,00
3	9.12	31,01	53,65	171,95	33,90
4	9.12	31,18	53,92	151,37	23,45
5	9.12	40,54	72,01	107,87	11,33

Cuadro 3.23: Esbeltez y resistencia a tracción.

■ Esbeltez y Resistencia a Tracción de las Diagonales del eje 6-6

$$\frac{L_x}{r_x} = \left(\frac{12,47ft}{4,6in} \right) \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 32,53$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \left(\frac{12,47ft}{2,65in} \right) \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 56,46$$

$$P_{diag} = 0,90F_yA_g = 0,90 (36ksi) (29,40in^2) = 952,56kips = 432,07Ton$$

Piso	Longitud	Relación	Relación	Resistencia	Tensión
	de diagonal en el eje 6-6	de esbeltez	de esbeltez	a tensión	actuante
	<i>feet</i>	$L_x/r_x \leq 300$	$L_y/r_y \leq 300$	<i>Ton</i>	<i>Ton</i>
1	12.47	32,52	56,46	432,07	11,36
2	12.17	40,46	70,22	207,22	26,00
3	12.17	41,38	71,60	171,95	27,42
4	12.17	41,61	71,95	151,37	22,47
5	12.17	54,10	96,09	107,87	11,59

Cuadro 3.24: Esbeltez y resistencia a tracción.

■ **Esbeltez y Resistencia a Tracción de las Diagonales del eje B-B**

$$\frac{L_x}{r_x} = \left(\frac{10,99ft}{4,6in} \right) \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 28,67$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \left(\frac{10,99ft}{2,65in} \right) \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 49,77$$

$$P_{diag} = 0,90F_y A_g = 0,90 (36ksi) (29,40in^2) = 952,56kips = 432,07Ton$$

Piso	Longitud	Relación	Relación	Resistencia	Tensión
	de diagonal en el eje B-B	de esbeltez	de esbeltez	a tensión	actuante
	<i>feet</i>	$L_x/r_x \leq 300$	$L_y/r_y \leq 300$	<i>Ton</i>	<i>Ton</i>
1	10.99	28,67	49,77	432,07	13,77
2	10.66	35,44	61,52	207,22	56,59
3	10.66	36,25	62,72	171,95	46,98
4	10.66	36,45	63,03	151,37	49,90
5	10.66	47,39	84,18	107,87	17,66

Cuadro 3.25: Esbeltez y resistencia a tracción.

■ **Esbeltez y Resistencia a Tracción de las Diagonales del eje E-E**

$$\frac{L_x}{r_x} = \left(\frac{10,99ft}{4,6in} \right) \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 28,67$$

$$\frac{L_y}{r_y} = \left(\frac{10,99ft}{2,65in} \right) \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 49,77$$

$$P_{diag} = 0,90F_y A_g = 0,90 (36ksi) (29,40in^2) = 952,56kips = 432,07Ton$$

	Longitud de diagonal en el eje E-E	Relación de esbeltez	Relación de esbeltez	Resistencia a tensión	Tensión actuante
<i>Piso</i>	<i>feet</i>	$L_x/r_x \leq 300$	$L_y/r_y \leq 300$	<i>Ton</i>	<i>Ton</i>
1	10.99	28,67	49,77	432,07	12,26
2	10.66	35,44	61,52	207,22	43,98
3	10.66	36,25	62,72	171,95	41,97
4	10.66	36,45	63,03	151,37	35,68
5	10.66	47,39	84,18	107,87	18,77

Cuadro 3.26: Esbeltez y resistencia a tracción.

Verificación de la Resistencia a Compresión de las Diagonales Chevron

Las diagonales se menciona por piso y por la dirección de análisis, así mismo los cálculos se presenta al inicio de manera demostrativa para justificar los valores presentados en las tablas: 3.27, 3.28, 3.29 y 3.30.

- Esbeltez y Resistencia a Compresión de las Diagonales del eje 1-1

$$\frac{kL_x}{r_x} = \frac{(1)(9,42ft)}{(4,6in)} \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 24,56$$

$$\frac{kL_y}{r_y} = \frac{(1)(9,42ft)}{(2,65in)} \left(\frac{12in}{1ft} \right) = 42,64 \dots \text{gobierna}$$

$$\lambda_c = \frac{kL_y}{r_y \pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

$$\lambda_c = \frac{(1)(9,42ft)}{(2,65in)(\pi)} \left(\frac{12in}{1ft} \right) \sqrt{\frac{36ksi}{29000ksi}} = 0,478$$

Como $\lambda_c \leq 1,5$ entonces F_{cr} es:

$$F_{cr} = \left(0,658^{\lambda_c^2} \right) F_y$$

$$F_{cr} = \left(0,658^{0,478^2} \right) 36ksi = 32,71ksi$$

$$P_{diag} = \phi P_n = \phi F_{cr} A_g$$

$$P_{diag} = 0,85 (32,71ksi) (29,4in^2) = 817,42kips = 370,82Ton$$

<i>Piso</i>	Longitud	Relación	Relación	Resistencia	Compresión
	de diagonal en el eje 1-1	de esbeltez	de esbeltez	a compresión	actuante
	<i>feet</i>	$kL_x/r_x \leq 200$	$kL_y/r_y \leq 200$	<i>Ton</i>	<i>Ton</i>
1	9.42	24,56	42,64	370,82	22,78
2	9.12	30,32	52,62	169,16	32,01
3	9.12	31,01	53,65	139,56	33,45
4	9.12	31,18	53,92	122,68	22,94
5	9.12	40,54	72,01	77,54	11,27

Cuadro 3.27: Esbeltez y resistencia a compresión.

■ **Esbeltez y Resistencia a Compresión de las Diagonales del eje 6-6**

<i>Piso</i>	Longitud	Relación	Relación	Resistencia	Compresión
	de diagonal en el eje 6-6	de esbeltez	de esbeltez	a compresión	actuante
	<i>feet</i>	$kL_x/r_x \leq 200$	$kL_y/r_y \leq 200$	<i>Ton</i>	<i>Ton</i>
1	12.47	32,52	56,46	345,04	11,16
2	12.17	40,46	70,22	150,96	25,41
3	12.17	41,38	71,60	123,98	26,21
4	12.17	41,61	71,95	108,86	23,24
5	12.17	54,10	96,09	62,66	12,93

Cuadro 3.28: Esbeltez y resistencia a compresión.

■ **Esbeltez y Resistencia a Compresión de las Diagonales del eje B-B**

<i>Piso</i>	Longitud	Relación	Relación	Resistencia	Compresión
	de diagonal en el eje B-B	de esbeltez	de esbeltez	a compresión	actuante
	<i>feet</i>	$kL_x/r_x \leq 200$	$kL_y/r_y \leq 200$	<i>Ton</i>	<i>Ton</i>
1	10.99	28,67	49,77	358,18	13,77
2	10.66	35,44	61,52	160,36	46,81
3	10.66	36,25	62,72	132,02	48,24
4	10.66	36,45	63,03	115,98	48,00
5	10.66	47,39	84,18	70,16	16,47

Cuadro 3.29: Esbeltez y resistencia a compresión.

■ **Esbeltez y Resistencia a Compresión de las Diagonales del eje E-E**

<i>Piso</i>	Longitud de diagonal en el eje E-E <i>feet</i>	Relación de esbeltez $kL_x/r_x \leq 200$	Relación de esbeltez $kL_y/r_y \leq 200$	Resistencia a compresión <i>Ton</i>	Compresión actuante <i>Ton</i>
1	10.99	28,67	49,77	358,18	12,17
2	10.66	35,44	61,52	160,36	33,20
3	10.66	36,25	62,72	132,02	53,22
4	10.66	36,45	63,03	115,98	31,24
5	10.66	47,39	84,18	70,16	21,45

Cuadro 3.30: Esbeltez y resistencia a compresión.

Curva Histerética de los Disipadores ADAS

A continuación presentamos las curvas histeréticas de los disipadores de energía con desplazamientos máximos de cada fachada de la estructura en los siguientes gráficos representativos:

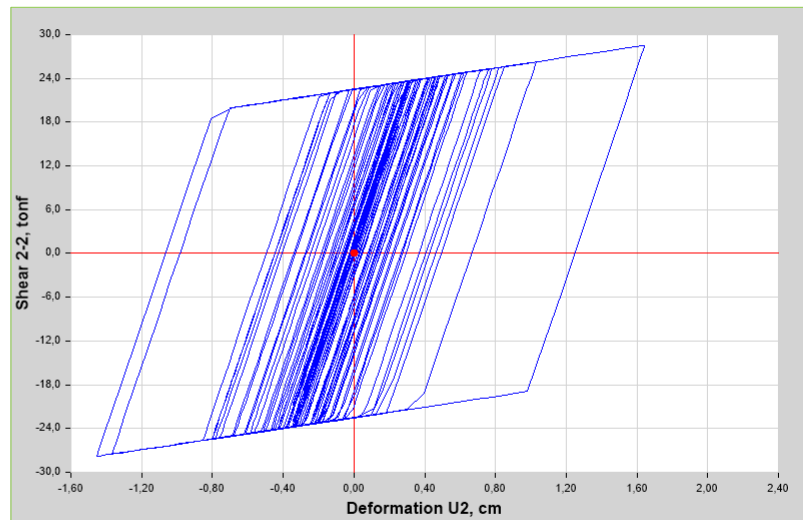


Figura 3.21: Comportamiento histerético del disipador ADAS en el eje 1-1 de la estructura.

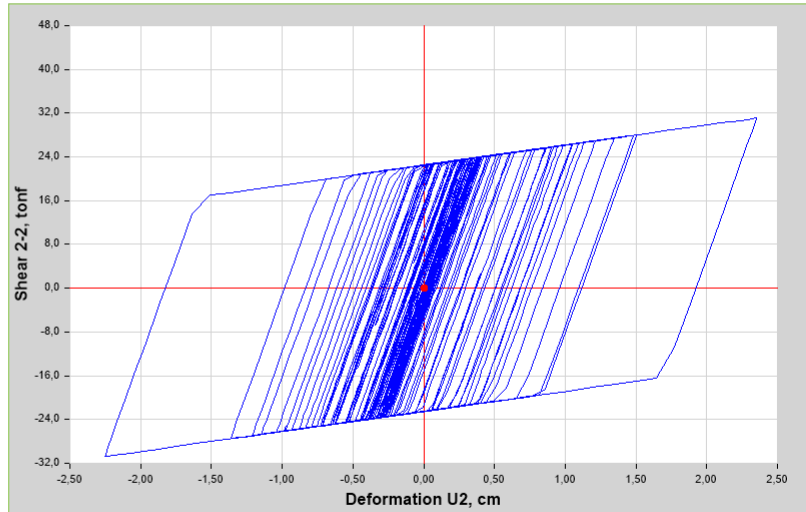


Figura 3.22: Comportamiento histerético del dissipador ADAS en el eje 6-6 de la estructura.

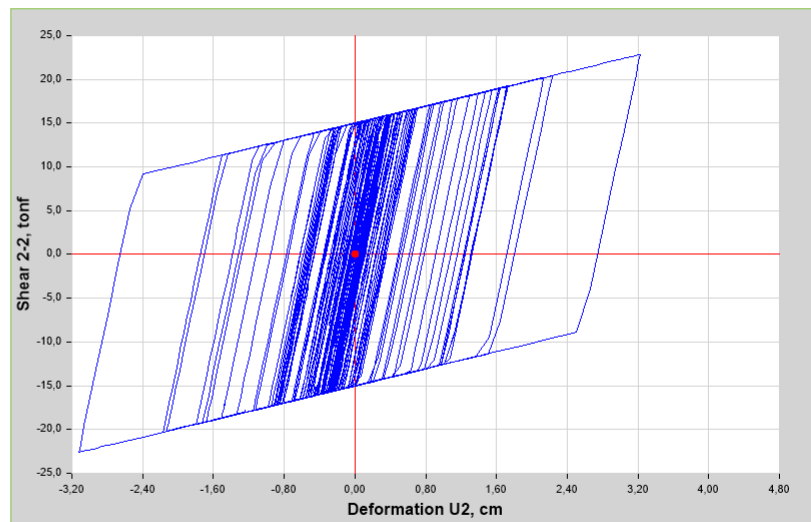


Figura 3.23: Comportamiento histerético del dissipador ADAS en el eje B-B de la estructura.

De las curvas histeréticas 3.21 y 3.22 se observa que los dissipadores tienen una deformación alrededor de $1,60\text{cm}$ y $2,40\text{cm}$ en la dirección “Y” de la estructura, mientras tanto de las curvas 3.23 y 3.24 se aprecia que tienen una deformación de $3,20\text{cm}$ y $2,50\text{cm}$ en la dirección “X”, concluyéndose inmediatamente que están trabajando dentro de los desplazamientos máximos considerados en la modelización bilineal de la misma.

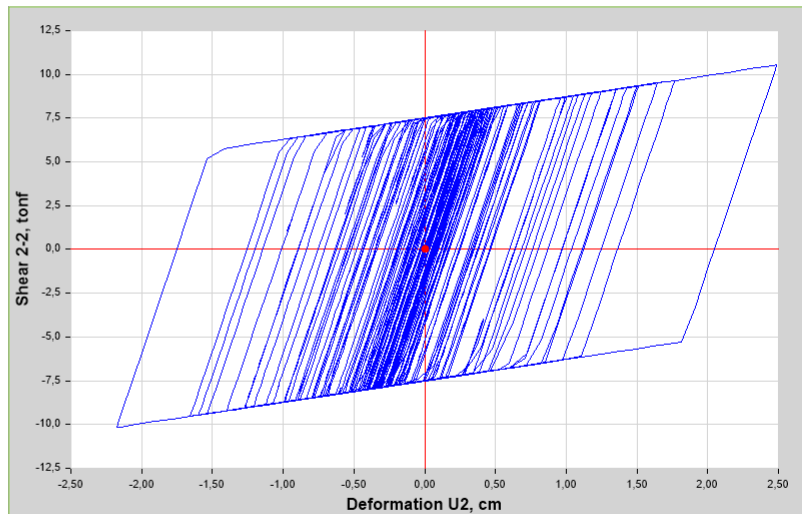


Figura 3.24: Comportamiento histerético del disipador ADAS en el eje E-E de la estructura.

Balace de Energía en la Estructura

La siguiente gráfica ilustra el balace de energía en la edificación:

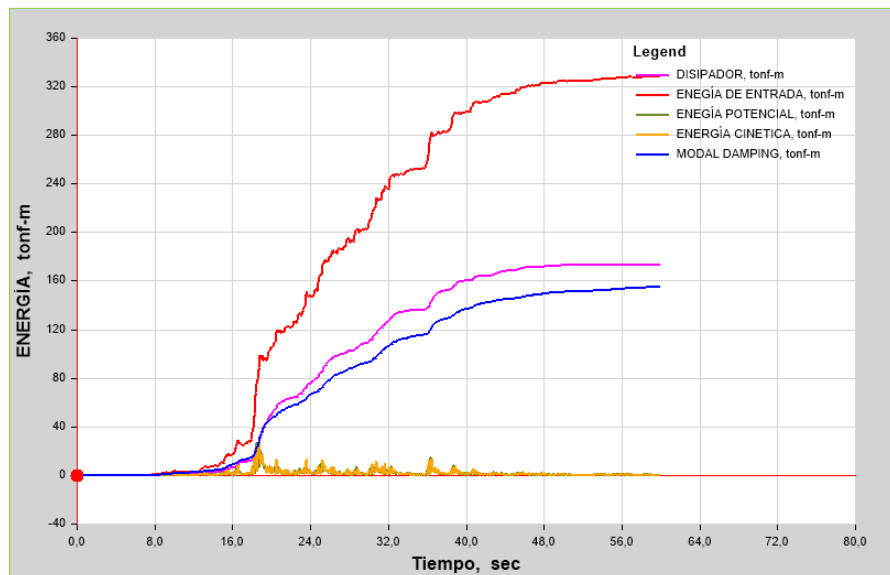


Figura 3.25: Balance de energía con incorporación de Disipadores de Energía.

De acuerdo a la gráfica anterior se puede estimar la cantidad de energía absorbida por el disipador y el amortiguamiento modal a través de la siguiente expresión:

$$E_{absorbida} = \left(\frac{E_{disipada}}{E_{entrada}} \right) 100 \% \quad (3.2.8)$$

Energías	Valor
	<i>Tonf - m</i>
Energía de entrada	328,36
Energía de disipador	173,17
Energía absorbida	52,74 %

Cuadro 3.31: Porcentaje de energía absorbida por el disipador de energía.

Energías	Valor
	<i>Tonf - m</i>
Energía de entrada	328,36
Energía de amortiguamiento modal	154,95
Energía absorbida	47,19 %

Cuadro 3.32: Energía absorbida por el amortiguamiento modal de la estructura.

Los disipadores de energía aproximadamente asumen un 52.74 % de energía de entrada, mientras tanto el amortiguamiento modal de la edificación un 47.19 % de la energía. La energía cinética y potencial de la edificación también participan en la absorción de energía pero de manera mínima en comparación con las demás energías.

Respuesta en el tiempo de los desplazamientos de Centro de Masa

A continuación se presenta la respuesta en el tiempo de los desplazamientos de Centro de Masa (C.M.) de cada piso de la estructura con y sin disipador de energía, en las direcciones “X” e “Y”.

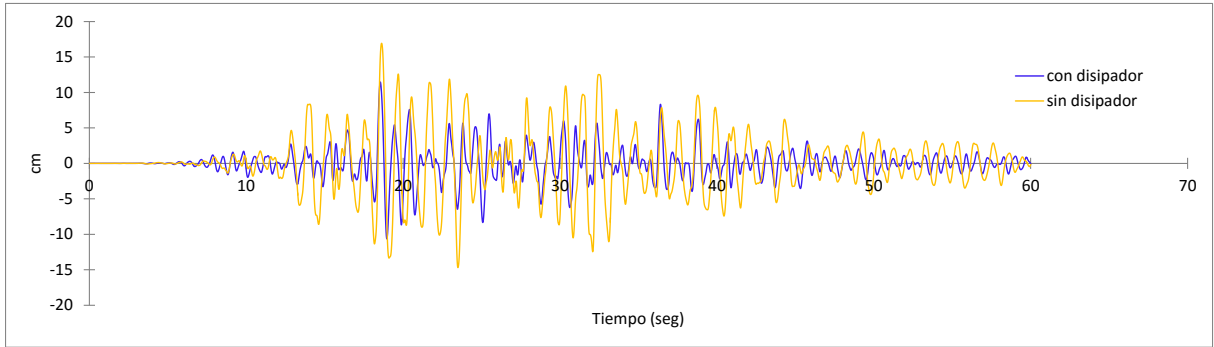


Figura 3.26: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 6 piso, dirección X.

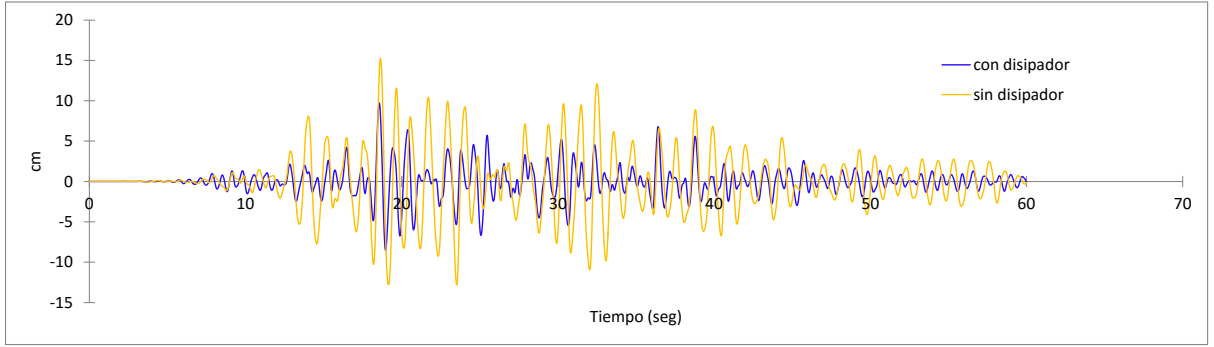


Figura 3.27: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 5 piso, dirección X.

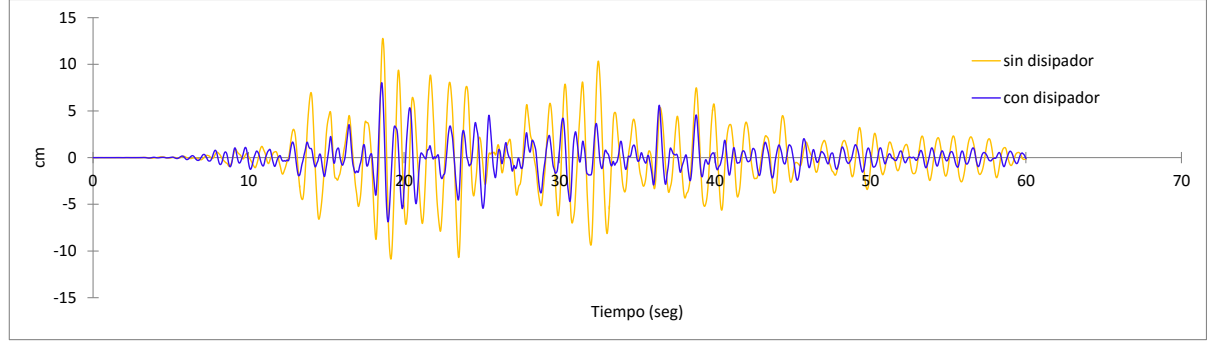


Figura 3.28: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 4 piso, dirección X.

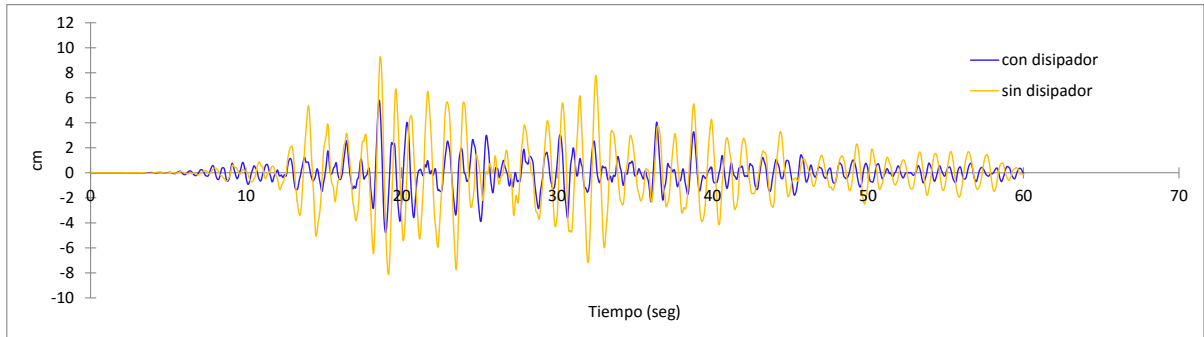


Figura 3.29: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 3 piso, dirección X.

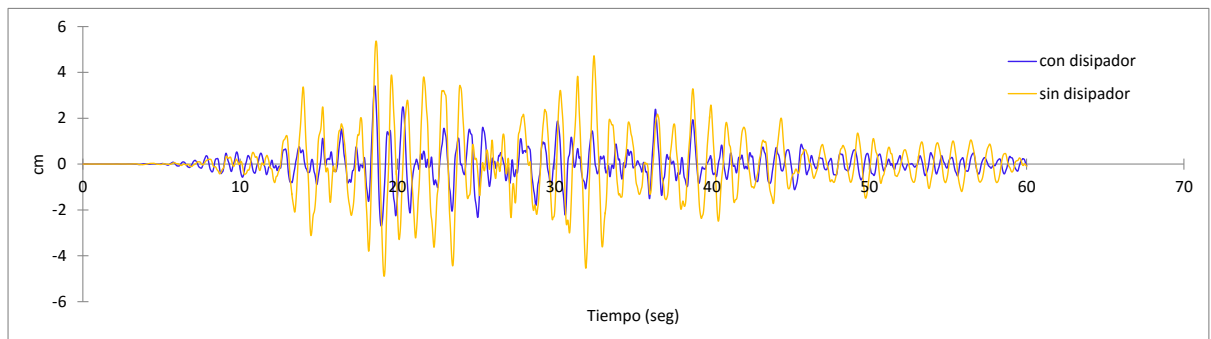


Figura 3.30: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 2 piso, dirección X.

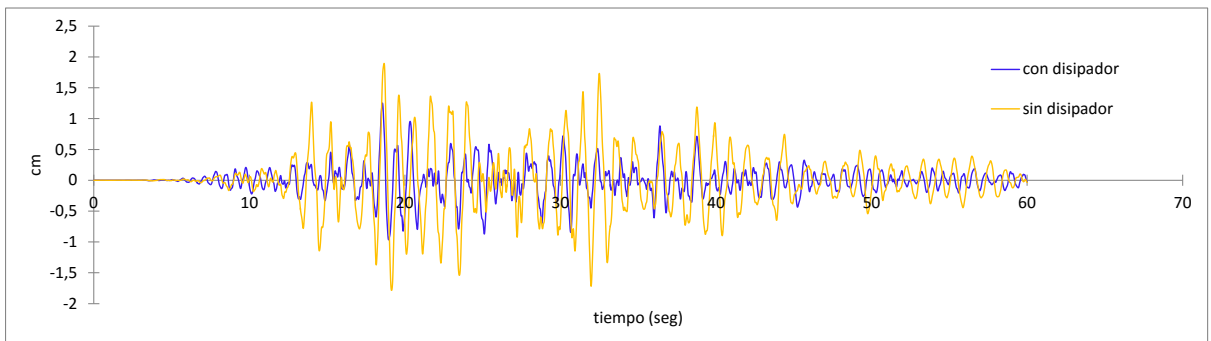


Figura 3.31: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 1 piso, dirección X.

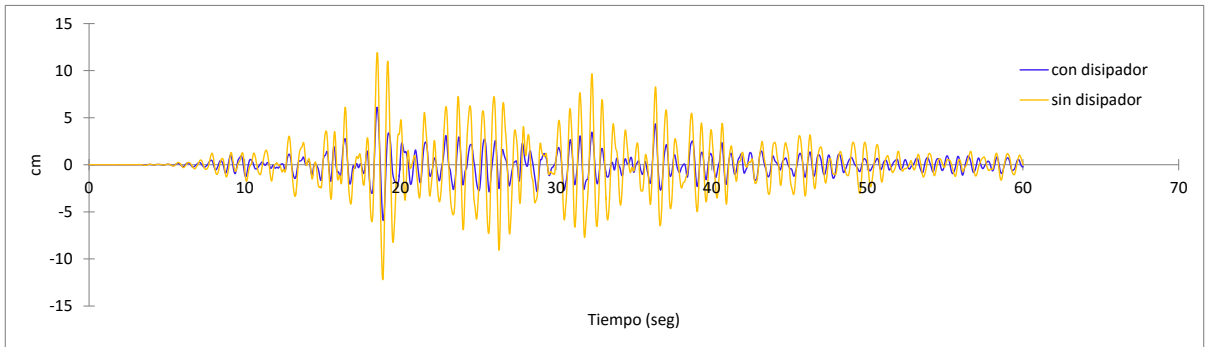


Figura 3.32: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 6 piso, dirección Y.

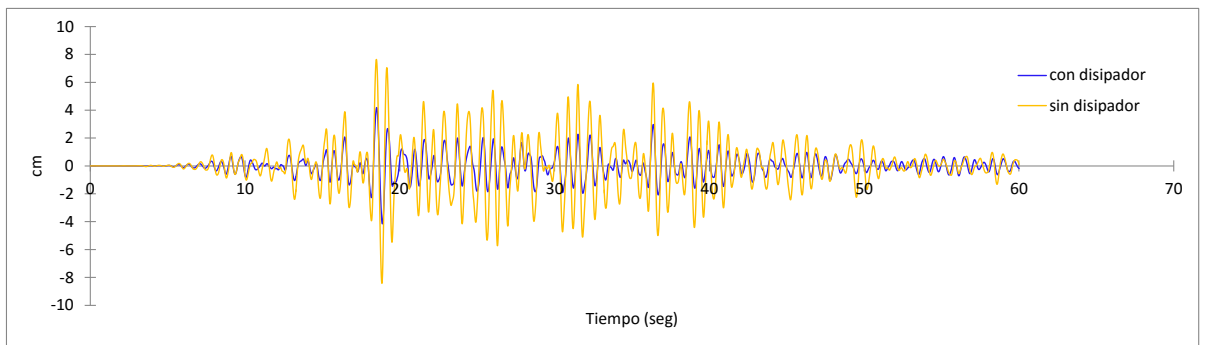


Figura 3.33: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 5 piso, dirección Y.

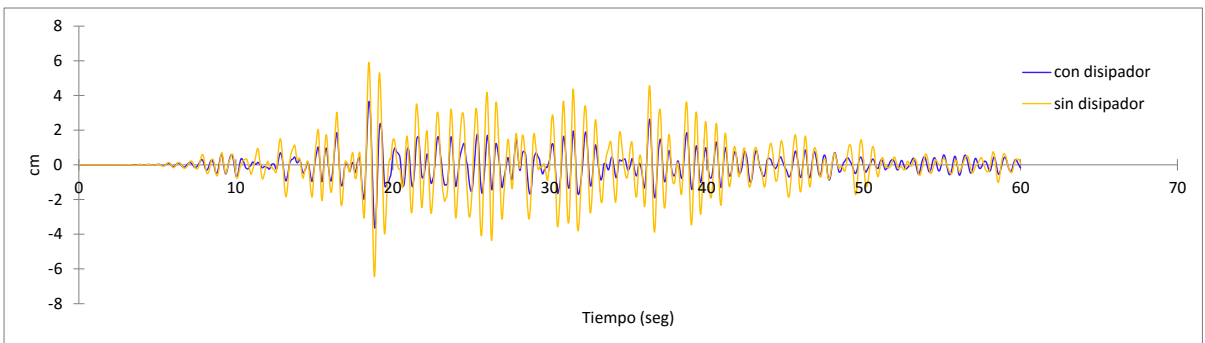


Figura 3.34: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 4 piso, dirección Y.

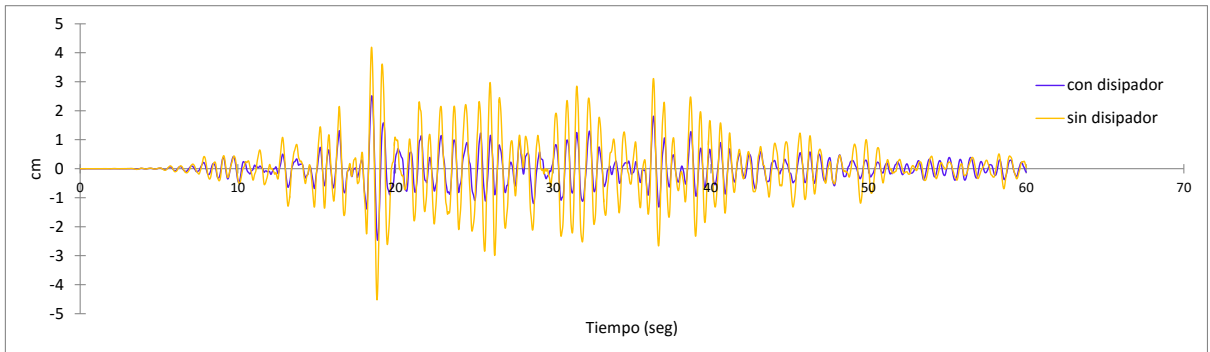


Figura 3.35: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 3 piso, dirección Y.

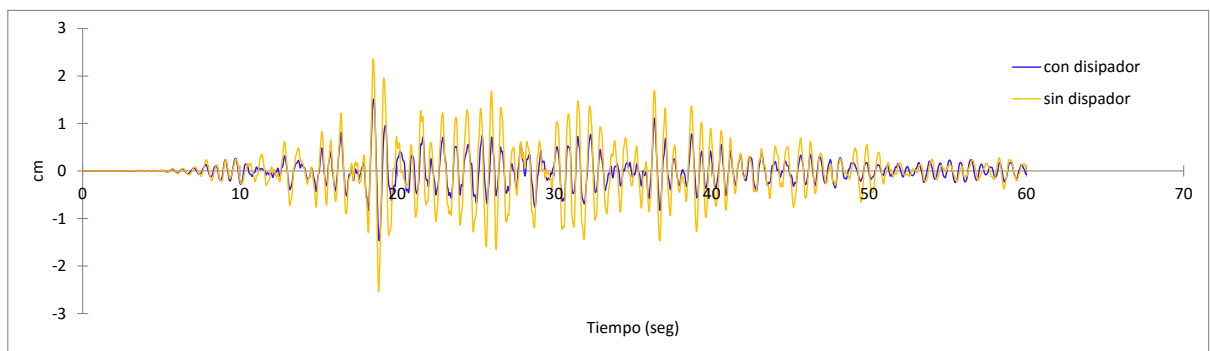


Figura 3.36: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 2 piso, dirección Y.

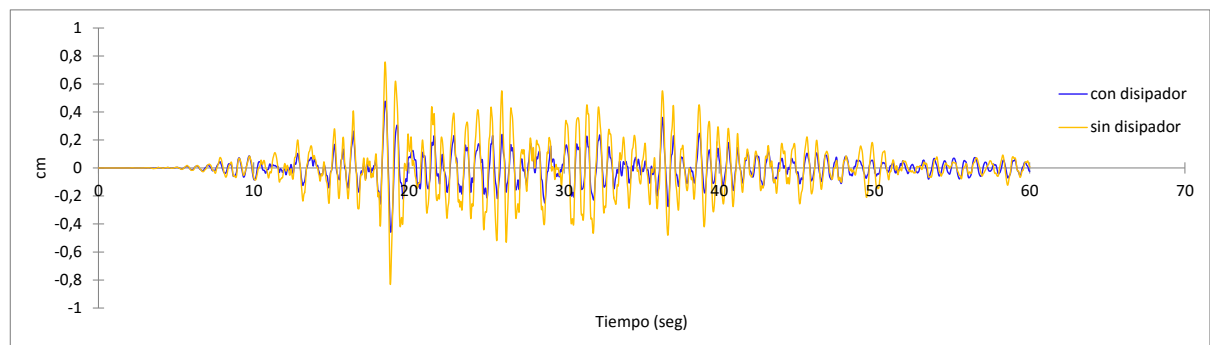


Figura 3.37: Respuesta en el tiempo de los desplazamientos del 1 piso, dirección Y.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

Con la finalización de la presente investigación se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- En el análisis sísmico sin disipadores de energía ADAS se ha podido observar que la energía de entrada, representada por el acelelograma sintético, es asumida en su totalidad por el amortiguamiento modal de la estructura.
- En el análisis sísmico con la incorporación de los disipadores de energía ADAS aproximadamente estos asumen un 52.74 % de la energía de entrada, mientras tanto el amortiguamiento modal de la estructura un 47.19 %.
- Con la incorporación de los disipadores de energía ADAS en el análisis sísmico de la edificación se ha disminuido los desplazamientos en un 37.52 % en la dirección “X” de la estructura y un 48.77 % en la dirección “Y”.
- Se ha generado registros sísmicos artificiales compatibles con el espectro de diseño propuesto en la Normativa Peruana, de aplicación importante para el análisis sísmico de estructuras en lugares dónde no existe registros sísmicos.

- El reforzamiento de estructuras con disipadores de energía por fluencia de metales aún no se ha aplicado de manera masiva en el reforzamiento y/o reparación de estructuras peruanas, la cual puede representar una opción viable en su aplicación práctica, tomando en cuenta que estos disipadores de energía son mucho menores en términos de costo que otros disipadores de energía, como los viscosos.

4.2. Recomendaciones

- Es importante tomar en cuenta que el Análisis Dinámico no Lineal es un procedimiento eficaz para la obtención de resultados del análisis sísmico con disipadores de energía en comparación con procedimientos lineales, constituyendo una metodología apropiada en la cual los resultados se visualizan a través de historias de tiempo.
- Realizar el mapeo de todos los disipadores de energía especialmente de los últimos pisos para comprobar la fluencia, ya que generalmente en el ultimo piso no desarrollan la ductilidad y colocarlos sin comprobar es una pérdida en la inversión económica ya que estos dispositivos no trabajan.
- Realizar el análisis sísmico con el nuevo enfoque integrador: suelo-cimentación-superestructura, lo cual describe el performance real de la edificación.

Bibliografía

- [1] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10) 2010*.
- [2] NORMA TÉCNICA DE EDIFICACIONES DE DISEÑO SISMORRESISTENTE E.030. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016.
- [3] AMADEO BENAVENT CLIMENT. An energy-based method for seismic retrofit of existing frames using hysteretic dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(10):1385–1396, 2011.
- [4] HERNANDO TAVERA Y ELISA BUFORN. Sismicidad y sismotectónica de Perú. page 34, 1998.
- [5] GENNER VILLAREAL CASTRO. *Edificaciones con Disipadores de Energía*. 2009.
- [6] GENNER VILLAREAL CASTRO. *Interacción Suelo-Estructura en Edificios Altos*. 2009.
- [7] ARTURO TENA COLUNGA. Procedimiento de diseño conforme a reglamento para marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos. 2013.
- [8] GASPARINI D.A. and E.H VANMARCKE. Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra. Technical report, M.I.T. Department of civil Engineering Research. Cambridge, Massachusetts, 1976.

- [9] JUAN CARLOS DE LA LLERA Y CARLOS ESGUERA. Earthquake behavior of structures with copper energy dissipators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.*, page 33, 2004.
- [10] ROBERTO AGUIAR FALCONÍ. *Análisis Sísmico de Edificios*. Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército., 2008.
- [11] ROBERTO AGUIAR FALCONÍ. *Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS*. 2016.
- [12] D. FOTI, L. BOZZO, and F. LOPEZ-ALMANSA. Numerical efficiency assessment of energy dissipators for seismic protection of buildings. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 27(6):543–556, 1998.
- [13] MANUEL ALEJANDRO VIDAL GUAQUIL. *Análisis y Diseño de Estructuras con Disipadores de Energía Metálicos en Base a Criterios de Desempeño*. 2008.
- [14] HORACIO DE JESÚS NANGULLASMÚ HERNÁNDEZ. Comparativa de respuesta sísmica para edificios de concreto reforzado con el uso de disipadores histeréticos de energía en base al análisis tiempo historia en 3 dimensiones. 2013.
- [15] VICTOR GATICA LAGOS. Respuesta sísmica de un edificio de estructura metálica con aisladores. alternativas de diseño. Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [16] RICARDO BONETT Y LLUIS PUJADES. Generación de acelerogramas artificiales compatibles con un espectro de respuesta. aplicación a eventos recientes en colombia y españa. 18:11, 2002.
- [17] PETER ALFREDO FALK QUINTANILLA. Análisis del comportamiento de estructuras de acero provistas de disipadores de energía tipo slotted bolted connection. Technical report, Universidad de Chile, 2010.

- [18] RICARDO OVIEDO SARMIENTO. Dispositivos pasivos de disipación de energía para diseño sismorresistente de estructuras. Master's thesis, Universidad Nacional de Ingeniería, 2008.

- [19] HERNANDO TAVERA. La tierra, tectónica y sismicidad. Technical report, Instituto Geofísico del Perú, 1993.

- [20] HERNANDO TAVERA. El terremoto de Pisco del 15 agosto de 2007. Technical report, Instituto geofísico del Perú., 2008.

- [21] HERNANDO TAVERA. Sismo de Cora-Cora del 24 de agosto de 2014 Ayacucho. Technical report, Instituto Geofísico del Perú., 2014.