

TESIS DOCTORAL



UTILIZACIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA EN EDIFICACIONES DE BAJA ALTURA

Tutor: Prof. Oscar A. López

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Ing. Carolina Del V. Tovar N.
Para optar al Título de Doctor en Ingeniería Estructural.

Caracas, 2008



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

VEREDICTO

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y por el Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad Central de Venezuela, para examinar la Tesis Doctoral, presentada por la Ingeniero **CAROLINA DEL VALLE TOVAR NATERA**, portadora de la Cédula de Identidad 12.310.796, bajo el título, "UTILIZACIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA EN EDIFICACIONES DE BAJA ALTURA", a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al título de DOCTOR EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, dejan constancia de los siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los Miembros del Jurado, éste fijó el día 03 de Noviembre de 2008, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en la AULETA DE POSTGRADO, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el Jurado; todo conforme a lo dispuesto en los Artículos 45, 49, 50, 51 y 52 del Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.- Finalizada la defensa pública del trabajo, el Jurado decidió aprobarlo por considerar, sin hacerse solidario de las ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

Para dar veredicto, el Jurado estimó que la obra examinada constituye un aporte para mejorar el conocimiento sobre la colocación de amortiguadores en edificios sujetos a la acción de terremotos, sobre la precisión de métodos aproximados de cálculo y para el desarrollo de sistemas de amortiguamiento histerético en Venezuela.

En fe de lo cual se levanta la presente Acta, a los tres días del mes de noviembre de dos mil ocho, dejándose también constancia de que, conforme a lo dispuesto en la normativa jurídica vigente actuó como Coordinador del Jurado el **Doctor Oscar Andrés López**.

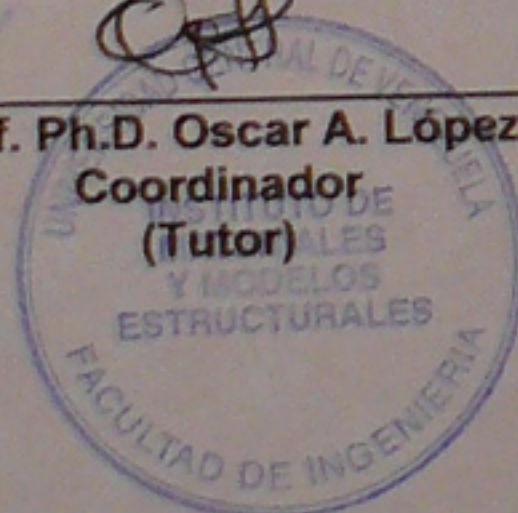
Prof. Ph.D. Simón Lamar

Prof. Dr. C. Manuel Martínez

Prof. Dr. C. Euro Casanova

Prof. Dr. C. Julio Flórez López

Prof. Ph.D. Oscar A. López
Coordinador
(Tutor)



*A Ángelo, mi esposo, por ser mi otra parte
A Glomen y a Miriam, mis Padres, por su amor y dedicación sin límites
A Gaby y a Ray, mis hermanos, como ejemplo de constancia y trabajo*

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todos aquellos que de alguna manera han contribuido a la realización de este trabajo.

A Dios por permitirme llegar hasta aquí.

A mis padres y mis hermanos por su apoyo incondicional e intemporal.

A mi padre nuevamente, por su colaboración y asesoría

A Ángelo, mi esposo, por su amor total, colaboración y asesoría.

Al Prof. Oscar A. López por su asesoría y paciencia.

Al personal técnico del Taller de Micromecánica de la Escuela de Física, Sr. Rodolfo Pacheco y Sr. Roberto Torres.

Al Coordinador del Taller de Micromecánica de la Escuela de Física, Econ. Argimiro Peraza.

Al Coordinador Administrativo de la Facultad de Ciencias, Prof. Pío Arias.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Simón Bolívar, principalmente a los Profesores: Gabriela Martínez, Orlando Peliccionni y Euro Casanova, y al estudiante Oscar J. Centeno.

Al personal técnico del Taller Mecánico, Nave de Ensayos Físicos y Nave de Ensayos Especiales del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. En especial a los Técnicos Iván Aponte, Andrés Paredes y Ramón Herrera.

A los Profesores Enrique Castilla y José Romero del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales por su valiosa colaboración y oportuna asesoría.

Al Prof. Tomás Henríquez de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo por sus pertinentes recomendaciones.

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH-UCV) y al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT) entes que financiaron esta investigación.

A la Facultad de Arquitectura y Urbanismo.

Al Instituto de Materiales y Modelos Estructurales.

A la Universidad Central de Venezuela.

Índice General

RESUMEN, i

ÍNDICE DE FIGURAS, iii

ÍNDICE DE TABLAS, ix

NOTACIÓN Y SÍMBOLOS, xiii

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción, 1

1.2 Objetivos, 6

1.3 Organización del trabajo, 7

CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1 Introducción, 9

2.2 Sistemas de control estructural ante acciones sísmicas, 10

2.2.1 Sistemas de control pasivo, 10

2.2.2 Sistemas de control activo, 16

2.2.3 Sistemas híbridos, 17

2.3 Disipadores de energía, 17

2.3.1 Amortiguadores de fricción, 18

2.3.2 Amortiguadores viscoelásticos, 23

2.4 Amortiguadores metálicos, 26

2.4.1 Definición y principio de acción, 26

2.4.2 Ventajas, 28

2.4.3 Tipos de amortiguadores metálicos, contribuciones recientes y su implementación, 29

2.5 Aplicabilidad de los amortiguadores, 36

- 2.5.1 Sistema estructural de los edificios, 37
- 2.5.2 Edad de la edificación, 38
- 2.5.3 Arquitectura, 39
- 2.5.4 Efectos ambientales, 39
- 2.5.5 Costos de mantenimiento, 39
- 2.6 Estudios analíticos, 39
 - 2.6.1 Métodos de análisis, 39
 - 2.6.2 Posición y número de amortiguadores, 41
- 2.7 Experiencia nacional, 43
- 2.8 Normativa, 44
- 2.9 Contribución de esta tesis al conocimiento presente, 45

CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE ANÁLISIS

- 3.1 Introducción, 47
- 3.2 Método de superposición modal estándar, 47
- 3.3 Amortiguamiento clásico y no-clásico, 49
- 3.4 Métodos de análisis para sistemas con amortiguamiento no-clásico, 50
 - 3.4.1 Integración directa, 50
 - 3.4.2 Método de superposición modal con modos de vibración complejos, 51
 - 3.4.3 Método simplificado, 52
 - 3.4.4 Método de Ritz, 53

CAPÍTULO 4. EFECTO DE LA POSICIÓN, NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS AMORTIGUADORES EN LA RESPUESTA SÍSMICA

- 4.1 Introducción, 55
- 4.2 Sistemas y propiedades, 56
- 4.3 Movimientos sísmicos, 57
- 4.4 Efecto de la posición, número y distribución de los amortiguadores, 60
- 4.5 Cálculo de la respuesta estructural y de las propiedades dinámicas, 63
- 4.6 Definición de parámetros, 65
- 4.7 Presentación de resultados, 66
- 4.8 Efecto de la posición de un amortiguador, 66
 - 4.8.1 Efecto en la respuesta máxima, 66
 - 4.8.2 Efecto en las propiedades dinámicas, 72
- 4.9 Efecto del número de amortiguadores, 76
 - 4.9.1 Efecto en la respuesta máxima, 76
 - 4.9.2 Efecto en las propiedades dinámicas, 79

- 4.10 Efecto de la distribución de tres amortiguadores, 83
 - 4.10.1 Efecto en la respuesta máxima, 83
 - 4.10.2 Efecto en las propiedades dinámicas, 86
- 4.11 Efecto de la distribución de cinco amortiguadores, 89
 - 4.11.1 Efecto en la respuesta máxima, 89
 - 4.11.2 Efecto en las propiedades dinámicas, 93
- 4.12 Efecto del sismo, 96

CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO SIMPLIFICADO Y EL MÉTODO DE LA INTEGRACIÓN DIRECTA

- 5.1 Introducción, 116
- 5.2 Sistemas y propiedades, 117
- 5.3 Definición de parámetros, 117
- 5.4 Error en el cálculo de la respuesta máxima, 118
 - 5.4.1 Estructuras con un amortiguador, 118
 - 5.4.2 Estructuras con tres amortiguadores, 120
 - 5.4.3 Estructuras con cinco amortiguadores, 121
 - 5.4.4 Comentarios finales, 123

CAPÍTULO 6. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA METÁLICO

- 6.1 Introducción, 127
- 6.2 Diseño del disipador, 129
 - 6.2.1 Concepción geométrica, 129
 - 6.2.2 Descripción del disipador, 135
 - 6.2.3 Principio de acción, 137
 - 6.2.4 Dimensionado de componentes, 138
- 6.3 Construcción del disipador de energía, 139
 - 6.3.1 Ensayos de caracterización del material, 139
 - 6.3.2 Proceso constructivo, 142
- 6.4 Modelos de predicción del comportamiento del disipador, 144
 - 6.4.1 Modelo analítico, 144
 - 6.4.2 Modelo numérico, 148
 - 6.4.2.1 Geometría, 148
 - 6.4.2.2 Discretización, cargas y condiciones de contorno, 149
 - 6.4.2.3 Modelo de comportamiento del material, 153

6.4.2.4 Predicción de la fuerza y desplazamiento correspondientes que dan inicio de la plastificación, 154

6.5 Evaluación experimental, 166

6.5.1 Descripción del proceso de ensayo, 166

6.5.2 Equipos y procedimiento de ensayo, 168

6.5.3 Instrumentación, 172

6.5.4 Análisis del comportamiento experimental del disipador, 174

6.5.4.1 Comportamiento histerético, 174

6.5.4.2 Energía disipada, 177

6.5.4.3 Fuerza y desplazamiento correspondientes al inicio de la plastificación, 178

6.5.4.4 Daño, 180

6.6 Aplicación numérica, 182

6.6.1 Sistemas y propiedades, 182

6.6.2 Procedimiento de diseño, 185

6.6.3 Resultados y análisis, 187

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones, 194

7.2 Recomendaciones, 200

7.3 Investigaciones futuras, 200

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS, 202

ANEXOS

Planos de construcción del disipador de energía, 210

Caracas, 2008

Tovar N., Carolina Del V.

**UTILIZACIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA EN EDIFICACIONES DE BAJA
ALTURA**

Tutor: Prof. Oscar A. López

**Tesis Doctoral, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Postgrado en Ingeniería Estructural y
Sismorresistente. Doctor en Ingeniería Estructural. Año 2008, 212 p.**

Palabras clave: disipadores de energía metálicos, estructuras con amortiguadores, ingeniería sismorresistente, control estructural, ensayos pseudo-estáticos.

Resumen. Uno de los principales retos de la Ingeniería Estructural y Sismorresistente ha sido el desarrollar nuevos conceptos y tecnología con el fin de minimizar el daño que producen los terremotos en las estructuras. Por ello, han sido desarrollados en décadas recientes diversos dispositivos para la protección estructural, uno de ellos corresponde a los disipadores de energía, cuyo objetivo es enfocar la disipación de energía durante un terremoto en un sistema especialmente diseñado para ello y así reducir el daño en la estructura. En Venezuela aún no se ha generalizado el uso de disipadores de energía en edificios, quizás debido a que los estudios analíticos y experimentales son sumamente escasos en el país, sumado a los altos costos que implican la adquisición, colocación y mantenimiento de estos dispositivos.

El primer objetivo de esta investigación es realizar un estudio analítico para evaluar el efecto de la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de edificios de baja altura. Para ello se investigan dos tipos de sistemas estructurales sometidos a una familia de sismos, considerando amortiguamiento no-clásico para su análisis, en los que se adoptaron diversas distribuciones para los amortiguadores. Los resultados se presentan en términos de la respuesta máxima obtenida con relación al periodo de vibración de la estructura, el sistema resistente y la colocación de los amortiguadores. De este estudio se concluye que la posición, número y distribución de los amortiguadores tiene gran influencia en la respuesta estructural, pero este efecto es sensible al valor del período fundamental y al tipo de sistema estructural del edificio. Para las estructuras aporricadas de período largo conviene distribuir el amortiguamiento uniformemente en todos los entresijos, mientras que para las estructuras de muros se obtiene mayor beneficio si el amortiguamiento se concentra en el primer entresijo.

La excitación sísmica tiene una marcada influencia en la respuesta de las estructuras con amortiguadores.

Cómo segundo objetivo, se investiga el error que se comete en el cálculo de la respuesta de estructuras con amortiguadores. Con este propósito se comparan dos métodos de análisis, el

primero, el método simplificado, es utilizado por defecto en la mayoría de los programas comerciales de análisis estructural. El segundo método, el de integración directa, supone la obtención de una respuesta más exacta para este tipo de estructuras ya que se consideran todas las particularidades que se derivan de su análisis. Se contrastan las respuestas obtenidas por ambos métodos y se estudian los factores que pueden magnificar o reducir el error. En este caso se concluye que cuanto más uniforme sea la distribución del amortiguamiento en el sistema, mayor validez adquiere el método simplificado como método práctico de cálculo para estructuras con amortiguadores ya que el error cometido es pequeño.

Finalmente, se concluye esta investigación con el diseño, construcción y evaluación de un disipador de energía metálico para edificaciones de baja altura. En general, el dispositivo cumple con los siguientes requisitos: disipación de energía para un rango de pequeños desplazamientos de entrepiso, fuerza desarrollada y controlada en un rango apropiado, proceso de disipación estable y predecible, factibilidad constructiva y dimensiones manejables, fácil desmontaje y reemplazo una vez dañado. Se proponen dos modelos para la predicción del comportamiento del disipador, un modelo analítico, basado en conceptos de resistencia de materiales, y un modelo numérico, realizado con un programa de elementos finitos. Este último permite estimar el patrón de esfuerzos en cada parte del dispositivo, para así predecir puntos y zonas de falla. Se realiza la evaluación experimental del prototipo, para caracterizar su proceso de disipación de energía, a través de un ensayo pseudo-estático que permite obtener las propiedades mecánicas y el comportamiento histerético del disipador. Luego, se analiza numéricamente el desempeño del disipador dentro de una estructura, que corresponde al modelo de una edificación escolar existente. De esta última etapa se concluye que el modelo numérico del disipador de energía contribuyó a predecir las zonas de daño del dispositivo, mostrando congruencia con el diseño conceptual del mismo. La evaluación experimental del dispositivo mostró un comportamiento histerético estable. El endurecimiento del acero tiene un efecto muy marcado en el comportamiento del dispositivo. El daño observado en el disipador luego de los ensayos realizados fue tal como se había previsto en el diseño conceptual. Se propone un procedimiento de diseño para la inclusión del dispositivo en una estructura, que al ser aplicado en un edificio conduce a reducciones importantes en la respuesta del sistema.

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Clasificación de los disipadores de energía, 3

Capítulo 2

Figura 2.1 Respuesta sísmica de estructuras: (A) Estructura convencional, (B) Estructura con aislamiento sísmico en la base, 11

Figura 2.2 “Heart Memorial Building” (Berkeley, Cal.) Edificio rehabilitado sísmicamente utilizando aisladores en la base. (A) Vista interior, (B) Perspectiva, 12

Figura 2.3. Aislador tipo apoyo deslizante, 13

Figura 2.4. Aislador tipo péndulo de fricción, 13

Figura 2.5 Apoyo de neopreno reforzado, 14

Figura 2.6. (A) Estructura con disipadores de energía, (B) Estructuras con sistema inercial acoplado, 15

Figura 2.7. Sistema inercial acoplado, aplicación práctica. Centerpoint Tower (Sydney, Australia), 15

Figura 2.8. (A) Esquema básico de un sistema de control activo. (B) Analogía con el cuerpo humano, 16

Figura 2.9. Representación de una estructura controlada activamente. (A) Sólo con control activo, (B) Disipadores de energía y control activo (C) Sistema inercial acoplado y control activo, 17

Figura 2.10. Mecanismo de disipación de energía de los amortiguadores de fricción y comportamiento histerético idealizado, 19

Figura 2.11. Dispositivo “Pall friction device”, 19

Figura 2.12. Mecanismo de deslizamiento generado en los amortiguadores de fricción “Pall friction devices”, 20

Figura 2.13. Conexión deslizante apernada (LSB), 20

Figura 2.14. Amortiguador de fricción Sumitomo, 21

Figura 2.15. Conexión SBC. (a) Componentes, (b) Colocación, 22

Figura 2.16. Nuevas propuestas para amortiguadores de fricción. (a) Componentes y (b) principio de acción, 22

Figura 2.17. Nuevas propuestas para amortiguadores de fricción II. Componentes y colocación, 23

- Figura 2.18. Configuración típica de un amortiguador viscoelástico, 24
- Figura 2.19. Lazo histerético típico de los amortiguadores viscoelásticos, 24
- Figura 2.20. Detalle de amortiguador viscofluido tipo Taylor, 25
- Figura 2.21. Detalle de instalación de amortiguador tipo Taylor, 25
- Figura 2.22. Curva tensión-deformación típica de los metales, 26
- Figura 2.23. Modelos matemáticos para predecir la respuesta inelástica de los metales. (a) Elástico-perfectamente plástico. (b) Elástico lineal con endurecimiento. (c) Polinomial, 27
- Figura 2.24. Respuesta cíclica tensión-deformación, 28
- Figura 2.25. Primeros amortiguadores metálicos. (a) Viga de torsión. (b) Viga de flexión. (c) Listón en U, 30
- Figura 2.26. Amortiguador ADAS (Added Damping and Stiffness), 31
- Figura 2.27. Dispositivo TADAS, 31
- Figura 2.28 Amortiguador slit-type, 31
- Figura 2.29. Amortiguadores que ceden por tracción o compresión de un tirante, 32
- Figura 2.30. Dispositivo Solera, 33
- Figura 2.31. Dispositivo tipo viga, 33
- Figura 2.32. "Pi Damper". Sección transversal. Detalles de colocación. Comportamiento histerético, 34
- Figura 2.33. "Brace Damper". (a) Elevación, (b) Sección transversal, (c) Comportamiento histerético, 35
- Figura 2.34. (a) Dispositivo cilindro de plomo. (b) Resultados experimentales, 35
- Figura 2.35. Disipador "Dual Funtion". Sección transversal, comportamiento histerético, ubicación en la estructura, 36
- Figura 2.36. Sistemas estructurales y posible ubicación de los amortiguadores metálicos, 38
- Capítulo 4
- Figura 4.1 Sistemas y propiedades, 56
- Figura 4.2 Espectro de velocidades para la familia de sismos utilizada, hasta $T=0,20$ seg., 59
- Figura 4.3 Espectro de velocidades para la familia de sismos utilizada, hasta $T=2,00$ seg., 59
- Figura 4.4. Casos de estudio para evaluar el efecto de la posición de un amortiguador, 60
- Figura 4.5. Casos de estudio para evaluar el efecto del número de amortiguadores, 61
- Figura 4.6. Casos de estudio para evaluar el efecto de la distribución de tres amortiguadores, 62
- Figura 4.7. Casos de estudio para evaluar el efecto de la distribución de cinco amortiguadores, 62
- Figura 4.8. Efecto de la posición de un amortiguador: estructuras aporticadas, 68
- Figura 4.9. Efecto de la posición de un amortiguador: estructuras de muros, 69
- Figura 4.10. Comparación entre los resultados obtenidos para las estructuras con un solo amortiguador, 70

- Figura 4.11. Efecto de la posición de un amortiguador: Caso 1, 71
- Figura 4.12. Efecto de la posición de un amortiguador: Caso 3, 72
- Figura 4.13. Efecto del número de amortiguadores: Estructura aporticada, 77
- Figura 4.14. Efecto del número de amortiguadores: Estructura de muros, 78
- Figura 4.15. Comparación entre los resultados obtenidos para las estructuras con varios amortiguadores, 79
- Figura 4.16. Efecto de la distribución de tres amortiguadores: Estructura aporticada, 84
- Figura 4.17. Efecto de la distribución de tres amortiguadores: Estructura de muros, 85
- Figura 4.18. Comparación entre los resultados obtenidos para las estructuras con tres amortiguadores, 85
- Figura 4.19. Efecto de la distribución de cinco amortiguadores: Estructura aporticada, 91
- Figura 4.20. Efecto de la distribución de cinco amortiguadores: Estructura de muros, 91
- Figura 4.21. Comparación entre los resultados obtenidos para las estructuras con cinco amortiguadores, 92

Capítulo 5

- Figura 5.1. Error en el cálculo de la respuesta máxima para estructuras con un amortiguador, 119
- Figura 5.2. Error en el cálculo de la respuesta máxima para estructuras con tres amortiguadores, 121
- Figura 5.3. Error en el cálculo de la respuesta máxima para estructuras con cinco amortiguadores, 122
- Figura 5.4. Comparación de resultados entre los casos investigados más relevantes, 124

Capítulo 6

- Figura 6.1. Idea primaria del disipador de energía y sus posibles ubicaciones en la estructura, 130
- Figura 6.2. Modelo 2. Vistas en perspectiva y Vista frontal, 131
- Figura 6.3. Prototipo del modelo 2. Vista en perspectiva, vista lateral y vista frontal, 131
- Figura 6.4. Propuesta para la fijación del modelo 2 en la estructura, 132
- Figura 6.5. Prototipo del modelo 3. Vista frontal. Vista lateral y Perspectiva. Modelo construido en madera balsa escala 1:3, 133
- Figura 6.6. Variante del modelo 3. Vista Frontal. Perspectiva. Vista lateral. Modelo construido en madera balsa, escala 1:3, 133
- Figura 6.7. Prototipo final. Perspectiva y vista frontal. Modelo construido en cartón, escala 1:1, 134
- Figura 6.8. Fijación del prototipo final a una estructura aporticada, 135
- Figura 6.9. Geometría del disipador de energía metálico propuesto, 135
- Figura 6.10. Componentes del disipador de energía metálico propuesto. (a) Parte externa (Caja). (b) Parte interna (Pi). (c) Láminas cedentes, 136

- Figura 6.11. Posibles ubicaciones del dissipador de energía propuesto en un sistema estructural. (Repetida, Cap. 2), 138
- Figura 6.12. Ensayo de tracción simple. NEF-IMME-UCV. (a) Probeta. (b) Probeta en mordazas. (c) Probeta con flexímetro. (d) Ruptura de la probeta, 140
- Figura 6.13. Gráficas tensión-deformación para los aceros ensayados, 141
- Figura 6.14. Ensayo de flexión para las láminas del dissipador. (a) Inicio del ensayo, lámina sin deformación. (b) Final del ensayo, lámina con deformación inelástica, 142
- Figura 6.15. Gráficas obtenidas a partir del ensayo de flexión de las láminas, 142
- Figura 6.16. Ajuste a las dimensiones de diseño por fresado de las láminas, 143
- Figura 6.17. Presentación y ajuste de cada una de las láminas componentes, 143
- Figura 6.18. Apertura de orificios, colocación de tornillos, ajuste y ensamblaje, 143
- Figura 6.19. Realización de las ranuras e inicio del ensamblaje final, 144
- Figura 6.20. Ensamblaje final del dissipador, 144
- Figura 6.21. (a) Diagrama de fuerza cortante y momento flector para viga en flexión pura. (b) Modelo elástico perfectamente plástico para el acero. (c) Sección transversal de las láminas, 145
- Figura 6.22. (a) Viga elastoplástica que trabaja a un valor moderado de deformación. (b) y (c) Estados de tensión para deformaciones mayores, 146
- Figura 6.23. (a) Distribución de tensiones para grandes deformaciones. (b) Idealización, 147
- Figura 6.24. Modelo numérico: Geometría. (a) Parte interna. (b) Geometría completa, 149
- Figura 6.25. Elementos de ANSYS utilizados en el modelo numérico. (a) "solid186". (b) "targe170" y "conta174", 150
- Figura 6.26. Discretización del modelo numérico. (a) Malla poco refinada. (b) Malla muy refinada, 151
- Figura 6.27. Discretización del modelo numérico. Malla definitiva, 151
- Figura 6.28. (a) Elementos de contacto. (b) Condiciones de contorno, 152
- Figura 6.29. (a) Cargas aplicadas al modelo. (b) Secuencia de desplazamientos impuestos, 153
- Figura 6.30. Modelo de material considerado. (a) Material 1. (b) Material 2, 154
- Figura 6.31. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +0,50mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -0,75mm, 156
- Figura 6.32. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +1,00mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -1,25mm, 158
- Figura 6.33. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +1,50mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -1,75mm, 160
- Figura 6.34. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +2,00mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -2,25mm, 162

- Figura 6.35. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +2,50mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -2,75mm, 164
- Figura 6.36. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +3,00mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -3,25mm, 165
- Figura 6.37. Curva fuerza-desplazamiento obtenida a través del modelo numérico, 166
- Figura 6.38. Evolución temporal del desplazamiento en el disipador, 167
- Figura 6.39. Componentes del equipo de ensayo: (a) Gatos hidráulicos acoplados a un banco de acero, (b) Detalle gato hidráulico, 168
- Figura 6.40. Componentes del equipo de ensayo: (a) Sistema de control y alimentación de los actuadores, (b) Realimentación mecánica, 169
- Figura 6.41. (a) Mesa de apoyo y elementos de fijación del disipador, (b) Altura adecuada de la mesa de apoyo, 170
- Figura 6.42. (a) Fijación de la mesa de apoyo al banco de acero, (b) Marco metálico robusto y sus conexiones, 171
- Figura 6.43. (a) Perspectiva general del equipo de ensayo, (b) Detalle del alojamiento del disipador, 171
- Figura 6.44. Instrumentación: (a) Ubicación del transductor de desplazamiento, (b) Detalle de las conexiones del transductor de desplazamiento, 172
- Figura 6.45. Ejecución del ensayo: (a) Vista superior flexión hacia la derecha en las láminas, (b) Detalle del desplazamiento de la pieza interna del disipador, (c) Detalle de la deformación experimentada por las láminas, 173
- Figura 6.46. Ejecución del ensayo: (a) Vista superior flexión hacia la izquierda en las láminas, (b) Detalle del desplazamiento de la pieza interna del disipador, (c) Detalle de la deformación experimentada por las láminas, 173
- Figura 6.47. Comportamiento experimental del disipador: Ciclos histeréticos, (a) Ensayo 1, (b) Ensayo 2, 174
- Figura 6.48. Ciclos individuales del ensayo 1, 175
- Figura 6.49. Acción de traba mecánica entre lámina y ranuras, 176
- Figura 6.50. Comportamiento histerético hasta 14mm: (a) Ensayo 1, (b) Ensayo 2, 177
- Figura 6.51. Energía disipada acumulada en cada ciclo ensayado, 178
- Figura 6.52. Envolturas de los ciclos de histéresis, 178
- Figura 6.53. Relación fuerza-desplazamiento: (a) Ensayo 1, (b) Ensayo 2, 179
- Figura 6.54. Aspecto de las piezas del disipador al terminar los ensayos: (a) Pieza interna, (b) Pieza interna y caja, (c) Ranuras caja, (d) Ranuras pieza interna, 181

Figura 6.55. Aspecto de las láminas del disipador al finalizar los ensayos: (a) Aspecto general ensayo 1, (b) Aspecto general ensayo 2, (c) Detalle de la lámina 5 del ensayo 2, (d) Detalle de la lámina 3 del ensayo 2, 182

Figura 6.56. Configuración típica de las edificaciones tipo "Cajetón cerrado", 183

Figura 6.57. Plano de planta (izquierda) y pórtico en dirección longitudinal (derecha), 184

Figura 6.58. Sistema estudiado para la aplicación numérica del amortiguador, 184

Figura 6.59. Disposición adoptada para los amortiguadores, 187

Índice de tablas

Capítulo 4

Tabla 4.1. Propiedades dinámicas de los sistemas estudiados, 57

Tabla 4.2. Movimientos Sísmicos: propiedades, 58

Tabla 4.3. Constantes de amortiguamiento, 64

Tabla 4.4. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): estructura aporticada con un amortiguador, 73

Tabla 4.5 Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): estructura de muros con un amortiguador, 73

Tabla 4.6 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con un amortiguador, $T = 0,20\text{seg.}$, 74

Tabla 4.6 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con un amortiguador, $T = 2,00\text{seg.}$, 74

Tabla 4.7 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con un amortiguador, $T = 0,20\text{seg.}$, 75

Tabla 4.7 (b) Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con un amortiguador, $T = 2,00\text{seg.}$, 75

Tabla 4.8. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura aporticada con varios amortiguadores, 80

Tabla 4.9. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura de muros con varios amortiguadores, 80

Tabla 4.10 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con varios amortiguadores, $T = 0,20\text{seg.}$, 81

Tabla 4.10 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con varios amortiguadores, $T = 2,00\text{seg.}$, 81

Tabla 4.11(a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con varios amortiguadores, $T = 0,20\text{seg.}$, 82

Tabla 4.11 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con varios amortiguadores, $T = 2,00\text{seg.}$, 82

Tabla 4.12. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura aporticada con tres amortiguadores, 86

- Tabla 4.13. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura de muros con tres amortiguadores, 87
- Tabla 4.14 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con tres amortiguadores,
T = 0,20seg., 88
- Tabla 4.14 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con tres amortiguadores,
T = 2,00seg., 88
- Tabla 4.15 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con tres amortiguadores, T = 0,20seg., 89
- Tabla 4.15 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con tres amortiguadores, T = 2,00seg, 89
- Tabla 4.16. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura aporticada con cinco amortiguadores, 93
- Tabla 4.17. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura de muros con cinco amortiguadores, 94
- Tabla 4.18 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con cinco amortiguadores, T = 0,20seg, 95
- Tabla 4.18 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con cinco amortiguadores, T = 2,00seg., 95
- Tabla 4.19 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con cinco amortiguadores, T = 0,20seg., 95
- Tabla 4.19 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con cinco amortiguadores, T = 2,00seg., 96
- Tabla 4.20 (a). Efecto del sismo en las estructuras con un amortiguador: Sistema Aporticado, T = 0,20seg. (Expresado como valores de β_p), 104
- Tabla 4.20 (b). Efecto del sismo en las estructuras con un amortiguador: Sistema de muros, T = 0,20seg. (Expresado como valores de β_p), 105
- Tabla 4.21 (a). Efecto del sismo en las estructuras con un amortiguador: Sistema Aporticado, T = 2,00seg. (Expresado como valores de β_p), 106
- Tabla 4.21 (b). Efecto del sismo en las estructuras con un amortiguador: Sistema de Muros, T = 2,00seg. (Expresado como valores de β_p), 107
- Tabla 4.22 (a). Efecto del sismo en las estructuras con tres amortiguadores: Sistema de pórticos, T = 0,20seg. (Expresado como valores de β_p), 108
- Tabla 4.22 (b). Efecto del sismo en las estructuras con tres amortiguadores: Sistema de pórticos, T = 2,00seg. (Expresado como valores de β_p), 109

Tabla 4.23 (a). Efecto del sismo en las estructuras con tres amortiguadores: Sistema de muros, $T = 0,20\text{seg.}$ (Expresado como valores de β_p), 110

Tabla 4.23 (b). Efecto del sismo en las estructuras con tres amortiguadores: Sistema de muros, $T = 2,00\text{seg.}$ (Expresado como valores de β_p), 111

Tabla 4.24 (a). Efecto del sismo en las estructuras con cinco amortiguadores: Sistema de pórticos, $T = 0,20\text{seg.}$ (Expresado como valores de β_p), 112

Tabla 4.24 (b). Efecto del sismo en las estructuras con cinco amortiguadores: Sistema de pórticos, $T = 2,00\text{seg.}$ (Expresado como valores de β_p), 113

Tabla 4.25 (a). Efecto del sismo en las estructuras con cinco amortiguadores: Sistema de muros, $T = 0,20\text{seg.}$ (Expresado como valores de β_p), 114

Tabla 4.25 (b). Efecto del sismo en las estructuras con cinco amortiguadores: Sistema de muros, $T = 2,00\text{seg.}$ (Expresado como valores de β_p), 115

Capítulo 5

Tabla 5.1. Análisis de correlación estadística entre el método exacto y el método simplificado para estructuras con $T = 0.20\text{seg.}$, 125

Tabla 5.2. Análisis de correlación estadística entre el método exacto y el método simplificado para estructuras con $T = 2.00\text{seg.}$, 126

Capítulo 6

Tabla 6.1. Propiedades mecánicas de los aceros empleados para la construcción del disipador, 139

Tabla 6.2. Resultados obtenidos al aplicar el modelo de predicción analítico, 148

Tabla 6.3. Valores de fuerza y desplazamientos asociados al comportamiento experimental del disipador, 180

Tabla 6.4. Propiedades dinámicas del sistema estudiado, 184

Tabla 6.5. Valores adoptados para la rigidez del piso con amortiguadores (K_a), la rigidez del amortiguador (K_d) y su constante de amortiguamiento equivalente (C_e), 188

Tabla 6.6. Valores obtenidos para el periodo (T_n) y el amortiguamiento en cada modo (ξ_n), 188

Tabla 6.7. Valores obtenidos para las derivas de entrepiso (m), 189

Tabla 6.8. Valores obtenidos para los cortantes de piso (kgf), 190

Tabla 6.9. Dimensiones para los amortiguadores, 191

Tabla 6.10. Propiedades dinámicas del sistema idealizado, 191

Tabla 6.11. Valores adoptados para la rigidez del piso con amortiguadores (K_a), la rigidez del amortiguador (K_d) y su constante de amortiguamiento equivalente (C_e) en la estructura idealizada, 192

Tabla 6.12. Valores obtenidos para el periodo (T_n) y el amortiguamiento en cada modo (ξ_n) de la estructura idealizada, 192

Tabla 6.13. Valores obtenidos para las derivas de entrepiso (m) de la estructura idealizada, 192

Tabla 6.14. Valores obtenidos para los cortantes de piso (kgf) para la estructura idealizada, 193

Notación y símbolos

M matriz de masa

C matriz de amortiguamiento

K matriz de rigidez

C^{*} matriz de amortiguamiento generalizada

I matriz identidad

0 matriz nula

\hat{M} matriz de masa de Ritz

\hat{K} matriz de rigidez de Ritz

\hat{C} matriz de amortiguamiento de Ritz

C_E matriz de amortiguamiento de la estructura sin amortiguadores

C_A matriz de amortiguamiento del sistema de amortiguadores viscosos

C constante del amortiguador

u(t) vector de desplazamientos relativos a la base de la estructura

$\dot{u}(t)$ vector de velocidades

$\ddot{u}(t)$ vector de aceleraciones

r vector unitario

$\ddot{u}_g(t)$ aceleración del terreno

Φ matriz modal

$\hat{\Phi}$ matriz que contiene los vectores de Ritz

ϕ_n vector de desplazamientos en el modo de vibración n

ϕ_n^* autovector complejo n

λ matriz de autovalores

λ_n^* autovalor complejo n

ω_n frecuencia de vibración del modo n

ω_n^* pseudo frecuencia de vibración del modo n

ξ_n amortiguamiento en el modo n

ξ_n^* amortiguamiento aparente del modo n

ξ amortiguamiento propio de la estructura

- $q_n(t)$ coordenada modal n
- $\mathbf{q}^*(t)$ vector de coordenadas modales del sistema con amortiguadores
- T período fundamental de vibración
- T_n período de vibración en el modo n
- m masa del piso
- k rigidez del piso
- β_i parámetro que evalúa el beneficio que producen los amortiguadores en el entrepiso i
- β_p parámetro que evalúa el beneficio promedio que producen los amortiguadores en la estructura
- Δ_i^k deriva del entrepiso i para el caso de estudio k
- Δ_i^0 deriva del entrepiso i para el caso de estudio 0
- n número de pisos de la estructura
- R_a respuesta aproximada, obtenida por el método simplificado
- R_e respuesta exacta, obtenida por el método de integración directa
- Θ_i parámetro que evalúa el error que se comete en el cálculo de la respuesta por el método simplificado, en el entrepiso i
- Θ_p parámetro que evalúa el error promedio que se comete en el cálculo de la respuesta de la estructura por el método simplificado
- F_y^* Tensión cedente del material obtenida en el laboratorio
- F_u^* Tensión última del material obtenida en el laboratorio
- E módulo de elasticidad del material
- I_x momento de inercia de la sección transversal con respecto al eje x
- c distancia desde la fibra más alejada al eje neutro
- M_{max} momento flector máximo que las láminas son capaces de resistir
- f deflexión en el centro de la lámina
- L longitud de la lámina
- b base de la sección transversal
- h altura de la sección transversal
- P carga máxima estimada para incursionar en el rango inelástico
- E_{ac} energía disipada acumulada
- K_f rigidez total del piso
- f'_c resistencia a la compresión del concreto
- K_a rigidez aportada al piso por los brazos rígidos y los amortiguadores
- K_d rigidez elástica del amortiguador
- C_e constante de amortiguamiento equivalente

SR relación entre K_a y K_f

N número de láminas del amortiguador

c/a con amortiguador

s/a sin amortiguador

%r porcentaje de reducción

ANSI/AISC American National Standard Institute/ American Institute of Steel Construction

ATC Applied Technology Council

FEMA Federal Emergency Management Agency

NEHRP National Earthquake Hazard Reduction Program

SEAONC Structural Engineers Association of Northern California

IMME Instituto de Materiales y Modelos Estructurales

NEE Nave de Ensayos Especiales

NEF Nave de Ensayos Físicos

FEDE Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas

FUNVISIS Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas

Capítulo 1

Introducción

1.1 INTRODUCCIÓN

Los terremotos severos como el de China (2008), Indonesia (2006), India (2001) y otros, han puesto en evidencia cuan vulnerable es el medio ambiente a las fuerzas de la naturaleza, principalmente el medio construido por el hombre. En consecuencia, uno de los principales retos de la Ingeniería Estructural y Sismorresistente ha sido el desarrollo de nuevos conceptos y tecnología con el fin de minimizar el daño que producen estos fenómenos en las estructuras y principalmente para salvaguardar a sus ocupantes.

Como resultado han sido desarrollados en décadas recientes nuevos conceptos relativos a la protección estructural, uno de ellos corresponde a los disipadores de energía, cuyo objetivo primordial es enfocar o concentrar la disipación de energía durante un terremoto en un sistema especialmente diseñado para ello y así reducir sustancialmente o eliminar el daño en la estructura. Estos sistemas además tienen la ventaja de que cuando se dañen pueden reemplazarse fácilmente sin comprometer la integridad de la edificación. Por simplicidad a estos sistemas se les suele llamar “amortiguadores” (Hanson y Soong, 2001).

Además, funcionan como sistemas de control de derivas y como protección para niveles excesivos de aceleración, representando una opción atractiva tanto para la rehabilitación de edificios existentes como para el diseño de nuevas estructuras. Desde finales del siglo XX, específicamente los años setenta, se han incluido este tipo de dispositivos en un gran número de edificios, principalmente en países

como Canadá, Japón y Estados Unidos. Sin embargo, recientemente es cuando organizaciones como FEMA (Federal Emergency Management Agency), SEAONC (Structural Engineers Association of Northern California) y ATC (Applied Technology Council) han propuesto normas para el diseño de estructuras que incluyan sistemas de amortiguamiento, y requisitos para el diseño y preparación de prototipos (Ramírez *et al.*, 2002).

En Latinoamérica, el país que lidera las investigaciones en torno al tema es México, donde existen numerosos estudios analíticos y experimentales que incluyen dispositivos comerciales y propuestas de nuevos disipadores. Ambos casos han tenido aplicación práctica en edificaciones nuevas y existentes. Sin embargo, a nivel normativo todavía no se ha concretado formalmente el uso de amortiguadores, sólo existen propuestas que han sido tomadas como disposiciones provisionales (Tena, 2003).

En Venezuela aún no se ha generalizado el uso de amortiguadores en edificios, quizás debido principalmente a que los estudios analíticos y experimentales son sumamente escasos en el país, lo que demuestra el poco conocimiento que se tiene sobre el tema, aunado a los altos costos que implican la adquisición, colocación y mantenimiento de estos dispositivos. Sin embargo, la norma venezolana COVENIN 1756-2001 “Edificaciones Sismorresistentes” autoriza el empleo de sistemas de control pasivo debidamente justificados analítica y experimentalmente, para reducir la respuesta sísmica, tales como los sistemas de aislamiento sísmico y amortiguamiento. El único caso conocido de aplicación práctica es el de un edificio residencial ubicado en la ciudad de Barquisimeto en cuyo diseño se incluyeron amortiguadores viscofluidos tipo Taylor (Morón y Gaschteff, 2003). En este sentido, resulta evidente la necesidad de incursionar e involucrarse en el estudio de esta tecnología.

En la Figura 1.1 se muestra la clasificación general de los disipadores de energía existentes hasta el momento (Hanson y Soong, 2001).

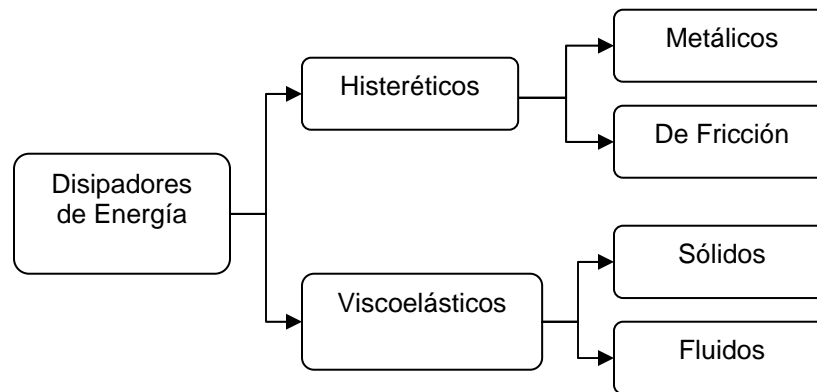


Figura 1.1. Clasificación de los disipadores de energía (Hanson y Soong, 2001).

Los disipadores viscoelásticos son dependientes de la velocidad relativa entre los pisos de la estructura, además están compuestos por sustancias poliméricas o vídrias, que resultan ser sensibles a los cambios de temperatura. De allí se deriva su principal desventaja, el desempeño del dispositivo se ve considerablemente afectado por las condiciones ambientales, lo cual acarrea altos costos de mantenimiento.

Los disipadores histeréticos son dependientes del desplazamiento relativo entre los pisos de la estructura, dentro de este grupo se encuentran los amortiguadores de fricción, cuyo proceso disipativo obedece al roce o deslizamiento relativo entre sus componentes. Estos dispositivos aunque no son afectados por los cambios de temperatura, tienen relativamente poca durabilidad pues tienen alta sensibilidad al coeficiente de roce entre sus piezas, parámetro que puede ser afectado por múltiples factores, tales como: el desgaste, la humedad, la corrosión y otros. Esto implica un mantenimiento frecuente, aunque menos costoso que el de los amortiguadores viscoelásticos. Por otro lado, su comportamiento es altamente no lineal e involucra gran esfuerzo y costo computacional para modelar el proceso de disipación; debido a su constante movimiento y cambios repentinos en el mismo pueden introducir altas frecuencias en la respuesta de la estructura, lo cual conduce a estimaciones incorrectas en el análisis.

Los amortiguadores metálicos, también incluidos en el grupo de los disipadores histeréticos, como su nombre lo indica están hechos de metal y disipan la energía a través de la plastificación de sus componentes. Entre las ventajas que ofrecen se pueden enumerar las siguientes:

- Cualquier esfuerzo, sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a la plastificación de metales. En consecuencia, estos dispositivos tienden a ser versátiles, simples y su rendimiento está garantizado.
- Se construyen utilizando materiales de uso común, lo que se traduce en una ventaja desde el punto de vista económico.
- Su eficiencia no se ve afectada por los cambios de temperatura, por lo tanto tienen una vida útil mayor y requieren muy poco mantenimiento.

Es importante destacar que un gran número de programas experimentales han demostrado la gran capacidad de los amortiguadores metálicos para disipar energía. La adaptación de dispositivos existentes y las nuevas propuestas son áreas de investigación que se mantienen activas (Martínez-Rueda, 2002).

La mayoría de los amortiguadores metálicos desarrollados hasta el momento comienzan su proceso de disipación para grandes desplazamientos, lo cual hace suponer que deben ser incluidos en estructuras muy flexibles o de gran altura. Dejando fuera del campo de aplicación a las estructuras rígidas y a las de baja altura. En el país existe un claro predominio de las edificaciones de baja altura, inclusive en las grandes ciudades, lo que podría llevar a pensar erróneamente que esta tecnología no tiene sentido en nuestro entorno, ya que los disipadores de energía siempre se asocian a edificios de gran altura.

De lo anteriormente discutido se deriva uno de los propósitos de esta investigación, que es diseñar, construir y evaluar una nueva propuesta de disipador de energía metálico para edificaciones de baja altura.

Para la concepción del prototipo, se tomó en cuenta que en este tipo de edificaciones se producirán desplazamientos muy pequeños, es por ello que la selección de un espesor reducido para el cuerpo disipador es fundamental para

limitar la fuerza máxima a un valor apropiado y garantizar que se produzca la cedencia para ese rango de desplazamientos.

El diseño propuesto podrá ser visto como una solución viable para la rehabilitación de estructuras existentes de baja altura que así lo requieran, como por ejemplo edificaciones escolares.

El dispositivo deberá cumplir con los siguientes requisitos:

- Disipación para pequeños valores de desplazamiento de entrepiso
- Fuerza desarrollada y controlada en un rango apropiado
- Proceso disipativo estable
- Rigidez importante en el plano de deformación para evitar efectos de torsión
- Factibilidad constructiva, dimensiones manejables.
- Bajo costo

Existe una gran cantidad de estudios analíticos y experimentales a nivel mundial sobre la aplicabilidad y ventajas de los sistemas de amortiguamiento, no obstante, todavía quedan muchas interrogantes abiertas. La mayoría de las investigaciones no han abordado con detenimiento las variables que afectan la selección de la posición y número de amortiguadores, además, no hay una posición concreta acerca del efecto del sismo en la respuesta de estructuras con amortiguadores. Se han propuesto diversas metodologías, pero no se ha hecho un estudio exhaustivo sobre lo que realmente ocurre en las estructuras y sus propiedades. Por otro lado, los estudios en general están asociados a la colocación de amortiguadores en edificios altos, dejando prácticamente fuera la alternativa de utilizar estos dispositivos en edificios de poca altura.

Otro de los propósitos de esta investigación es realizar un estudio analítico con la finalidad de evaluar el efecto de la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de edificaciones de baja altura, lo cual permitirá formular algunas recomendaciones sustentadas científicamente que puedan ser usadas en el diseño de este tipo de estructuras con amortiguadores.

El análisis de las estructuras con amortiguadores es un problema complejo, y aunque se han hecho varias investigaciones en torno a la precisión de utilizar los métodos de análisis tradicionales y al grado de exactitud en la respuesta obtenida, no existe una posición clara al respecto. De hecho, la mayoría de los programas comerciales para el análisis estructural utilizan los métodos convencionales de cálculo aún cuando se incluyan disipadores de energía en la estructura. En la presente investigación se realizará un estudio para indagar sobre el error que se comete en el cálculo de la respuesta de estructuras con amortiguadores, utilizando los métodos tradicionales. Asimismo se investigarán los factores que pueden magnificar o minimizar dicho error.

A continuación se formulan los objetivos de esta investigación.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Generales

- i. Evaluar el efecto que tienen la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta sísmica y en las propiedades dinámicas de edificaciones de baja altura.
- ii. Investigar el error que se comete en el cálculo de la respuesta sísmica de una estructura con amortiguadores al utilizar el método de superposición modal tradicional (método simplificado).
- iii. Desarrollar un disipador de energía metálico para estructuras nuevas o existentes de baja altura.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Analizar la influencia que tiene la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta de estructuras tipo muro.
- II. Analizar la influencia que tiene la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta de estructuras tipo pórtico.

- III. Estudiar el efecto del sismo en la respuesta de las estructuras con amortiguadores.
- IV. Comparar las respuestas obtenidas utilizando el método de superposición modal tradicional (método simplificado) con las obtenidas por el método de integración directa.
- V. Diseñar y construir un prototipo de disipador de energía metálico para edificaciones existentes de baja altura.
- VI. Realizar un modelo numérico para predecir el comportamiento del disipador de energía propuesto.
- VII. Evaluar experimentalmente la capacidad de disipación de energía y las propiedades mecánicas del disipador de energía propuesto.
- VIII. Evaluar numéricamente el desempeño del disipador de energía propuesto en una estructura.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo ha sido estructurado en siete capítulos los cuales se describen a continuación:

El primer Capítulo presenta la introducción y objetivos de la investigación.

En el Capítulo 2 hace referencia al estado actual del conocimiento, contiene una breve sinopsis sobre los sistemas de control estructural en general, para luego enfocarse en los disipadores de energía metálicos, discutiendo su principio de acción y contribuciones recientes. Luego, se presenta una visión global acerca los estudios analíticos realizados a nivel nacional e internacional sobre los métodos de análisis utilizados en estructuras con amortiguadores y acerca de la posición y número de amortiguadores. Esta exploración deja tener en cuenta una serie de cuestiones abiertas en torno al tema, que finalmente permiten llegar a la contribución de esta tesis al conocimiento presente.

En el Capítulo 3 se hace alusión a algunos de los métodos de análisis para estructuras con amortiguadores más utilizados en la actualidad.

El Capítulo 4 se estudia el efecto de la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta de estructuras de baja altura, se describen los sistemas estudiados en este trabajo, las excitaciones sísmicas seleccionadas, su influencia en el estudio realizado, detalles sobre el análisis, la presentación y discusión de los resultados.

En el Capítulo 5 se presentan los detalles, resultados y discusión sobre el estudio del error que se comete al calcular la respuesta de estructuras con amortiguadores, utilizando el método simplificado.

El capítulo 6 muestra los detalles, resultados y discusión sobre el diseño, construcción, evaluación numérica y experimental del disipador de energía metálico que se propone en esta investigación.

Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones, recomendaciones e investigaciones futuras.

Capítulo 2

Estado actual del conocimiento

2.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control estructural han surgido en décadas recientes como una alternativa al diseño sismorresistente convencional, en el que se permite la disipación de energía por la incursión en el rango plástico de ciertos componentes del sistema resistente a sismos de la edificación. Esto conduce a un daño en esos componentes, los cuales deben diseñarse y detallarse cuidadosamente para cumplir esa función sin alcanzar el umbral de falla estructural. Difícilmente el diseño convencional garantiza que los elementos no estructurales no sufran daño ante un sismo severo, e incluso la reparación de los elementos resistentes puede ser difícil. Por ello se han propuesto diversos sistemas que localizan los fenómenos no lineales en ciertas zonas predefinidas (Bozzo y Barbat, 2000).

En este capítulo se examina el estado del arte de los sistemas de control estructural ante acciones sísmicas, comenzando por una definición general y una clasificación básica de estos dispositivos, con una breve descripción de cada uno de ellos, para luego enfatizar en los disipadores de energía metálicos, objeto central de esta investigación.

Finalmente se hace un recorrido por la experiencia nacional e internacional en el área, planteando una serie de cuestiones abiertas que conllevan a la contribución principal de esta tesis al conocimiento presente.

2.2 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS

Se definen como sistemas especiales que se incorporan a la estructura con la finalidad de mejorar su desempeño ante acciones sísmicas y controlar el daño producido en la misma a través de la limitación de sus desplazamientos. Este objetivo se puede cumplir cuando el sistema de control lleva a cabo alguna o varias de las siguientes acciones:

- a) Alteración de las propiedades dinámicas del edificio
- b) Disipación de la energía introducida a la estructura por el sismo
- c) Generación de fuerzas que compensen la acción sísmica

Los sistemas de control estructural, en general, se pueden agrupar en tres categorías, estas son: los sistemas de control pasivo, los sistemas de control activo y los sistemas híbridos. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos.

2.2.1. Sistemas de control pasivo

En este grupo se incluyen aquellos dispositivos mecánicamente simples, que no requieren aporte energético de fuentes externas para su funcionamiento y que controlan la respuesta del edificio a través de la modificación de sus propiedades dinámicas, principalmente el amortiguamiento y la rigidez. Entre ellos se distinguen los aisladores, los disipadores de energía o amortiguadores y los sistemas inerciales acoplados.

Los sistemas aisladores son utilizados principalmente en puentes y edificios. En los edificios se colocan entre la superestructura y las fundaciones mediante conexiones especialmente diseñadas, reemplazables, y tienen la función de desacoplar la estructura parcialmente del movimiento del terreno, incrementando la flexibilidad y el período fundamental de la misma en dirección horizontal. Son dispositivos de considerable rigidez en dirección vertical, que al actuar agregan un modo de vibración adicional a la estructura, este último posee un factor de participación significativo y derivas de entrepiso muy reducidas. En la Figura 2.1

se muestra el comportamiento de una estructura convencional (A) y una con aislamiento sísmico en la base (B), nótese que ésta última se mueve rígidamente debido a la flexibilidad en dirección horizontal que le confiere el sistema de aislamiento en el nivel de base, esto permite inferir que el comportamiento en los niveles superiores será prácticamente lineal sin plastificación de los elementos estructurales. Este hecho que ocurre debido a que el aislador absorbe parte de la energía introducida por el sismo antes de que sea transmitida a la estructura, mientras que la estructura convencional debe reducir las fuerzas sísmicas por medio de la plastificación de los elementos resistentes lo cual se traduce en daño a componentes estructurales y no estructurales.

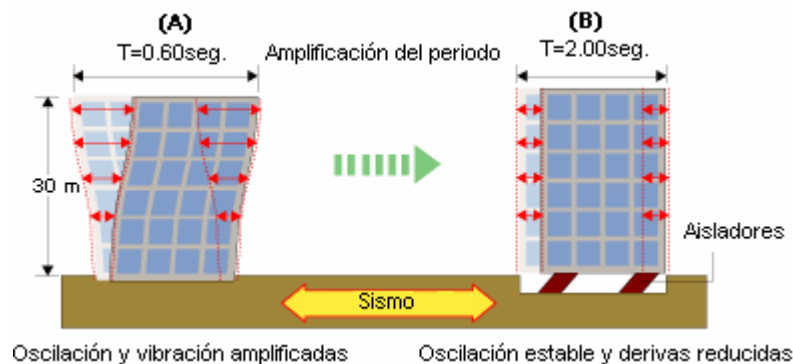


Figura 2.1. Respuesta sísmica de estructuras: (A) Estructura convencional, (B) Estructura con aislamiento sísmico en la base (www.oiles.co.jp/en/menshin/).

Esta técnica ha sido utilizada principalmente en estructuras de vital importancia, tales como hospitales y centrales nucleares, asimismo se ha empleado para la reparación de edificaciones antiguas de mampostería (Kelly, 1983), en la Figura 2.2 se aprecia el edificio “Heart Memorial Mining Building” perteneciente al campus de la Universidad de California, Berkeley, cuya construcción data de 1907 y fue rehabilitado sísmicamente en 2002 utilizando sistemas de aislamiento.

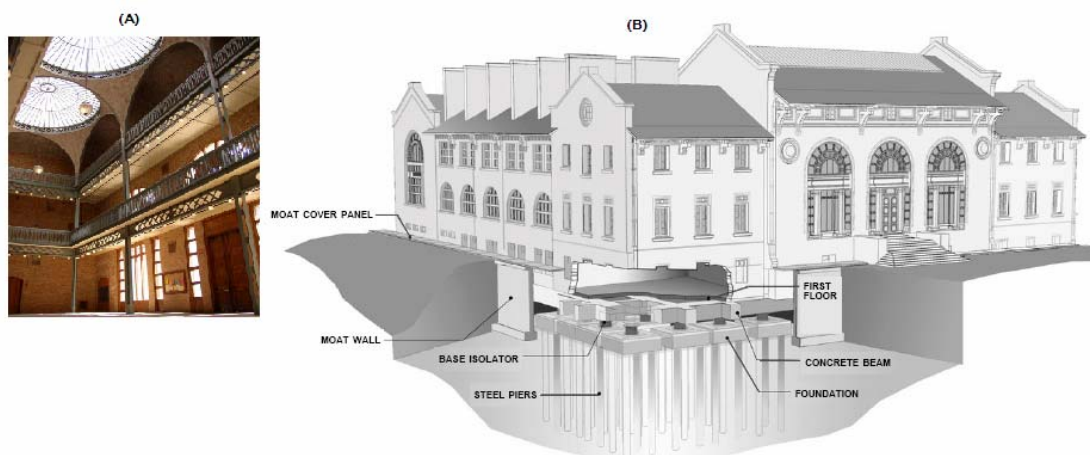


Figura 2.2. “Heart Memorial Building” (Berkeley, Cal.) Edificio rehabilitado sísmicamente utilizando aisladores en la base. (A) Vista interior, (B) Perspectiva (Comerio *et al.*, 2006).

Los aisladores típicos utilizados en la ingeniería estructural básicamente se incluyen en los siguientes renglones: apoyo deslizante, péndulo de fricción y apoyo de neopreno reforzado.

En el caso de los apoyos deslizantes, la estructura se apoya en juntas deslizantes y las fuerzas de fricción se oponen al movimiento disipando la energía, las fuerzas se reducen al disminuir el coeficiente de fricción entre los apoyos. Sin embargo, no tiene por sí mismo ninguna fuerza de restitución que permita a la estructura volver a su posición original. En la Figura 2.3 se muestra un dispositivo de esta clase.

Los aisladores tipo péndulo de fricción, siguen el mismo principio de funcionamiento que los apoyos deslizantes pero sus placas componentes son curvas (ver Figura 2.4). Este sistema desarrollado en la década de 1980, emplea el peso propio de la estructura para recentrar el edificio, minimizando los desplazamientos finales, su particular geometría permite la generación de una fuerza de restitución que devuelve a la estructura a su posición original (Bozzo y Barbat, 2000).

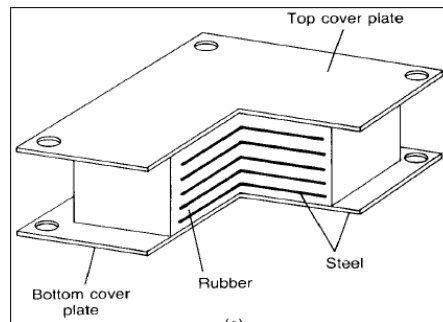


Figura 2.3. Aislador tipo apoyo deslizante (Kunde y Jangid, 2003).

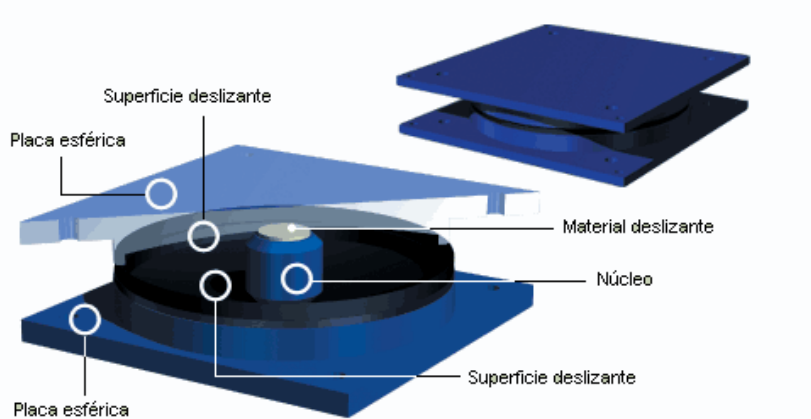


Figura 2.4. Aislador tipo péndulo de fricción (www.oiles.co.jp/en/menshin/).

El apoyo de neopreno reforzado, ilustrado en la Figura 2.5, está conformado por un elastómero (neopreno) reforzado con finas láminas metálicas. La gran flexibilidad lateral que aporta este material es lo que permite el desplazamiento horizontal de los extremos del aislador, las placas de refuerzo impiden el abultamiento del elastómero y le imprimen gran rigidez vertical al dispositivo. Una estructura apoyada sobre este tipo de elemento tiene un período fundamental mucho mayor que el que tendría si fuese apoyada sobre una base fija. Un factor de inestabilidad que existe en este tipo de aisladores y no ocurre en los de fricción, es el pandeo.

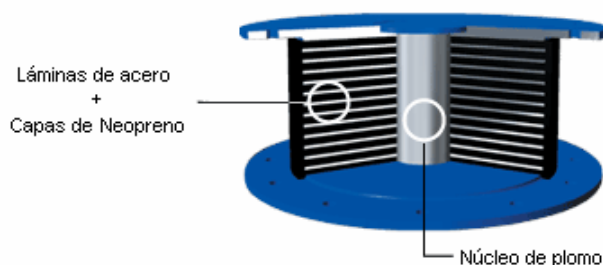


Figura 2.5 Apoyo de neopreno reforzado (www.oiles.co.jp/en/menshin/).

Los disipadores de energía, son dispositivos relativamente pequeños utilizados principalmente en edificios, que se colocan de tal manera que interactúen con la estructura, para que disipen la energía introducida en el sistema y así reducir su respuesta dinámica. Estos sistemas serán abordados con más detalle en la sección 2.3.

Los sistemas inerciales acoplados, utilizados principalmente para construcciones altas y esbeltas, consisten en grandes masas que se incorporan al edificio, generalmente en el tope, cuya excitación absorbe parte de la energía introducida por un terremoto. Resulta típico utilizar un gran bloque de acero o de concreto con este propósito, e inclusive un tanque lleno de agua. La disipación de la energía ocurre cuando la gran masa oscila con un desplazamiento o velocidad relativos a la estructura primaria. Los sistemas inerciales acoplados transfieren gran cantidad de energía cuando su frecuencia natural de vibración entra en sintonía con la frecuencia natural de vibración de la estructura primaria. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de una estructura con disipadores de energía y una con un sistema inercial acoplado en el tope.

En la Figura 2.7 se muestra la que al parecer es la primera aplicación práctica de los sistemas inerciales acoplados en un edificio, se trata de un edificio de más de trescientos metros de altura ubicado en Sydney, Australia (CenterPoint Tower). En esta estructura se utilizó en combinación con el tanque de almacenamiento de agua una serie de masas secundarias con la finalidad de controlar la vibración producida por el viento, fue terminada en 1971 (Kwok y MacDonald, 1987).

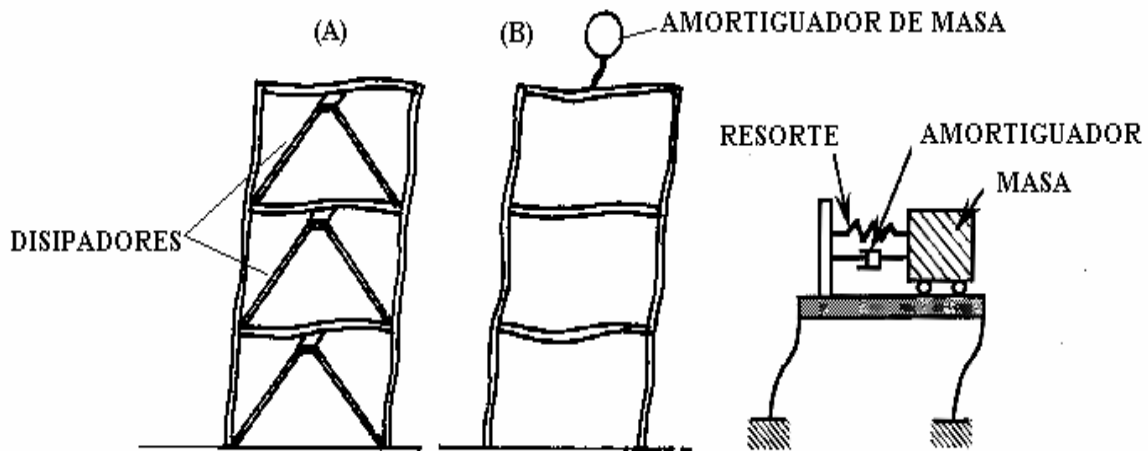


Figura 2.6. (A) Estructura con disipadores de energía, (B) Estructuras con sistema inercial acoplado (http://pollux.tu.chiba-u.ac.jp/.../jpac/control_02.htm).

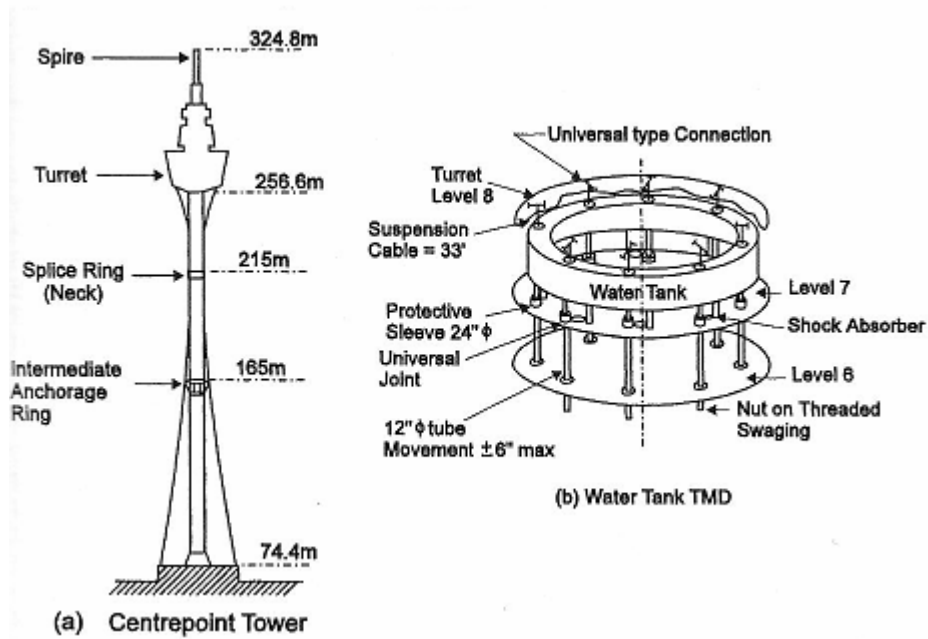


Figura 2.7. Sistema inercial acoplado, aplicación práctica. Centerpoint Tower (Sydney, Australia) (Soong y Dargush, 1997).

2.2.2. Sistemas de control activo

Son sistemas mecánicamente complejos que requieren una fuente de energía externa para su funcionamiento, capaces de ejercer fuerzas de control. En la Figura 2.8 se muestra el esquema básico de una estructura con un sistema de control activo, que consiste en un lazo cerrado gobernado por un computador, que permite calcular continuamente, en tiempo real, las fuerzas de control que deben aplicarse. El esquema se compone de: la estructura, el computador, los sensores, que miden la respuesta estructural, y los actuadores, que generan las fuerzas de control. Asimismo, en la Figura 2.8 (B) se aprecia una analogía de los sistemas de control activo con el cuerpo humano. Los sistemas de control activo tienen como principal ventaja que se adaptan automáticamente a las características de la excitación, sin embargo, esto implica un gran consumo energético para la estructura e inclusive un gran compromiso, ya que si falla el equipo electrónico la estructura queda desvalida (Barbat y Canet, 1994).

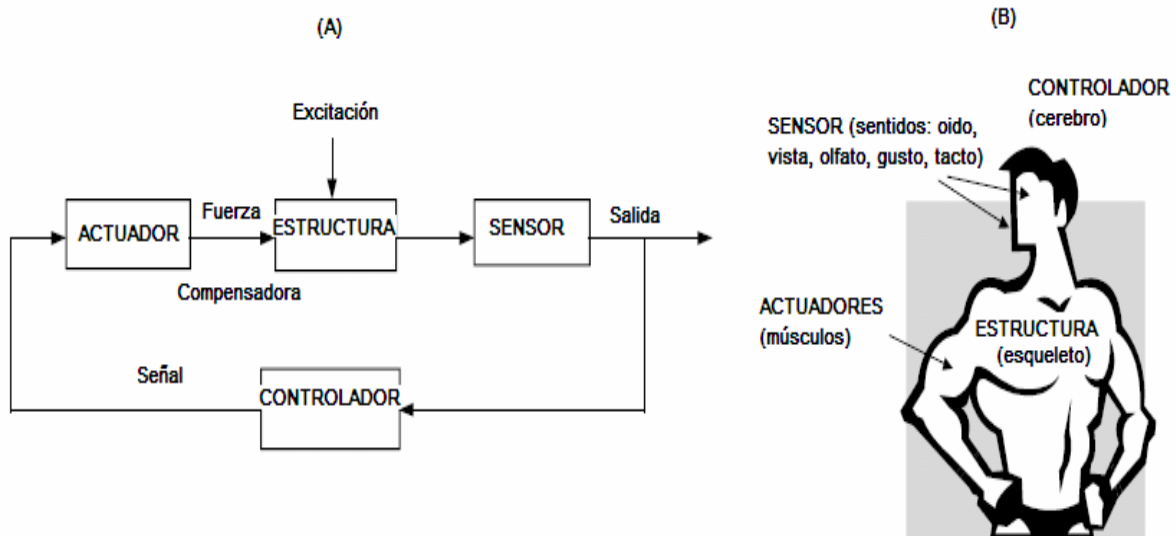


Figura 2.8. (A) Esquema básico de un sistema de control activo. (B) Analogía con el cuerpo humano (De La Cruz, 2003).

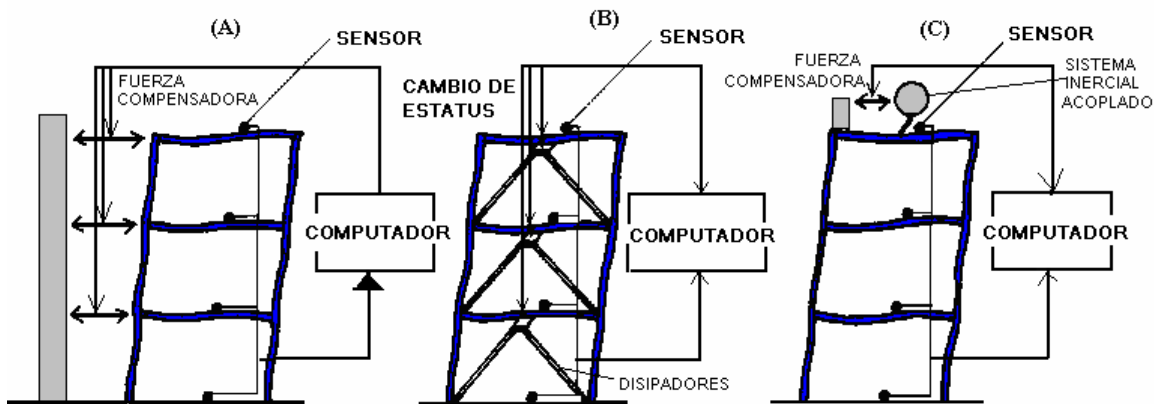


Figura 2.9. Representación de una estructura controlada activamente. (A) Sólo con control activo, (B) Disipadores de energía y control activo (C) Sistema inercial acoplado y control activo (http://pollux.tu.chiba-u.ac.jp/.../jpac/control_02.htm).

2.2.3. Sistemas híbridos

Son aquellos dispositivos en los que se combinan sistemas de control activo y pasivo, de tal manera que la seguridad del edificio no se ve comprometida ante una eventual falla de los sistemas activos. La combinación puede ser con aisladores, con disipadores de energía o sistemas inerciales acoplados. La idea de ensamblar ambos sistemas es aprovechar las ventajas que ofrecen cada uno de ellos, el sistema de control pasivo puede generar una mayor reducción en la respuesta de la estructura mientras que el sistema de control activo logra el ajuste final al adecuarse de forma precisa a la excitación aplicada (Iemura, 1994). En la Figura 2.9 (B) se muestra el esquema general de una estructura que combina disipadores de energía y control activo y en la 2.9 (C) se observa la combinación de un sistema inercial acoplado con control activo.

2.3 DISIPADORES DE ENERGÍA

Los dispositivos disipadores de energía, tienen como objetivo principal concentrar el proceso de disipación de la energía introducida durante un terremoto en un sistema especialmente diseñado para ello y así reducir sustancialmente o eliminar

el daño en la estructura. Estos sistemas además tienen la ventaja de que cuando se dañen pueden reemplazarse fácilmente sin comprometer la integridad de la edificación. Por simplicidad a estos sistemas se les suele llamar “amortiguadores”. Los disipadores de energía se pueden agrupar en dos categorías (Hanson y Soong 2001):

- Sistemas histeréticos
- Sistemas viscoelásticos

En los sistemas histeréticos el mecanismo de disipación de energía depende principalmente del desplazamiento relativo que se produzca entre los pisos de la estructura, en este grupo se incluyen los amortiguadores metálicos y los amortiguadores de fricción.

Por el contrario, en los sistemas viscoelásticos (V. E.) el mecanismo de disipación está ligado a la velocidad relativa que se produzca entre los pisos de la estructura. A continuación se describen los amortiguadores de fricción y los sistemas viscoelásticos, los amortiguadores metálicos merecen especial atención en esta investigación, razón por la cual se tratan con detalle en la sección 2.4.

2.3.1 Amortiguadores de fricción

Los amortiguadores de fricción son aquellos que utilizan el mecanismo de fricción sólida para disipar la energía introducida por el sismo, considerando como factor principal el roce que se produce por el deslizamiento relativo entre dos cuerpos rígidos (Soong y Dargush, 1997). El desarrollo de estos disipadores comienza por analogía con los frenos de automóviles. En general, el mecanismo de deslizamiento entre partes componentes del dispositivo genera un lazo histerético rectangular similar al de la fricción de Coulomb. Ver Figura 2.10.

Los amortiguadores de fricción en general se presentan con una mecánica más compleja que la de los amortiguadores metálicos.

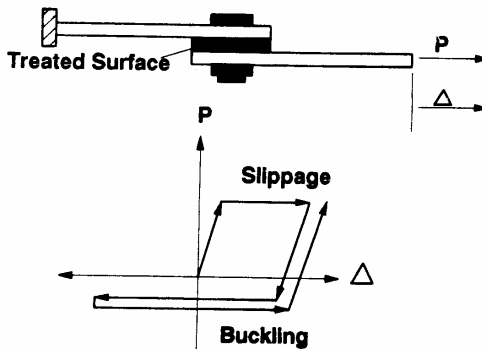


Figura 2.10. Mecanismo de disipación de energía de los amortiguadores de fricción y comportamiento histerético idealizado (Hanson y Soong 2001).

Como ejemplo de este tipo de disipadores se muestra en la Figura 2.11 el dispositivo Pall, desarrollado con el propósito de mejorar la respuesta sísmica de las estructuras (Pall *et al.*, 1980).

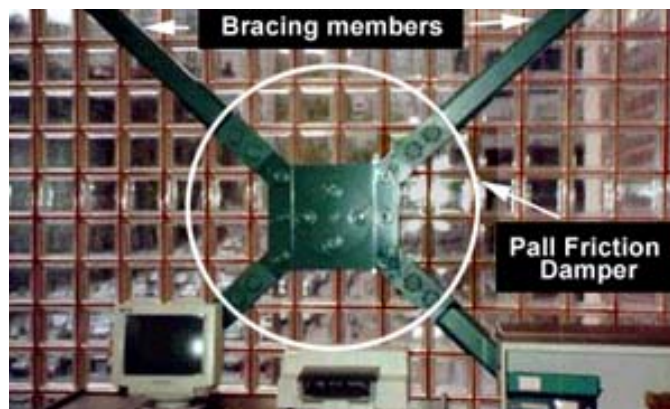


Figura 2.11. Dispositivo "Pall friction device".

(http://www.ideers.bris.ac.uk/resistant/damping_friction.html)

En la Figura 2.12 se aprecia el mecanismo de funcionamiento del "Pall friction device", obsérvese como se plantea el movimiento relativo entre los componentes del dispositivo y por ende el roce entre los mismos.

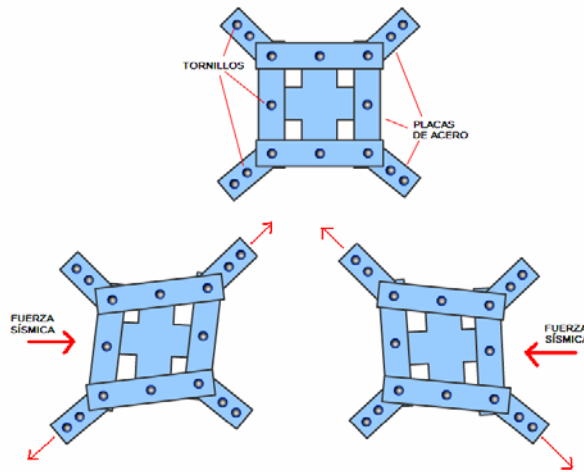


Figura 2.12. Mecanismo de deslizamiento generado en los amortiguadores de fricción "Pall friction devices".

(http://www.ideers.bris.ac.uk/resistant/damping_friction.html)

En años recientes ha habido considerables progresos, y gran cantidad de este tipo de dispositivos han sido desarrollados, algunos de ellos se describen brevemente a continuación.

En la Figura 2.13 se aprecia la conexión deslizante apernada (Limited slip bolted joint, LSB por sus siglas en inglés) que incorpora zapatas para frenos entre las láminas de acero, para proveer una respuesta fuerza-desplazamiento consistente (Pall *et al.*, 1980).

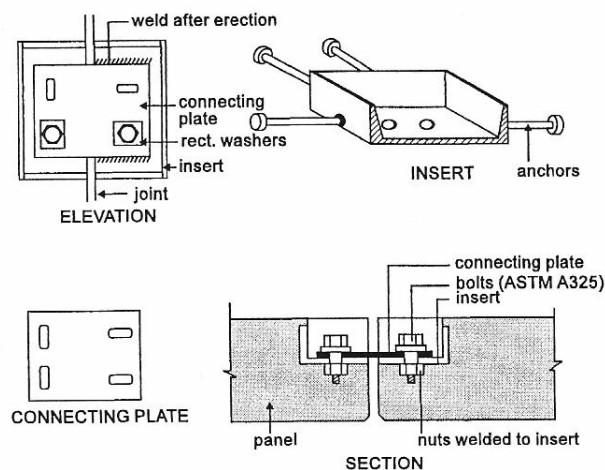


Figura 2.13. Conexión deslizante apernada (LSB) (Pall *et al.*, 1980).

La Figura 2.14 muestra el amortiguador de fricción “Sumitomo”, que consiste en un dispositivo de fricción uniaxial en el que zapatas de aleaciones de cobre deslizan a lo largo de la superficie interior de un cilindro de acero. La fuerza requerida para accionar el dispositivo es provista por resortes colocados en el interior y exterior del cilindro (Aiken y Kelly, 1990).

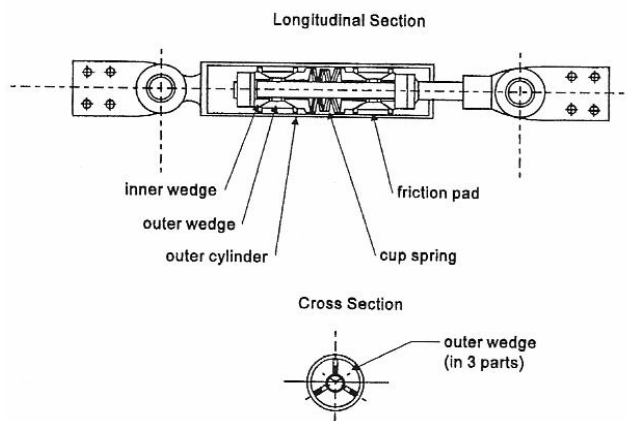


Figura 2.14. Amortiguador de fricción Sumitomo (Aiken y Kelly, 1990).

La conexión apernada con ranuras (Slotted bolted connection, SBC por sus siglas en inglés) se aprecia en la Figura 2.15, desarrollada en 1989 ha tenido diversas variaciones para mejorar su aplicabilidad. El concepto original de este dispositivo incluye tres o más láminas de acero unidas por pernos pretensados, con una o más placas con ranuras que permiten el deslizamiento relativo entre los componentes. Este tipo de conexión se coloca en los arriostramientos diagonales para pórticos (Fitzgerald *et al.*, 1989. Butterworth, 2000).

Los dispositivos descritos anteriormente han sido ampliamente investigados tanto analítica como experimentalmente, en consecuencia han tenido numerosas aplicaciones prácticas en edificios ubicados en Canadá, Japón y Estados Unidos.

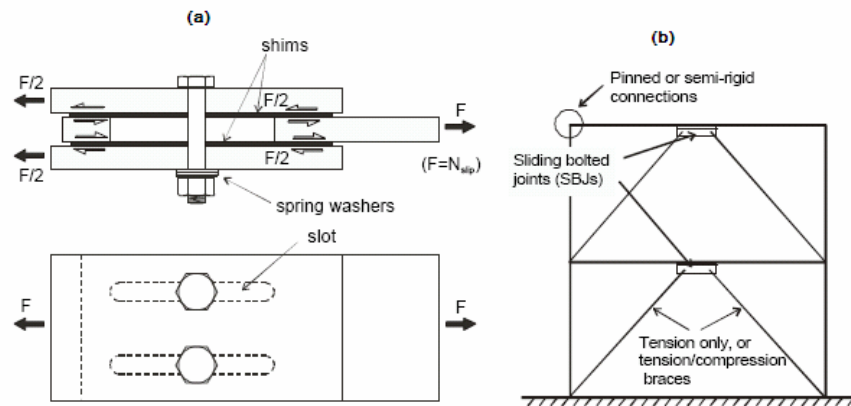


Figura 2.15. Conexión SBC. (a) Componentes, (b) Colocación (Butterworth, 2000).

Los disipadores que se describen a continuación son de data más reciente, por lo que sólo se encuentran en fase de estudio:

El dispositivo mostrado en la Figura 2.16 ha sido diseñado para disipar la energía introducida por el sismo y proteger a la edificación de daños estructurales y no estructurales durante terremotos moderados a severos. Consiste en una serie de placas conectadas a través de una unión tipo rótula, dispuestas de tal forma que la rotación relativa entre las láminas se favorece e incrementa, hecho que representa su mecanismo de disipación (Mualla y Belev, 2002), como puede ser visto en la Figura 2.16 (b).

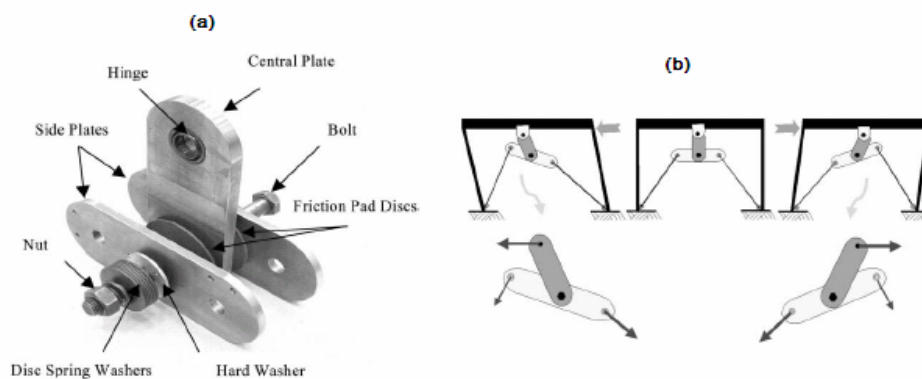


Figura 2.16. Nuevas propuestas para amortiguadores de fricción. (a) Componentes y (b) principio de acción (Mualla y Belev, 2002).

Otra de las propuestas recientes de amortiguadores de fricción se observa en la Figura 2.17. El dispositivo en cuestión está compuesto por un bloque hueco de acero inoxidable, con un corte a lo largo de su longitud. El hueco es un cilindro cuyo eje principal coincide con el eje longitudinal del bloque y sostiene a través de pernos pretensados el elemento diagonal donde se instalará el disipador (De La Cruz, 2003).

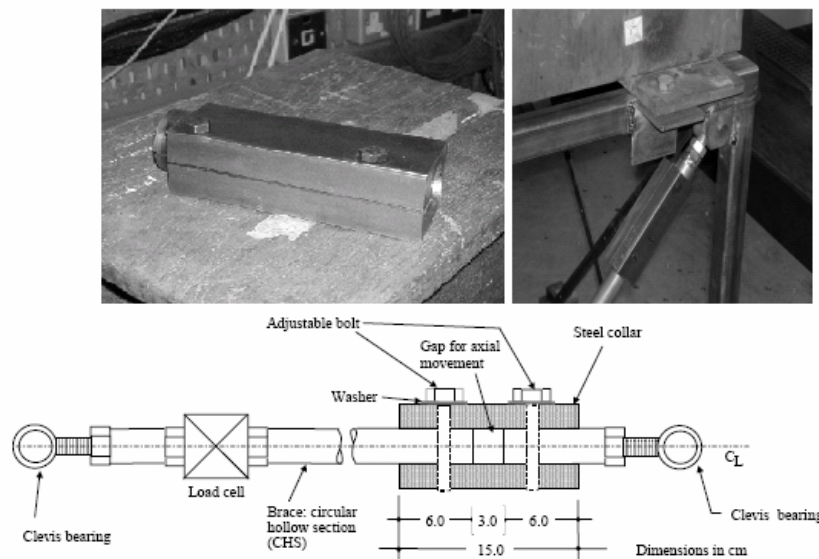


Figura 2.17. Nuevas propuestas para amortiguadores de fricción II. Componentes y colocación (De La Cruz, 2003).

2.3.2 Amortiguadores Viscoelásticos

Los amortiguadores viscoelásticos están formados por una especie de sándwich compuesto por placas de acero, entre las cuales se coloca un polímero o sustancia vidriosa, cuya deformación es el mecanismo de disipación de la energía (ver Figura 2.18). Los amortiguadores V. E. sólidos han sido ampliamente utilizados desde los años cincuenta en la industria aeroespacial para reducir la vibración de las estructuras (Gehling, 1987). Su primera aplicación en la ingeniería civil fue alrededor de 1969 cuando 10.000 unidades se instalaron en las torres gemelas del World Trade Center de New York, para disipar la energía proveniente de la acción eólica. Recientemente se han venido realizando estudios analíticos y

experimentales sobre la respuesta dinámica de las estructuras con este tipo de amortiguadores (Zhang y Soong 1992).

En general, el mecanismo de deformación del material viscoelástico del dispositivo genera un lazo histerético que tiene forma elíptica. Ver Figura 2.19.

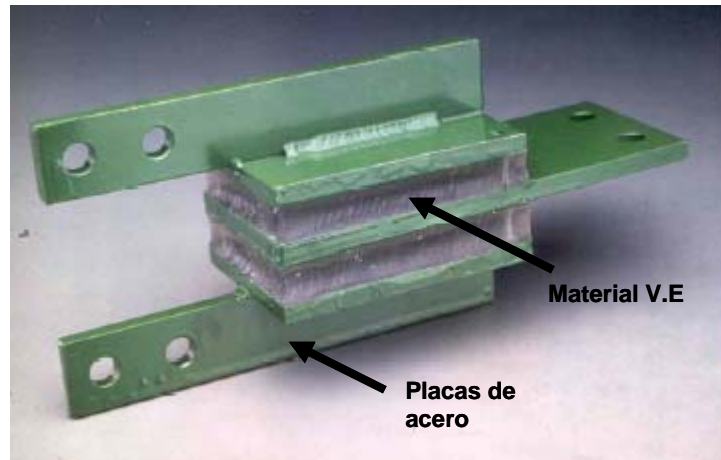


Figura 2.18. Configuración típica de un amortiguador viscoelástico.

(Aiken *et al.*, 1990) (<http://www.ideers.bris.ac.uk/resistant/>)

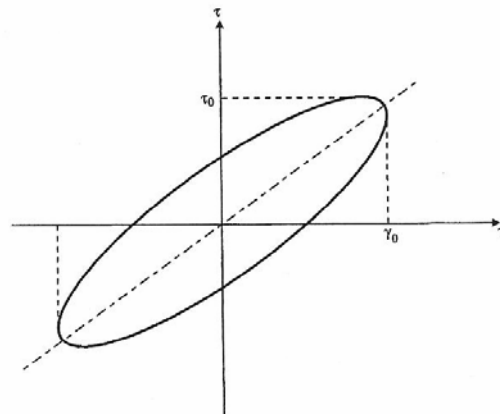


Figura 2.19. Lazo histerético típico de los amortiguadores viscoelásticos.

(Soong y Dargush, 1997)

Como una variante de estos sistemas los amortiguadores V. E. fluidos aparecen en los años 80 amortiguadores con fluido viscoso (desarrollados por Sumitomo Construction Company, Arima *et al.*, 1988). Ver Figura 2.20. Estos disipadores

cumplen con su objetivo a través de la deformación de un fluido viscoso contenido en un recipiente cerrado, para maximizar la capacidad de disipación de energía se emplean materiales con viscosidad muy alta cuyo comportamiento es dependiente de la temperatura y de la frecuencia de la excitación. Un típico representante de estos dispositivos consiste en un cilindro que contiene silicona compresible, el material es obligado a fluir mediante la acción de un pistón de acero que es activado por la velocidad relativa entre los niveles de la edificación (Soong y Dargush, 1997).

En la Figura 2.21 se aprecia la instalación de uno de estos dispositivos en un edificio.

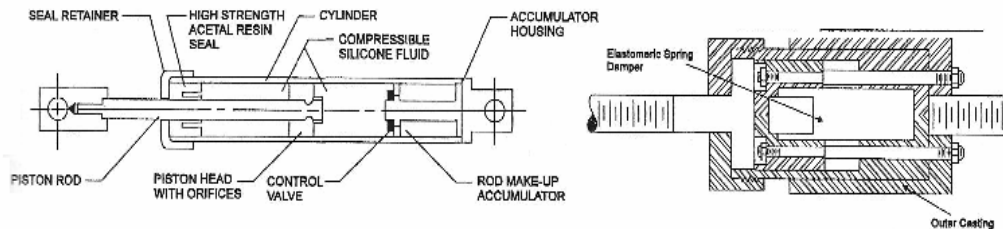


Figura 2.20. Detalle de amortiguador viscofluido, tipo Taylor (Arima *et al.*, 1988).



Figura 2.21. Detalle de instalación de amortiguador tipo Taylor.

(<http://www.ideers.bris.ac.uk/resistant/>)

2.4 AMORTIGUADORES METÁLICOS

2.4.1 Definición y principio de acción

Los amortiguadores metálicos son por lo general dispositivos de geometría sencilla cuyo principio de acción es la deformación inelástica de sus componentes, este proceso es bien conocido puesto que es uno de los principales mecanismos de disipación de energía de las estructuras durante un terremoto. Estos disipadores son dependientes del desplazamiento relativo entre los niveles que conforman las edificaciones y usualmente se les ubica en las diagonales de los pórticos, durante un sismo plastifican y cambian las propiedades dinámicas del edificio. Su comportamiento es similar al de las rótulas plásticas en el diseño sismorresistente convencional (Bozzo y Barbat, 2000).

La idea de usar piezas metálicas distintas al sistema resistente dentro de una estructura para disipar gran porción de la energía sísmica aparentemente fue propuesta por primera vez por Kelly *et al.*, (1972) y Skinner *et al.*, (1975), quienes consideraron vigas en torsión, vigas en flexión y otros mecanismos.

Para diseñar estos dispositivos, se debe caracterizar el comportamiento no lineal del material bajo ciclos de carga dependientes del tiempo y desarrollar un modelo apropiado de la relación fuerza-desplazamiento del disipador. Por lo general los metales tienen una curva tensión-deformación como la que se muestra en la Figura 2.22.

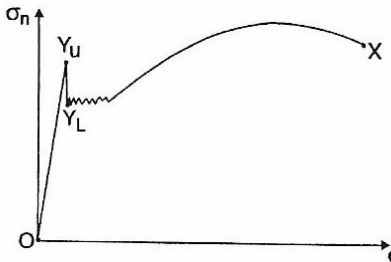


Figura 2.22. Curva tensión-deformación típica de los metales
(Soong y Dargush, 1997).

A pesar de las diversas geometrías existentes para los amortiguadores metálicos, en todos los casos el mecanismo de disipación de energía es la incursión en el rango inelástico por deformación del metal, habitualmente este metal es acero blando aunque se han empleado otros metales más exóticos como el plomo, el cobre y el aluminio. Idealmente el proceso de caracterización comienza con la predicción de la respuesta inelástica bajo ciertas condiciones de carga, usualmente este procedimiento no es directo. Muchos modelos matemáticos han sido propuestos con la finalidad de predecir este comportamiento, incluyendo el modelo elástico perfectamente plástico (Figura 2.23 (a)), el elástico lineal con endurecimiento (Figura 2.23 (b)) y el polinomial (Figura 2.23 (c)).

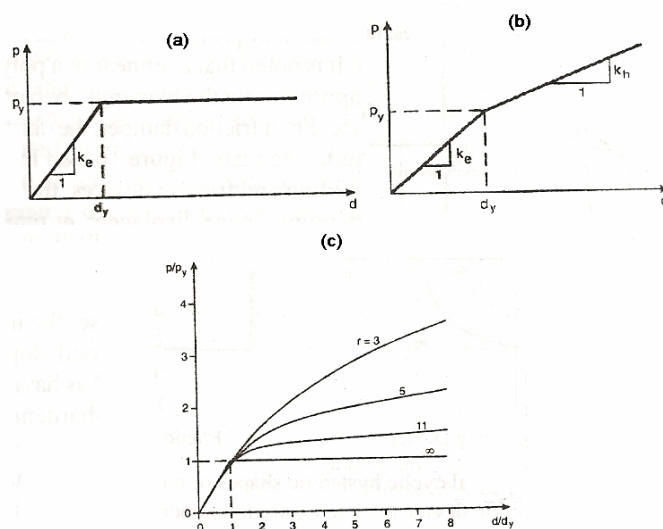


Figura 2.23. Modelos matemáticos para predecir la respuesta inelástica de los metales. (a) Elástico-perfectamente plástico. (b) Elástico lineal con endurecimiento. (c) Polinomial (Hanson y Soong, 2001).

Los modelos matemáticos anteriormente mostrados sólo abarcan la respuesta bajo la aplicación de carga monotónica creciente y deben ser complementados considerando la incursión en el rango inelástico a través de un proceso de carga y descarga del material, como se muestra en la Figura 2.24, para así prever el

comportamiento histerético del dispositivo y estimar su capacidad de disipación de energía.

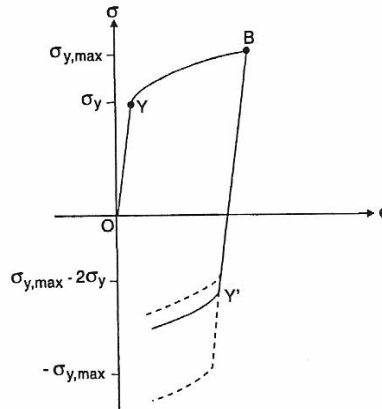


Figura 2.24. Respuesta cíclica tensión-deformación (Soong y Dargush, 1997).

La caracterización de los amortiguadores metálicos tiene como fin último el desarrollo de un modelo de comportamiento fuerza-desplazamiento confiable, para ello existen dos medios: la utilización de las leyes de la mecánica, que requiere un modelo teórico con la representación geométrica del dispositivo y la idealización del problema mediante un modelo de elementos finitos, y el uso de técnicas experimentales, en las que con un prototipo construido del disipador se verifica su comportamiento bajo carga (Soong y Dargush, 1997).

2.4.2 Ventajas

Entre las ventajas más relevantes que tienen los amortiguadores metálicos como herramienta de control estructural se pueden citar las siguientes:

- Tienen alta capacidad de disipar energía, lo cual ha sido respaldado por numerosos estudios analíticos y experimentales.
- Estos dispositivos no requieren de materiales exóticos o sofisticados, son fabricados con materiales metálicos, los cuales son tradicionales y de fácil acceso, lo que se traduce en una ventaja desde el punto de vista económico.

- Su eficiencia no se ve afectada por los cambios de temperatura, por lo tanto tienen una vida útil mayor y requieren poco mantenimiento.
- Cualquier esfuerzo, sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a la plastificación de metales, hecho que se traduce en versatilidad y simplicidad para este tipo de dispositivos.
- Con un diseño apropiado pueden ser muy fáciles de reparar, reemplazar o recalibrar.

2.4.3 Tipos de amortiguadores metálicos, contribuciones recientes y su implementación

El desarrollo de los amortiguadores metálicos, se inició en Nueva Zelanda en los tempranos años setentas en el Laboratorio de Física e Ingeniería (PEL, por sus siglas en inglés) (Martínez-Rueda, 2002). Algunos de los dispositivos propuestos en esa época son presentados por Kelly *et al.*, (1972) y Skinner *et al.*, (1975), y se muestran en la Figura 2.25. El primero, Figura 2.25 (a), se trata de una barra rectangular o cuadrada que se deforma por torsión y flexión, con la torsión como estado de tensión predominante. El segundo, Figura 2.25 (b), es una barra en voladizo de sección cuadrada o circular, que evidentemente se deformará a flexión. Por último, Figura 2.25 (c), se tiene un dispositivo compuesto por pletinas de acero dobladas en forma de U, colocadas entre dos superficies paralelas que tendrán desplazamiento relativo entre sí, siendo este el principio de acción.

En años siguientes se han hecho progresos considerables en el desarrollo de amortiguadores metálicos, numerosas investigaciones analíticas y experimentales se han llevado a cabo para caracterizar las nuevas propuestas de dispositivos, hecho que ha favorecido la implementación y comercialización de muchos de ellos. Actualmente existe un gran número de edificaciones en Nueva Zelanda, México, Japón, Italia y los Estados Unidos que incluyen amortiguadores metálicos como sistema de control estructural (Constantinou *et al.*, 1998).

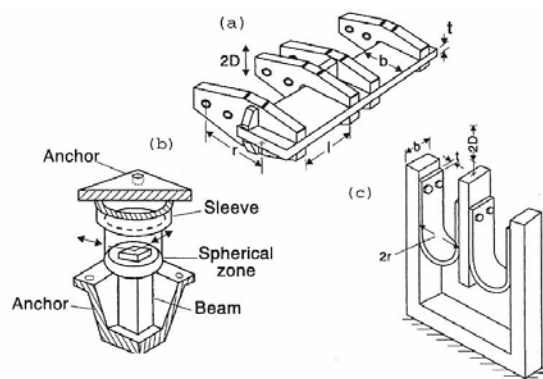


Figura 2.25. Primeros amortiguadores metálicos. (a) Viga de torsión. (b) Viga de flexión. (c) Listón en U (Skinner *et al.*, 1975).

Debido a los requerimientos mínimos de mantenimiento, las investigaciones recientes han favorecido el desarrollo de dispositivos simples, con secciones transversales sólidas, comportamiento histerético estable y altos niveles de deformación plástica (Martínez-Rueda, 2002).

Uno de los sistemas más populares y con numerosas aplicaciones prácticas es el mostrado en la Figura 2.26, el ADAS (Added Damping and Stiffness), desarrollado en los Estados Unidos por Roger Sholl (Sholl, 1993). Este disipa la energía a través de la deformación histerética de las placas de acero en forma de “X” que lo componen. El dispositivo en cuestión puede incrementar la resistencia, rigidez y capacidad de disipar energía de los pórticos en los que se instala. Los resultados experimentales muestran que tiene un proceso disipativo estable, producen una reducción significativa en las derivas de entrepiso y los elementos que lo conforman son fácilmente reemplazables (Tyler 1985, Whittaker *et al.*, 1991; Tsai *et al.*, 1993).

En la Figura 2.27 se aprecia una interesante variación del ADAS, denominado TADAS (Triangular-plates Added Damping and Stiffness), que consiste en una serie de placas de acero triangulares conectadas a una placa base mediante soldadura (Tsai *et al.*, 1993).

Otros sistemas usados en Japón incluyen una especie de panel flexible con aberturas en su plano de corte (Wada *et al.*, 1999), ver Figura 2.28. Dentro de este

grupo se incluyen a los sistemas que ceden por tracción y compresión de un tirante (Clark *et al.*, 1999), ver Figura 2.29.

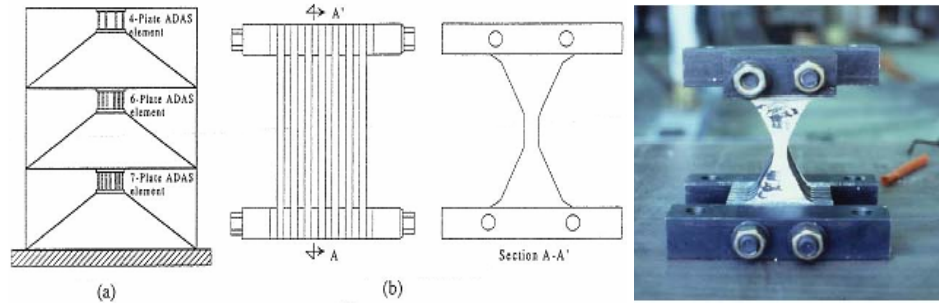


Figura 2.26. Amortiguador ADAS (Added Damping and Stiffness).
(Whittaker *et al.*, 1991) (Tena, 2003)

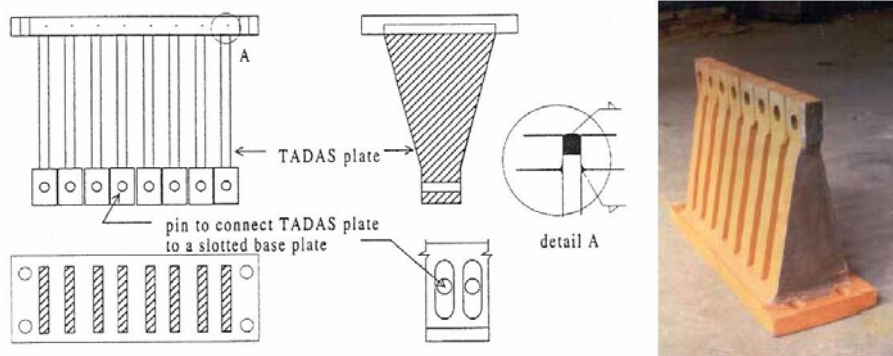


Figura 2.27. Dispositivo TADAS (Tsai *et al.*, 1993), (Tena, 2003).

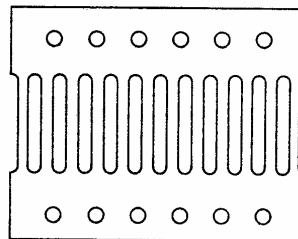


Figura 2.28 Amortiguador slit-type (Wada *et al.*, 1999).

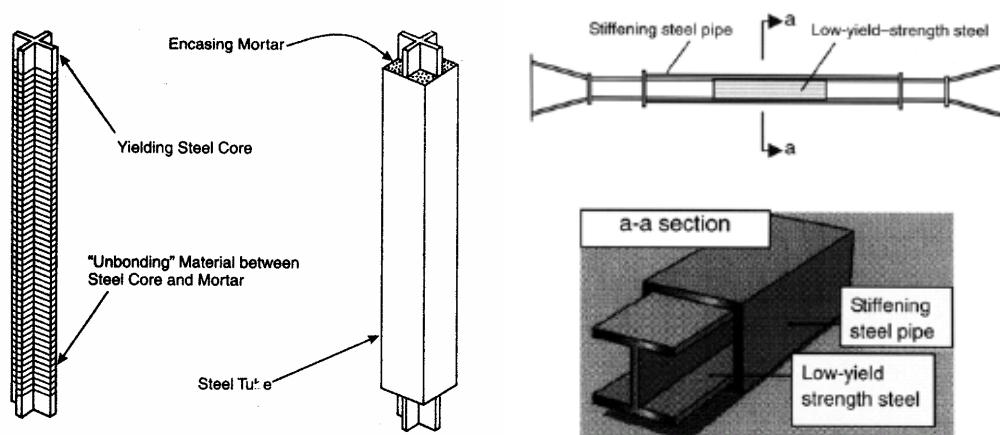


Figura 2.29. Amortiguadores que ceden por tracción o compresión de un tirante (Clark *et al.*, 1999, Tanaka *et al.*, 2003).

En Latinoamérica, específicamente en México, ha existido particular interés por los dispositivos disipadores de energía por histéresis del material, en especial por aquellos fabricados con acero estructural ya que conllevan a un menor costo de mantenimiento.

Con base a esto se han diseñado algunos dispositivos, tales como: El dispositivo “Solera” que disipa energía cuando las placas de acero que conforman el disipador se deforman como las orugas de un tractor. Con un valioso estudio experimental y teórico pero aún sin aplicación práctica (Aguirre y Sánchez, 1989. Tena, 2003) Ver Figura 2.30. El dispositivo tipo viga, mostrado en la Figura 2.30 que disipa energía a través de placas rectangulares que trabajan como vigas simplemente apoyadas sujetas a cargas concentradas aplicadas de forma simétrica. Este disipador cuenta con el respaldo de un estudio experimental y aplicación práctica en la rehabilitación de un edificio en Ciudad de México (Escobar *et al.*, 2002, Tena, 2003).

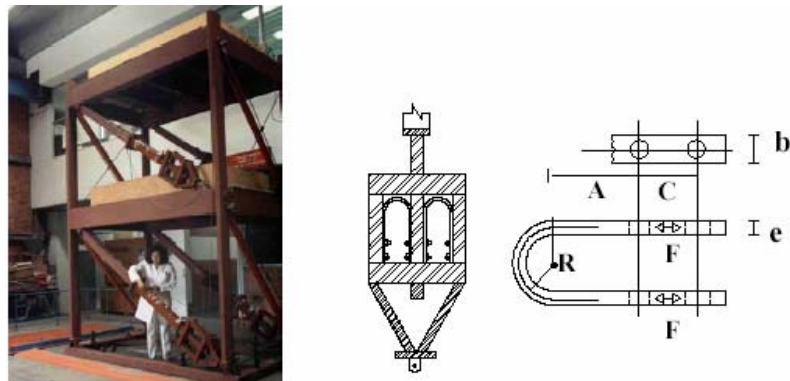


Figura 2.30. Dispositivo Solera (Aguirre y Sánchez, 1989).



Figura 2.31. Dispositivo tipo viga (Escobar *et al.*, 2002).

Dentro de las contribuciones más recientes se pueden citar las siguientes:

La Figura 2.32 muestra un disipador en forma de U denominado “pi damper”, diseñado como conexión viga-columna en estructuras metálicas, especialmente para ser colocado en dirección del eje débil de la columna, su idea principal es minimizar las conexiones por soldadura en el sistema. El comportamiento del disipador se evalúa a través de un modelo matemático y un ensayo cuasi-estático, los lazos histeréticos obtenidos muestran un proceso disipativo estable (Koetaka *et al.*, 2005).

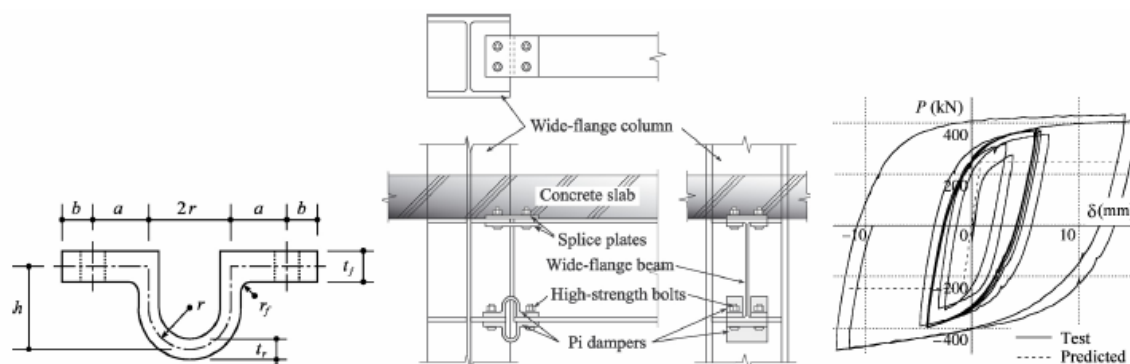


Figura 2.32. “Pi Damper”. Sección transversal. Detalles de colocación. Comportamiento histerético (Koetaka *et al.*, 2005).

Benavent-Climent (2006) presenta un amortiguador metálico ideado para incrementar la rigidez y reducir las derivas de entrepiso en estructuras aporricadas de concreto armado, consiste en dos perfiles en forma de H conectados mediante placas de acero con ranuras y se denomina “brace damper” (ver Figura 2.33). La propiedades mecánicas y comportamiento histerético fueron evaluadas mediante un ensayo cuasi-estático, posteriormente se construyó una estructura de concreto reforzado a escala 2/3 y se le colocó el disipador sometiéndose a un ensayo en mesa vibrante. Se demostró alta capacidad para disipar energía.

El dispositivo mostrado en la Figura 2.34 (a), es un disipador diseñado para edificios o estructuras de uso industrial sujetas a acciones sísmicas o de viento de bajo ciclaje. Está conformado por dos cilindros coaxiales de plomo que permiten el desplazamiento relativo entre ellos, de esta manera la parte interior del disipador estará simultáneamente sometida a tensiones de compresión y corte que conducen a una deformación plástica. En la Figura 2.34 (b) se aprecia el comportamiento histerético del amortiguador obtenido a través de ensayos para desplazamientos variables, el cual muestra un lazo estable (Curadelli y Riera, 2007).

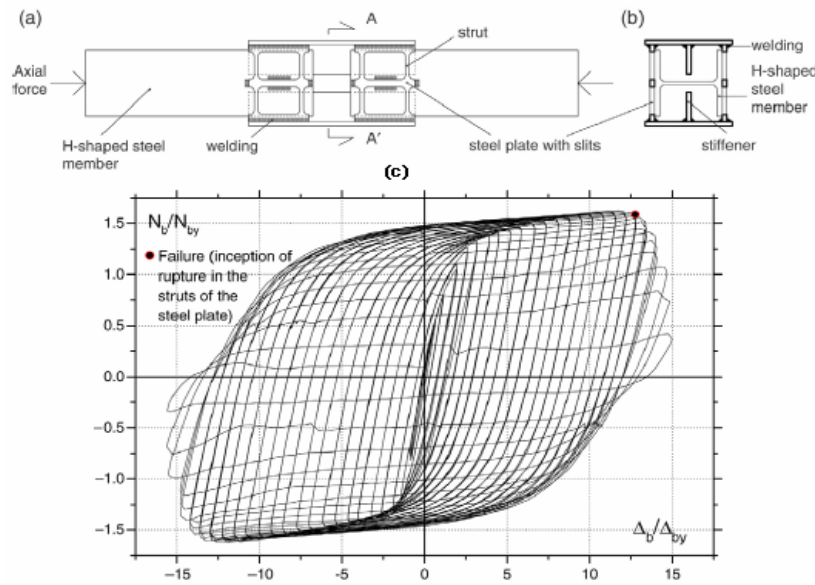


Figura 2.33. “Brace Damper”. (a) Elevación, (b) Sección transversal, (c) Comportamiento histerético (Benavent-Climent, 2006).

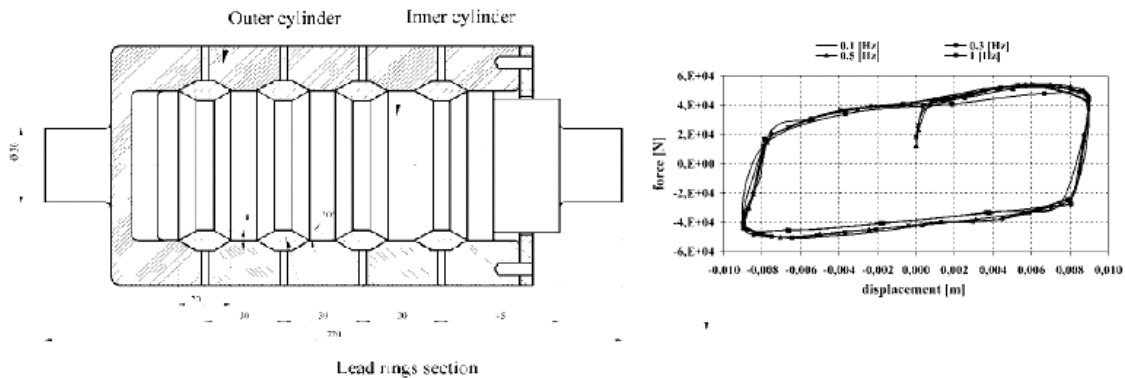


Figura 2.34. (a) Dispositivo cilindro de plomo. (b) Resultados experimentales (Curadelli y Riera, 2007).

Li y Li, 2007 diseñan un dispositivo de acero de geometría sencilla compuesto por una sola placa de 4mm de espesor (ver Figura 2.35), denominado “dual function metallic damper”, cuya relación fuerza desplazamiento se obtiene a través de un ensayo cuasi-estático de fuerza y desplazamiento controlado, se reportó un proceso disipativo estable. Las conclusiones apuntan a que el ensayo cuasi-estático revela claramente las propiedades histeréticas del disipador, la simulación

numérica y ensayo en mesa vibrante muestran que el dispositivo reduce la respuesta de la estructura y aumenta su rigidez.

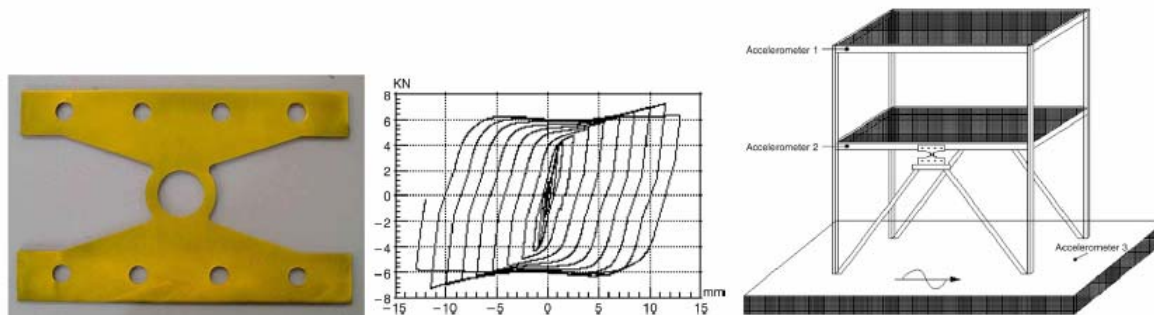


Figura 2.35. Disipador “Dual Funtion”. Sección transversal, comportamiento histerético, ubicación en la estructura (Li y Li, 2007).

Finalmente, como apunta Martínez-Rueda (2002) cabe destacar que un gran número de programas experimentales han demostrado la gran capacidad de los amortiguadores metálicos para disipar energía. Simultáneamente han sido propuestos numerosos modelos analíticos que reproducen el comportamiento de los dispositivos y resultando una poderosa herramienta para estimar la respuesta de las estructuras con amortiguadores metálicos. La adaptación de dispositivos existentes y las nuevas propuestas son áreas de investigación que se mantienen activas hoy en día.

2.5 APLICABILIDAD DE LOS AMORTIGUADORES

La inclusión de amortiguadores en las estructuras trae consigo consecuencias directas, las primeras son obviamente el incremento en la capacidad de disipación de energía y el aumento del amortiguamiento modal, reduciendo o eliminando el potencial daño en los elementos estructurales y sus conexiones.

Los amortiguadores metálicos, los de fricción y los V.E. adicionalmente pueden incrementar la rigidez y resistencia de la estructura, lo que se traduce en reducción de los desplazamientos y reducción del período fundamental, sin embargo,

también pueden aumentar las fuerzas laterales recibidas por el sistema. A continuación se hace referencia a algunos aspectos que se deben tomar en cuenta al incluir amortiguadores en las estructuras (Hanson y Soong, 2001).

2.5.1 Sistema estructural de los edificios

El sistema estructural que posea el edificio es un aspecto que se debe analizar al decidir colocar amortiguadores y más aún el tipo de amortiguadores a colocar.

Como se discutió en la sección 2.3, hay mecanismos específicos que activan y potencian la capacidad de disipación de energía del dispositivo, ellos son el desplazamiento relativo y la velocidad relativa entre los pisos del edificio. Estos mecanismos varían con el tipo estructural y con la altura del edificio, por lo tanto estas variables resultan de capital importancia a la hora de seleccionar el tipo de dispositivo, diseñarlo, determinar su posición y número dentro del edificio.

Por ejemplo, en el caso específico de los amortiguadores metálicos, además de la caracterización de los dispositivos resulta igualmente relevante definir la ubicación de los dispositivos dentro del sistema estructural. Es conocido que para magnificar el desempeño de estos disipadores particularmente son necesarios desplazamientos relativos sustanciales durante los terremotos, es decir, funcionan mejor en estructuras con alta flexibilidad. En la Figura 2.36 se presentan algunas alternativas de colocación propuestas por Skinner *et al.*, 1975. El caso de pórticos relativamente flexibles se muestra en la Figura 2.36 (a), en la que se recomienda colocarlos en las diagonales, principalmente en los niveles inferiores. Para sistemas donde se combinen muros y pórticos (Figura 2.36 (b)) los dispositivos pueden colocarse en la interfase de las dos estructuras, donde se supone existirán grandes desplazamientos relativos. Para estructuras esbeltas, o partes de estructuras (Figura 2.36 (c)), una ubicación deseable para los amortiguadores puede ser provista permitiendo un levantamiento transitorio bajo la acción de un terremoto. Los amortiguadores podrían estar conectados verticalmente entre el nivel de la base de la fundación y elementos especialmente diseñados para ello. Por último (Figura 2.36 (d)) para sistemas muy rígidos los amortiguadores

metálicos pueden colocarse en el nivel de base en combinación con un sistema de aislamiento.

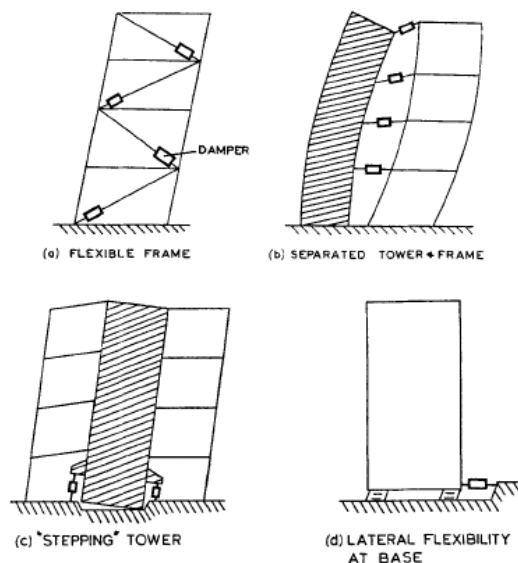


Figura 2.36. Sistemas estructurales y posible ubicación de los amortiguadores metálicos (Skinner *et al.*, 1975).

2.5.2 Edad de la edificación

A nivel mundial los disipadores de energía han resultado una opción atractiva para la readecuación de edificios existentes en lugar de otras alternativas como el aislamiento sísmico. La instalación de los amortiguadores se hace en la propia superestructura y resulta menos traumática para una edificación existente que colocar un sistema de aislamiento.

En estructuras nuevas se ha incorporado el uso de los disipadores en menor proporción que para estructuras existentes, ya que deben competir en costo con un buen diseño tradicional.

2.5.3 Arquitectura

Resulta obvio que colocar los disipadores de energía puede resultar un proceso invasivo, sobre todo para las estructuras existentes. La decisión sobre la posición y número de amortiguadores a colocar no sólo debe avocarse a la búsqueda de la seguridad estructural, sino que debe estar en sintonía con la imagen y el confort impartido por el diseño arquitectónico.

2.5.4 Efectos ambientales

La localización del edificio influye de manera directa en la selección del tipo de amortiguadores a colocar, ya que los efectos ambientales tales como: cambios bruscos de temperatura, alto grado de humedad atmosférica, corrosión y otros, pueden afectar el desempeño y durabilidad de los dispositivos, especialmente si estos son del tipo viscoelástico.

2.5.5 Costos de mantenimiento

El ciclo de vida es diferente para cada tipo de amortiguador. Para preservar el desempeño de los dispositivos es necesario el mantenimiento de los mismos. Es conocido que los amortiguadores viscoelásticos requieren un mantenimiento periódico para evitar la degradación del material que disipará la energía, por el contrario los amortiguadores metálicos tienen menores costos de mantenimiento ya que son menos vulnerables a los efectos ambientales y su desempeño es predecible.

2.6 ESTUDIOS ANALÍTICOS

2.6.1 Métodos de análisis

El análisis de las estructuras con amortiguadores, es un problema más bien complejo ya que la incorporación de estos dispositivos en las edificaciones

produce, entre otras cosas, un incremento significativo del amortiguamiento en cada modo, en comparación con las estructuras tradicionales. Esto ocurre particularmente en los modos superiores, donde para altos niveles de amortiguamiento se sobrepasa el valor de amortiguamiento crítico.

Por otra parte, la matriz de amortiguamiento del sistema combinado estructura-amortiguador introduce complicaciones para resolver la ecuación de movimiento, puesto que la presencia de los amortiguadores puede conducir al llamado amortiguamiento “no-clásico”. Esto aumenta considerablemente el volumen de cálculo numérico, ya que se debe trabajar con autovalores y autovectores complejos para obtener la respuesta “exacta” de la estructura. Sin embargo, por razones de comodidad y de simplificación, un cálculo aproximado de la respuesta del sistema estructura-amortiguadores suele hacerse mediante el uso de los métodos tradicionales de análisis para sistemas con amortiguamiento clásico (Hanson y Soong, 2001).

En torno a la precisión de utilizar los métodos de análisis tradicionales y al grado de exactitud en la respuesta obtenida, se han hecho varias investigaciones. Clough y Mojtahedi (1976) comparan por primera vez los métodos de análisis y cuantifican el error cometido al tratar un problema no-clásico como un problema clásico. Estos autores concluyen que el método de superposición modal estándar no puede ser empleado en sistemas con amortiguamiento “no-clásico” y que para obtener la respuesta exacta del sistema se debe integrar la ecuación de movimiento del mismo. Warburton y Soni (1977), plantean la comparación en función de las frecuencias modales de la estructura. Su estudio se limita al análisis de estructuras bajo el efecto de excitaciones armónicas, indicando la influencia que tiene la distribución del amortiguamiento sobre el error. El desarrollo del método de superposición modal para estructuras con amortiguadores es realizado por Veletsos y Ventura (1986), concluyendo que el tipo de excitación y las características de la estructura pueden conducir a errores significativos en las respuestas al suponer amortiguamiento clásico.

Prater y Singh (1986) cuantifican el grado de amortiguamiento no-clásico en una estructura y el error introducido al suponer amortiguamiento clásico. Más

recientemente, Greco y Santini (2002) comparan varios métodos de análisis, evaluando el error cometido en el cálculo del cortante basal. Sus conclusiones apuntan a la influencia en dicho error de la distribución espacial de las fuerzas aplicadas sobre la estructura y de la distribución del amortiguamiento.

2.6.2 Posición y número de amortiguadores

La respuesta sísmica de las estructuras con amortiguadores depende directamente de la localización, cantidad y características de los dispositivos seleccionados. Esto implica un análisis especial del problema, por lo que se ha despertado un interés por el estudio del efecto de estas variables, ya que una disminución en el número de dispositivos se traduce en un menor costo. En torno a este tema se han hecho algunas investigaciones que pueden resumirse como sigue:

Ashour y Hanson (1987) trabajaron sobre las estrategias de distribución de los amortiguadores en edificios de varios pisos modelados como pórticos de corte con propiedades idénticas en cada piso; la localización óptima de los dispositivos es lograda conforme a un patrón de distribución que maximiza el amortiguamiento del primer modo. La particularidad de este trabajo es que el modelado de las estructuras se hace como sistemas continuos y no como sistemas discretos, lo cual le añade cierta complejidad al problema.

Zhang y Soong (1992) proponen un proceso de optimización secuencial en el cual definen un índice de control de la estructura que indica cuál es la localización más adecuada. La idea general es colocar amortiguadores en los entrepisos donde se produzca el mayor desplazamiento relativo y velocidad relativa, sin embargo, las limitaciones de este trabajo son las siguientes: el estudio para comprobar la efectividad de la metodología se hace con un sólo tipo de edificio, sin considerar el efecto de variación del período de la estructura o la influencia del tipo estructural; no es concluyente en cuanto al efecto de la excitación, pues utiliza un sólo sismo para el análisis; la metodología propuesta es compleja, difícil de aplicar

rutinariamente. Las conclusiones indican que la ubicación de un determinado número de amortiguadores puede tener un efecto significativo en el nivel de reducción de la respuesta.

Takewaki (1997) tiene como objetivo proponer una metodología eficiente y sistemática para encontrar la localización óptima de los amortiguadores en una estructura, basada en la minimización de las funciones de transferencia. El autor señala como ventajas del procedimiento que no es un proceso iterativo y que se puede aplicar a cualquier sistema estructural. No obstante, tiene como restricción que el proceso presentado no toma en cuenta la constante de amortiguamiento "C" de los amortiguadores, lo cual puede estar alejado de la realidad, pues dicha constante está directamente relacionada con la energía disipada por el dispositivo y sus dimensiones.

En el trabajo de Shukla y Datta (1999) se valida la metodología propuesta por Zhang y Soong (1992). Las limitaciones observadas se enumeran a continuación: para el análisis se utilizan sólo dos excitaciones no especificadas, que aunque son de contenido frecuencial distinto esto no resulta suficiente para fijar una posición al respecto; el análisis contempla sólo edificios de gran altura con sistema estructural tipo pórtico. Sus conclusiones apuntan a lo siguiente: El esquema de ubicación óptima de los amortiguadores produce mayores reducciones en la respuesta de las estructuras que otros esquemas de ubicación, la ubicación óptima de los amortiguadores es sensible a la excitación aplicada.

López García (2001) simplifica el proceso de optimización mencionado anteriormente haciendo más sencillo el diseño e inclusión de los amortiguadores, sin embargo el estudio se circunscribe a estructuras cuyo modo fundamental es una línea recta con sistema tipo pórtico. No se considera la influencia del amortiguamiento no-clásico, pues se utiliza el método simplificado de análisis. Tampoco se fija posición en cuanto a si es mejor distribuir o concentrar el amortiguamiento en el edificio. No es concluyente en cuanto al efecto del sismo.

2.7 EXPERIENCIA NACIONAL

Existe una muy limitada experiencia en el uso y desarrollo de sistemas de control estructural en Venezuela, así como también en investigaciones asociadas ya que es un tema explorado tímidamente a pesar de que a nivel mundial ha sido muy estudiado. A continuación se hace referencia a los trabajos desarrollados en torno al tema de amortiguadores, algunos de ellos soporte de esta investigación.

Pérez Hernández (2000) estudió el uso de sistemas de disipación sísmica en viaductos ferroviarios, en especial los disipadores de tipo histerético y hace referencia a un caso real aplicado en el país (viaductos ferroviarios en el sistema Caracas-Tuy Medio). Se presentó el desarrollo del modelo matemático y experimental de los dispositivos utilizados, cuyos ensayos fueron llevados a cabo en una mesa vibratoria en Bérgamo (Italia).

En Tovar *et al.*, (2003) se estudia el efecto de la posición y número de amortiguadores en la respuesta de estructuras aporticadas para tres períodos distintos, sometidas a dos excitaciones sísmicas. Se obtienen las siguientes conclusiones: La ubicación del amortiguador en alguno de los diferentes entrepisos tiene mucha importancia en la respuesta estructural. La mejor ubicación es cuando el amortiguador se coloca en los entrepisos inferiores, especialmente el primero, ya que se obtiene mayor reducción en la respuesta; esto se cumple para todos los sistemas estudiados, independientemente de su período de vibración. No siempre un aumento en el número de amortiguadores conduce a una mayor reducción en la respuesta.

En Tovar *et al.*, (2004) se compara la respuesta dinámica de una estructura aporticada regular con distintas distribuciones y cantidades de amortiguamiento, obtenida al realizar un análisis exacto por integración numérica, con la obtenida mediante el método de superposición modal suponiendo amortiguamiento clásico. Las conclusiones indican que la posición y el número de amortiguadores tienen gran influencia en el error cometido al calcular las respuestas del sistema estudiado, si éste tiene amortiguamiento no-clásico. El colocar más de un amortiguador y distribuirlos uniformemente garantiza la aproximación al caso de

amortiguamiento clásico, por lo que el error disminuye bajo la excitación considerada. La cantidad de amortiguamiento influye sobre la magnitud del error, de esta manera se tiene que el error aumenta proporcionalmente al valor de la constante de amortiguamiento “C” de los dispositivos.

En Tovar y López (2004) se evalúa la influencia que tiene la cantidad y distribución de amortiguadores en la respuesta de una estructura aporticada regular con distintas distribuciones de amortiguamiento, sometida a dos excitaciones sísmicas. Se concluye para los sistemas estudiados, que un aumento en el número de amortiguadores no necesariamente conduce al mayor beneficio para la estructura en términos de la reducción de la respuesta en todos los entrepisos. Con tres amortiguadores se consigue un mejor provecho para todos los pisos de la estructura. La mejor distribución del amortiguamiento es aquella que contempla la colocación de un amortiguador por piso.

En Tovar y López (2006, 2007) se estudia la influencia que la distribución de los amortiguadores en la respuesta de una estructura aporticada y una estructura de muros, sometida a una familia de cinco sismos. Se concluye, que la respuesta de las estructuras con amortiguadores es sensible al periodo de vibración, al sistema estructural empleado y a la distribución de los dispositivos.

2.8 NORMATIVA

En cuanto a la normativa disponible para el diseño e implementación de amortiguadores en Venezuela no se cuenta con ningún lineamiento específico. En la norma vigente COVENIN-MINDUR “Edificaciones Sismorresistentes” 1756-2001 la aplicación de los dispositivos disipadores de energía se aborda en el Capítulo 8, sección 8.7 titulada: “Dispositivos para reducir la respuesta sísmica”. Dicha disposición dice textualmente: “Se autoriza el empleo de sistemas de control pasivo debidamente justificados, analítica y experimentalmente para reducir la respuesta sísmica, tales como los sistemas de aislamiento sísmico y amortiguamiento” (COVENIN-MINDUR 1756-2001).

Actualmente, en Estados Unidos existen algunas organizaciones que se han dado a la tarea de reglamentar el diseño de estructuras con sistemas de control pasivo. Entre ellas están: Federal Emergency Management Administration (FEMA), National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP), Structural Engineers Association of Northern California (SEAONC), Applied Technology Council (ATC). La norma FEMA 450 (2003) incluye por primera vez un capítulo especialmente dedicado a las estructuras con sistemas de amortiguamiento, dicho capítulo es el número 15 y se titula: "Structures with damping systems" y básicamente trata lo siguiente:

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

A pesar de los esfuerzos anteriormente expuestos es evidente que todavía existe una carencia, incluso a nivel mundial, con respecto a los instrumentos normativos para el diseño de disipadores de energía y el diseño de estructuras que contengan estos sistemas. Básicamente debido a que esta es un área de investigación aún vigente, en la que quedan muchas interrogantes por responder.

2.9 CONTRIBUCIÓN DE ESTA TESIS AL CONOCIMIENTO PRESENTE

A pesar de la existencia de una gran cantidad de estudios analíticos y experimentales acerca del comportamiento de las estructuras con amortiguadores, permanecen todavía algunas incertidumbres en torno al tema. Esta investigación tiene como propósito contribuir a clarificar algunos de esos puntos, tales como: el efecto de la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de estructuras de baja altura, el efecto del sismo en la respuesta de estructuras de baja altura con amortiguadores, factores que

afectan la validez de los métodos de análisis tradicionales en estructuras con amortiguadores.

Por otro lado, en cuanto al diseño de amortiguadores metálicos, se tiene certeza de que la adaptación de dispositivos existentes y las nuevas propuestas son áreas de investigación que se mantienen activas hoy en día. Esta investigación también tiene como finalidad desarrollar una nueva propuesta de amortiguador metálico para edificaciones existentes de baja altura, que ofrezca bondades como: proceso disipativo estable, gran capacidad de disipación de energía, disipación de energía para desplazamientos muy pequeños, geometría sencilla y versátil, fácil construcción y reemplazo y mínimo costo de mantenimiento.

Capítulo 3

Métodos de análisis

3.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo muestra un breve resumen del estado del arte sobre los métodos de análisis utilizados para obtener la respuesta de las estructuras con amortiguamiento adicional. De manera sucinta se comienza explicando el método de superposición modal estándar, para luego exponer un punto clave en el análisis de estructuras con amortiguadores, se trata pues de diferenciar entre lo que significa tener un sistema con amortiguamiento clásico y un sistema con amortiguamiento no-clásico, asimismo se explican cuales son las implicaciones de esta particularidad. Finalmente de forma sintética se abordan los métodos más utilizados para el análisis de estructuras con amortiguamiento no-clásico.

3.2 MÉTODO DE SUPERPOSICIÓN MODAL ESTÁNDAR

Con base a la información expuesta en los trabajos de Clough y Mojtahedi (1976), y de Goel (2001), a continuación se presenta un resumen del método de superposición modal.

La ecuación del movimiento de un sistema plano de N grados de libertad dinámicos sujeto a una componente sísmica traslacional es:

$$M \cdot \ddot{u}(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K \cdot u(t) = -M \cdot r \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (3.1)$$

Donde \mathbf{M} , \mathbf{C} y \mathbf{K} representan las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, de dimensión $N \times N$, si se supone que el sistema es lineal estas matrices se consideran constantes.

$\mathbf{u}(t)$ es el vector de desplazamientos relativos a la base de la estructura, \mathbf{r} es un vector unitario de dimensión $N \times 1$ y $\ddot{u}_g(t)$ es la aceleración del terreno.

Los modos de vibración y frecuencias de la estructura no amortiguada se obtienen al resolver el siguiente problema de autovalores y autovectores:

$$(\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M})\Phi = 0 \quad (3.2)$$

En el cual Φ representa la matriz modal, cuyas N columnas (ϕ_n) son los N modos de vibración y λ es una matriz diagonal que contiene las N frecuencias elevadas al cuadrado (ω_n^2). Todos los valores de ω_n y ϕ_n son reales. Luego de normalizar con respecto a la matriz de masa, las formas modales satisfacen las siguientes relaciones de ortogonalidad:

$$\Phi^t \cdot \mathbf{M} \cdot \Phi = \mathbf{I} \quad (3.3)$$

$$\Phi^t \cdot \mathbf{K} \cdot \Phi = \lambda \quad (3.4)$$

Dado que los modos de vibración son independientes, la respuesta dinámica se puede expresar en términos de las coordenadas modales $q_n(t)$:

$$\mathbf{u}_n(t) = \phi_n \cdot q_n(t) \quad (3.5)$$

La Ecuación (3.1) se puede replantear en función de dichas coordenadas, quedando una ecuación matricial de la forma:

$$\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}^* \cdot \dot{\mathbf{q}}(t) + \lambda \cdot \mathbf{q}(t) = -\Phi^t \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{r} \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (3.6)$$

La cual contiene N ecuaciones diferenciales desacopladas, donde la matriz de amortiguamiento generalizada \mathbf{C}^* está dada por:

$$\mathbf{C}^* = \Phi^t \cdot \mathbf{C} \cdot \Phi \quad (3.7)$$

Finalmente la respuesta total se calcula como la superposición de las respuestas en cada modo (dadas por la ecuación 3.5) resultando:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n \cdot q_n(t) \quad (3.8)$$

3.3 AMORTIGUAMIENTO CLÁSICO Y NO-CLÁSICO

El cálculo de la respuesta de las estructuras lineales sometidas a excitaciones sísmicas generalmente se hace por medio del método de superposición modal estándar, para lo cual es imprescindible suponer que el amortiguamiento de la estructura no causa acoplamiento de las ecuaciones modales del sistema. Por esta razón el amortiguamiento no se define en las coordenadas originales, sino que se representa por un amortiguamiento viscoso equivalente separado de cada componente modal de la respuesta.

Para que esta suposición sea válida, es necesario que exista un grado de homogeneidad razonable entre los mecanismos de disipación de energía de la estructura; un sistema con estas características se dice que tiene **amortiguamiento clásico**. En dicho sistema se verifica que la matriz de amortiguamiento \mathbf{C} satisface condiciones de ortogonalidad equivalentes a las mostradas en las Ecuaciones 3.3 y 3.4, por lo tanto la matriz de amortiguamiento generalizada \mathbf{C}^* es diagonal.

Cuando se presentan variaciones drásticas en los mecanismos de disipación de energía de las diferentes partes de la estructura, durante la vibración libre se produce un patrón de fuerzas de amortiguamiento que difiere notablemente del

patrón de fuerzas elásticas e inerciales. Un sistema con estas características se dice que tiene **amortiguamiento no-clásico** (Clough y Mojtahedi 1976).

En los sistemas con amortiguamiento no-clásico se produce un acoplamiento entre las coordenadas modales y éste se manifiesta a través de la matriz de amortiguamiento generalizada \mathbf{C}^* , la cual resulta ser una matriz llena, **no diagonal**. Esta situación inhabilita la aplicación del método de superposición modal estándar pues las ecuaciones de movimiento se encuentran acopladas.

Algunas situaciones donde se puede producir el amortiguamiento no-clásico son las siguientes:

- Interacción suelo-estructura
- Inclusión de sistemas de aislamiento sísmico
- Inclusión de sistemas de disipación de energía

Cuando se incluyen sistemas de disipación de energía, el grado de amortiguamiento no-clásico en la estructura depende de la distribución de los dispositivos en el sistema (Greco y Santini 2002).

3.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA SISTEMAS CON AMORTIGUAMIENTO NO-CLÁSICO

Seguidamente se presentan algunos de los métodos más utilizados para calcular la respuesta estructural de sistemas con amortiguamiento no-clásico.

3.4.1 Integración directa

Un método elemental para el análisis de una estructura con amortiguamiento no-clásico es la integración directa de la ecuación de movimiento del sistema (Ecuación 3.1). Esta metodología es válida para analizar sistemas lineales y no-lineales, y en ella no se toman en cuenta los modos de vibración de la estructura. Aplicar éste método para obtener la respuesta de estructuras sometidas a

excitaciones sísmicas supone el manejo de herramientas computacionales eficaces, ya que se requiere resolver un sistema de N ecuaciones diferenciales simultáneamente.

3.4.2 Método de superposición modal con formas modales complejas

Las ecuaciones modales de movimiento de una estructura con amortiguamiento no-clásico pueden ser desacopladas si se hace la transformación que se describe a continuación (Veletsos y Ventura 1986, Goel 2001).

En primer lugar se reduce la Ecuación 3.1 a un sistema de ecuaciones de primer orden:

$$A \cdot \dot{z}(t) + B \cdot z(t) = Y(t) \quad (3.9)$$

Donde $z(t)$ y $Y(t)$ son vectores de dimensión $2N \times 1$ dados por:

$$z(t) = \begin{bmatrix} \dot{u}(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad Y(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -Mr\ddot{u}_g(t) \end{bmatrix} \quad (3.10 \text{ a, b})$$

A y **B** son matrices de dimensión $2N \times 2N$, las cuales se expresan como:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad (3.11 \text{ a, b})$$

0 es la matriz nula de orden $N \times N$. Los autovalores y autovectores son obtenidos al resolver el sistema de $2N$ ecuaciones homogéneas:

$$(B + \lambda^* \cdot A) \cdot \Phi^* = 0 \quad (3.12)$$

Resultando N autovalores λ_n^* y N autovectores ϕ_n^* complejos, donde el asterisco denota que las propiedades pertenecen al sistema amortiguado. Los autovalores entonces se presentan en pares complejos conjugados de la forma:

$$\lambda_n^* = -\xi_n^* \cdot \omega_n^* - i \omega_n^* \cdot \sqrt{1 - (\xi_n^*)^2} \quad \text{y} \quad \tilde{\lambda}_n^* = -\xi_n^* \cdot \omega_n^* + i \cdot \omega_n^* \cdot \sqrt{1 - (\xi_n^*)^2} \quad (3.13 \text{ a, b})$$

ω_n^* y ξ_n^* representan la pseudo-frecuencia natural de vibración y el amortiguamiento aparente del modo n, respectivamente, dados por:

$$\omega_n^* = \sqrt{\text{Re}^2(\lambda_n^*) + \text{Im}^2(\lambda_n^*)} \quad \xi_n^* = \frac{-\text{Re}(\lambda_n^*)}{\omega_n^*} \quad (3.14 \text{ a, b})$$

Utilizando los autovalores complejos, la Ecuación 3.9 se puede transformar en un conjunto de 2N ecuaciones diferenciales desacopladas de primer orden, expresadas en términos de las coordenadas modales $\mathbf{q}^*(t)$:

$$\dot{\mathbf{q}}^*(t) + \lambda_n^* \cdot \mathbf{q}^*(t) = \Gamma_n^* , \text{ con } n = 1 \text{ a } 2N \quad (3.15)$$

$$\Gamma_n^* = \frac{\phi_n^{*t} \cdot \mathbf{Y}(t)}{\phi_n^{*t} \cdot \mathbf{A} \cdot \phi_n^*} \quad (3.16)$$

Finalmente la respuesta total se calcula como la superposición de las respuestas en cada modo resultando:

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^{2N} \phi_n^* \cdot \mathbf{q}_n^*(t) \quad (3.17)$$

Aplicar este método tiene la ventaja de que la respuesta de la estructura puede ser obtenida utilizando un relativamente pequeño número de modos, al igual que en el método de superposición modal estándar para los sistemas con amortiguamiento clásico. Sin embargo, el hecho de tener que manejar números complejos ya exige la disposición de herramientas computacionales competentes.

3.4.3 Método simplificado

Esta metodología ha sido ampliamente utilizada principalmente en el ámbito profesional y comercial. Consiste en tratar el sistema con amortiguamiento no-

clásico como si tuviese amortiguamiento clásico, aplicando el método de superposición modal estándar empleando las frecuencias y modos de vibración del sistema no-amortiguado. Las ecuaciones modales de movimiento se suponen desacopladas y a cada una de ellas se le asigna un valor **simplificado** de amortiguamiento modal (ξ_n), determinado con la misma expresión utilizada para los sistemas con amortiguamiento clásico:

$$\xi_n = \frac{C_n^*}{2\omega_n \cdot \phi_n^t \cdot M \cdot \phi_n} \quad (3.18)$$

Los elementos fuera de la diagonal de la matriz de amortiguamiento generalizada \mathbf{C}^* son ignorados.

Aún cuando este método es sencillo no es confiable, ya que se ha demostrado que introduce errores significativos en el cálculo de la respuesta y propiedades dinámicas de la estructuras con amortiguamiento no-clásico (Greco y Santini 2002).

Más adelante se realiza un estudio comparativo entre las respuestas de estructuras con amortiguadores obtenidas con el método de Integración directa y las obtenidas con este método. De esta manera se podrá establecer una posición concluyente en cuanto a la confiabilidad del método simplificado.

3.4.4 Método de Ritz

Para sistemas con amortiguamiento no-clásico, aplicar el método de Ritz implica la integración directa de algunas ecuaciones modales acopladas del sistema (Greco y Santini 2002). La hipótesis básica es que el vector de desplazamientos $\mathbf{u}(t)$ se puede expresar como una combinación lineal de un grupo reducido de formas modales ϕ_n de amplitud $q_n(t)$.

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) = \hat{\Phi} \cdot \mathbf{q}(t) \quad (3.19)$$

Donde n es menor que N . Las columnas de la matriz $\hat{\Phi}$ de orden $N \times n$ son los vectores de Ritz, ellos deben ser linealmente independientes. Si se introduce la transformación dada por la Ecuación 3.19 en la Ecuación 3.1, se tendrá un conjunto de n ecuaciones diferenciales:

$$\hat{M} \cdot \ddot{q}(t) + \hat{C} \cdot \dot{q}(t) + \hat{K} \cdot q(t) = -\hat{\Phi}^t \cdot M \cdot r \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (3.20)$$

Donde:

$$\hat{M} = \hat{\Phi}^t \cdot M \cdot \hat{\Phi} \quad \hat{C} = \hat{\Phi}^t \cdot C \cdot \hat{\Phi} \quad \hat{K} = \hat{\Phi}^t \cdot K \cdot \hat{\Phi} \quad (3.21 \text{ a, b, c})$$

Donde la matriz C no es diagonal. El conjunto de ecuaciones 3.20 están acopladas, por lo que la solución del problema se obtiene integrando directamente cada ecuación. La exactitud de la respuesta depende del conjunto de vectores Ritz seleccionado.

Capítulo 4

Efecto de la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta sísmica

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudia en forma analítica el efecto de la posición, número y distribución de amortiguadores viscosos en la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de edificios linealmente elásticos de baja altura. Se investigan dos tipos de sistemas estructurales sometidos a una familia de sismos, considerando siempre amortiguamiento no-clásico para su análisis.

Para ello se definen en primer lugar los sistemas investigados, asimismo se presentan las distribuciones de amortiguadores adoptadas para realizar el estudio. Los resultados se presentan en términos de la respuesta máxima obtenida con relación al periodo de vibración de la estructura, el sistema resistente y la colocación de amortiguadores analizada, para todos los sismos considerados.

Adicionalmente, se presenta un estudio somero sobre el efecto del sismo en la respuesta de las estructuras con amortiguadores.

4.2 SISTEMAS Y PROPIEDADES

Se definen dos sistemas, el primero es un edificio aporricado de cinco pisos, en el que se han restringido las deformaciones axiales y por corte. El segundo es un edificio compuesto por muros, también de cinco pisos, con restricción de las deformaciones axiales y por flexión. En la Figura 4.1 se aprecian gráficamente los sistemas estudiados.

Para realizar el estudio comparativo entre los dos sistemas estructurales se mantienen constantes algunas de las variables involucradas, tales como: el período fundamental de vibración, la altura del edificio, el amortiguamiento propio de la estructura (ξ) y el amortiguamiento adicional.

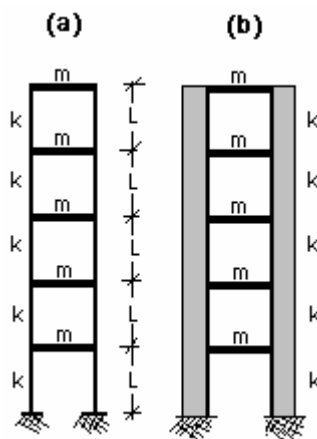


Figura 4.1. Sistemas estudiados, a) Sistema aporricado, b) Sistema de muros.

Cada sistema tiene masas y rigideces iguales en todos los niveles y se estudia para dos valores de período fundamental (T), uno corto de 0.20 segundos y uno largo de 2.00 segundos. En total se analizan cuatro edificios cuyas propiedades se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Propiedades dinámicas de los sistemas estudiados.

Sistema Estructural	T (seg.)	m (kgfseg ² /cm)	k (kgf/cm)	ξ (%)
Pórtico	0.20	16.008	195080	5.00
	2.00	1600.8	195080	5.00
Muro	0.20	53.816	655500	5.00
	2.00	5381.6	655500	5.00

4.3 MOVIMIENTOS SÍSMICOS

El movimiento sísmico puede introducir alteraciones significativas en los resultados, ya que aunque no hay una posición concluyente en cuanto a la influencia del sismo en la respuesta de las estructuras con amortiguadores, algunos estudios reportan que excitaciones con alto contenido frecuencial o con pulsos de larga duración pueden modificar considerablemente el efecto de los dispositivos sobre el sistema (Shukla y Datta 1999). En la presente investigación todas las estructuras se someten a una familia de diez acelerogramas, seleccionados con distintos niveles de velocidad para los períodos considerados, a fin de estudiar la influencia del sismo sobre la respuesta de las estructuras con amortiguadores. En la Tabla 4.2 se muestran las características más relevantes de los sismos elegidos.

Trabajar con diez sismos permite someter a las estructuras con amortiguadores a una amplia gama de velocidades, bajas, medias y altas, e investigar el efecto que tienen en la respuesta. Cabe destacar que se toma en cuenta el espectro de velocidades y no el de aceleraciones, debido a que el estudio contempla la inclusión de amortiguadores viscosos los cuales son dependientes de la velocidad. En las Figuras 4.2 y 4.3 se pueden observar los espectros de velocidades de cada uno de los sismos anteriores para los períodos considerados de las estructuras.

Tabla 4.2. Movimientos Sísmicos: propiedades.

Nombre	Fecha	Componente	Aceleración Máxima (g)	Fuente	Medio
El Centro	18/05/1940	N-S	0.30	Cercana	Suelo
Chile	03/03/1985	Principal mayor	0.19	Lejana	Suelo
Kobe	17/01/1995	Principal mayor	0.84	Cercana	Roca
Loma Prieta	18/09/1989	Principal mayor	0.54	Cercana	Suelo
Michoacán	19/09/1985	Principal mayor	0.13	Lejana	Suelo
Miyagi-Oki	12/06/1978	Principal mayor	0.21	Lejana	Suelo
Northridge	17/01/1994	Principal mayor	0.25	Lejana	Suelo
San Fernando	09/02/1971	Principal mayor	1.17	Cercana	Roca
Taft	21/07/1952	N21E	0.16	Lejana	Suelo
Turquía	17/08/1999	Principal mayor	0.22	Cercana	Suelo

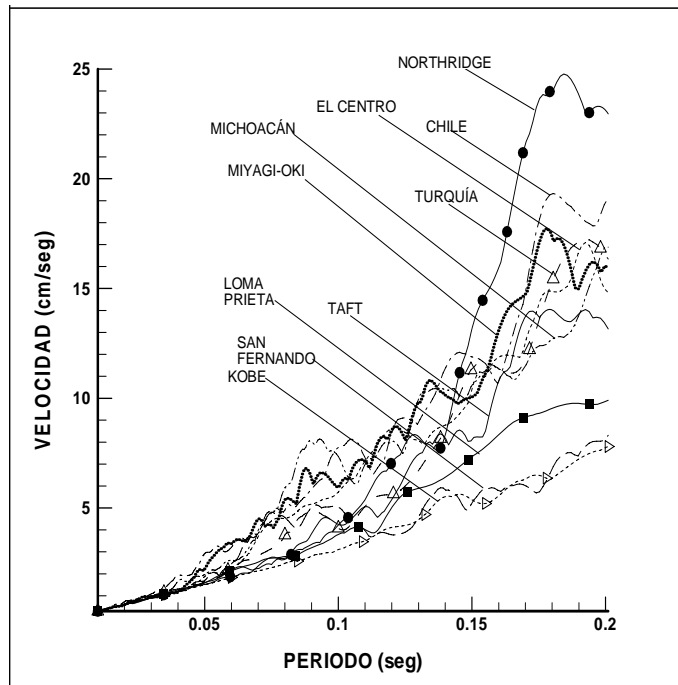


Figura 4.2 Espectro de velocidades para la familia de sismos utilizada, hasta $T=0.20$ seg.

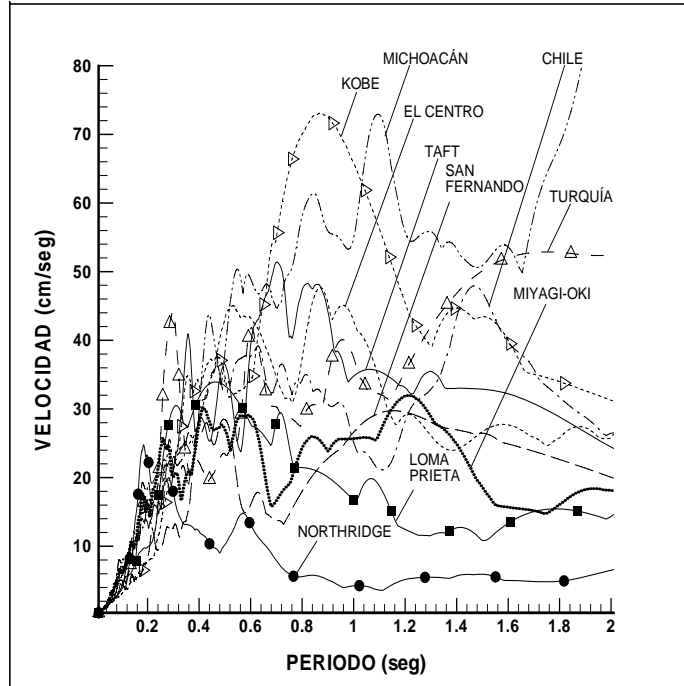


Figura 4.3 Espectro de velocidades para la familia de sismos utilizada, hasta $T = 2.00$ seg.

4.4 EFECTO DE LA POSICIÓN, NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS AMORTIGUADORES

Para evaluar el efecto que tiene la posición de los amortiguadores en la respuesta de las estructuras descritas anteriormente, se definen cinco casos de estudio en los que se coloca un solo amortiguador en el sistema y se va variando su ubicación dentro del mismo, asociada a su colocación en cada piso del edificio como se observa en la Figura 4.4, la constante C del amortiguador es la misma en cada caso. Asimismo, para apreciar el efecto del número de amortiguadores en la estructura, en la Figura 4.5 se definen otros cinco casos donde se varía la cantidad de dispositivos desde uno hasta cinco. Finalmente, para estudiar la influencia de la distribución de los amortiguadores se precisan varios casos con tres y cinco dispositivos modificando su disposición en el sistema, como puede observarse en las Figuras 4.6 y 4.7.

Los casos definidos son exactamente iguales tanto para las estructuras aporticadas como para las estructuras de muros. El Caso 0 corresponde a la estructura sin amortiguadores, es decir, es el caso estándar. Cada amortiguador forma un ángulo de 45° con la horizontal y es de tipo viscoso en todos los casos.

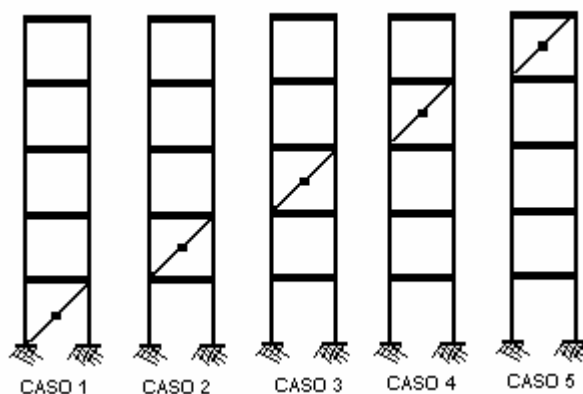


Figura 4.4. Casos de estudio para evaluar el efecto de la posición de un amortiguador.

En los casos donde varía el número de amortiguadores la distribución comienza a partir de la colocación de un dispositivo en el primer piso, luego se van colocando consecutivamente amortiguadores en los entrepisos superiores hasta completar todos los entrepisos. Es importante aclarar que la suma de las constantes C de los amortiguadores es la misma en cada caso y además resulta ser igual a la cantidad de amortiguamiento total introducida en los casos con un amortiguador.

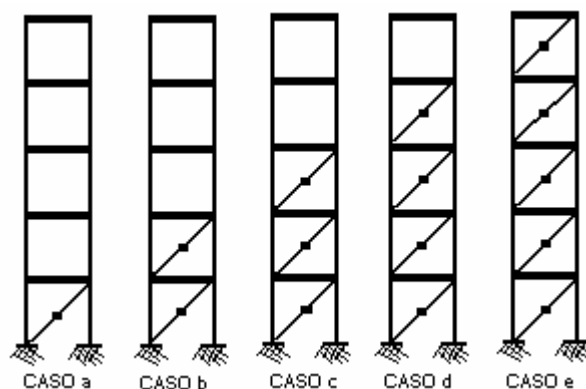


Figura 4.5. Casos de estudio para evaluar el efecto del número de amortiguadores.

Cuando se utilizan tres amortiguadores se consideran seis casos de estudio en los cuales la guía de distribución comienza a partir de la concentración de todo el amortiguamiento en el primer piso del edificio y de allí se va distribuyendo a los pisos superiores. En este caso la suma de las constantes C de los amortiguadores también es la misma en cada caso y además resulta ser igual a la cantidad de amortiguamiento total introducida en los casos con uno y con varios amortiguadores.

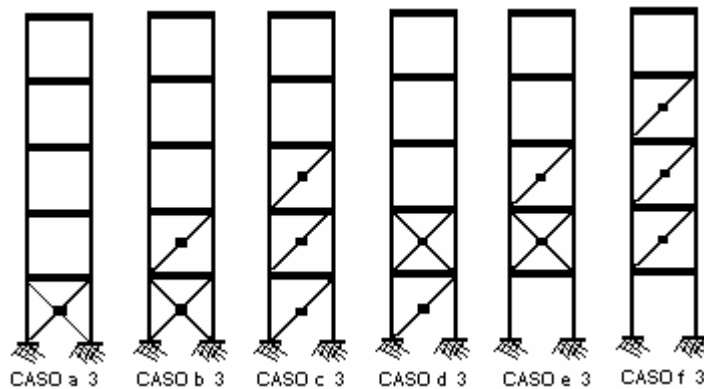


Figura 4.6. Casos de estudio para evaluar el efecto de la distribución de tres amortiguadores.

En las estructuras con cinco amortiguadores se definen también seis casos para estudiar el efecto de la distribución del amortiguamiento (ver Figura 4.7), el patrón de distribución es contrario al de los casos definidos anteriormente, es decir, se comienza con una estructura que tiene un amortiguador en todos sus pisos y luego van descendiendo hacia el primer piso. Igualmente la suma de las constantes C de los amortiguadores es la misma en cada caso y es igual a la cantidad de amortiguamiento total introducida en los casos con uno, varios y tres amortiguadores.

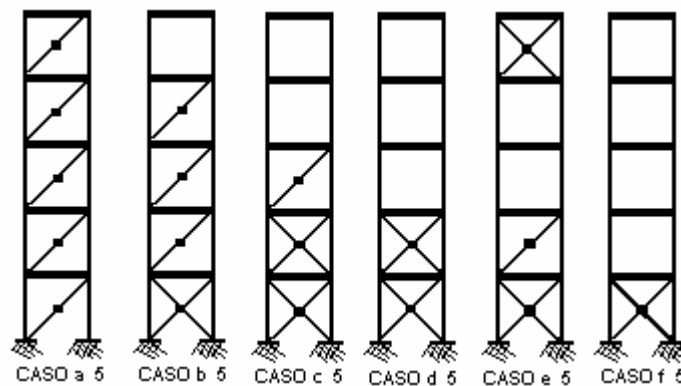


Figura 4.7. Casos de estudio para evaluar el efecto de la distribución de cinco amortiguadores.

4.5 CÁLCULO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL Y DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS

Al efectuar el análisis estructural se supone que la estructura y los amortiguadores tienen comportamiento lineal, sin embargo, el estudio se realiza considerando amortiguamiento no-clásico para todos los casos con amortiguadores.

Se utilizan dos métodos de análisis, el de integración directa, comentado en el apartado 3.3.1, para hacer una estimación precisa de la respuesta estructural. Y el método simplificado, descrito en la sección 3.3.3, que actualmente se sigue utilizando en los programas comerciales de análisis estructural.

En las próximas secciones sólo se presentarán los resultados obtenidos con el método de integración directa, en el capítulo siguiente se efectuará una comparación entre las respuestas obtenidas con ambos métodos.

La respuesta en cualquier caso es determinada en toda la duración de los sismos seleccionados y se presenta en términos de las máximas derivas de entrepiso obtenidas. La integración de la Ecuación 3.1 se realiza empleando la herramienta Simulink del programa MATLAB (MATLAB, 2004), y el método simplificado se lleva a cabo a través del software SAP2000 (SAP2000, 1976-2007).

La matriz de amortiguamiento para cada sistema se obtiene a través del siguiente ensamblaje (Chopra 2002):

$$C = C_E + C_A \quad C_E = M \left[\sum_{n=1}^N \frac{2\xi_n \omega_n}{M_n} \phi_n \phi_n^t \right] M \quad (4.1 \text{ a, b})$$

Donde C_E es la matriz de amortiguamiento de la estructura sin amortiguamiento adicional, ξ_n , ω_n y ϕ_n representan el amortiguamiento, la frecuencia de vibración, y el vector de desplazamientos en el modo n , respectivamente, todos referidos a la estructura sin amortiguamiento adicional.

C_A es la matriz de amortiguamiento debida a la presencia de los amortiguadores viscosos. La matriz de rigidez de las estructuras analizadas se calculó sin tomar en cuenta la rigidez que aportan los amortiguadores.

La constante “C” del amortiguador se determina mediante un proceso iterativo de cálculo usando las Ecuaciones 3.9 a 3.14, hasta alcanzar el mayor valor posible de amortiguamiento ξ_n en el modo fundamental de la estructura aporticada con un dispositivo en el primer piso. Para esta configuración no se pueden conseguir valores superiores al 13%. En las estructuras de muros se decidió colocar las mismas constantes de amortiguamiento “C” que en las estructuras aporticadas, con la finalidad de reducir las variaciones que puedan alterar el estudio comparativo de ambos sistemas.

En la tabla 4.3 se pueden observar las cantidades de amortiguamiento utilizadas para éste estudio y calculadas del modo anteriormente descrito.

El cálculo de las propiedades dinámicas de cada una de las estructuras analizadas se efectúa a través de las Ecuaciones 3.9 a 3.14, mediante las cuales se obtienen la pseudo-frecuencia de vibración ω_n y el amortiguamiento modal ξ_n .

Tabla 4.3. Constantes de amortiguamiento.

T (seg.)	Nº de amortiguadores	C (kgfseg/cm)
0.20	1	24838.40
	2	12419.20
	3	8279.47
	4	6209.60
	5	4967.68
2.00	1	248384.00
	2	124192.00
	3	82794.70
	4	62096.00
	5	49676.80

Adicionalmente, se calculan la frecuencia de vibración ω_n y el período de vibración T_n para el modo n de la siguiente manera:

$$\omega_n = \omega_n^* \sqrt{1 - \xi_n^{*2}} \qquad T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \qquad (4.2 \text{ a, b})$$

4.6 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Se definen a continuación dos parámetros adimensionales para cuantificar la reducción en la respuesta que experimenta la estructura al incluir los amortiguadores. El primero es el parámetro β_i , que se obtiene a través del cociente entre la respuesta máxima de la estructura con amortiguadores y la respuesta máxima correspondiente a la estructura estándar (Caso 0). Este parámetro evalúa el beneficio que producen los amortiguadores en cada entrepiso i , puede decirse que es una medida del beneficio local que logran los dispositivos en la estructura. Así pues β_i queda definido como:

$$\beta_i = \frac{\Delta_i^k}{\Delta_i^0} \qquad (5.1)$$

El parámetro β_p evalúa el beneficio global de los amortiguadores sobre la estructura, ya que se trata del valor promedio de β para todo el edificio.

$$\beta_p = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^k}{\Delta_i^0} \right) * \frac{1}{n} \qquad (5.2)$$

Donde n es el número de pisos, Δ_i^k es la deriva del entrepiso i para el caso de estudio k y Δ_i es la deriva del entrepiso i para el Caso 0.

Nótese que un valor de β cercano a uno indica una menor reducción de la respuesta de la estructura, mientras que un valor cercano a cero indica una reducción mayor.

4.7 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados se presentan de acuerdo a las siguientes variables: el número de amortiguadores utilizados en la estructura, según los casos de estudio definidos anteriormente, el período fundamental y el tipo estructural. Se muestran los resultados relativos a la respuesta máxima y a las propiedades dinámicas de las estructuras analizadas.

Para representar el efecto global sobre la respuesta máxima del edificio, se grafica el parámetro β_p (BETA (promedio)) contra los casos investigados. Se presentan los valores obtenidos para cada uno de los acelerogramas y a su vez se resalta el valor promedio, éste último será el que se tome en cuenta para la discusión. Para evaluar el efecto local sobre la respuesta en cada entrepiso de la estructura, se grafica el parámetro β_i (BETA (i)) contra los entrepisos de la estructura para algunos casos seleccionados que muestran variaciones significativas. Se muestra sólo el valor promedio por piso de todos los acelerogramas.

Para la discusión correspondiente a las propiedades dinámicas se dará preferencia al efecto sobre el período fundamental y sobre el amortiguamiento en los dos primeros modos, ya que estos son los que gobiernan la respuesta de las estructuras investigadas. Finalmente se razonará sobre el efecto del sismo sobre la respuesta obtenida en estructuras con amortiguadores con base a los resultados presentados.

4.8 EFECTO DE LA POSICIÓN DE UN AMORTIGUADOR

4.8.1 Efecto en la repuesta máxima

En la Figura 4.8 se grafican los valores de β_p contra cada uno de los casos investigados para las estructuras aporticadas con un solo amortiguador (ver Figura 4.4), se muestran los valores calculados para cada sismo resaltándose el valor medio entre ellos. Se observa que para el sistema con $T = 0.20$ seg., el mayor

beneficio para la estructura, es decir, la mayor reducción en las derivas de entrepiso en término medio (38 %) se logra cuando el amortiguador se ubica en el primer entrepiso con un valor de β_p alrededor de 0.62, por otro lado se aprecia como al colocar el amortiguador en los entrepisos superiores se obtiene una menor reducción en la respuesta y en el último entrepiso prácticamente no tiene efecto sobre el sistema, el valor de β_p es muy cercano a uno, alrededor de 0.90, en consecuencia apenas se logra una reducción cerca del 10%. Los valores de β_p calculados para las respuestas obtenidas con los acelerogramas “Loma Prieta”, “Kobe” y “Michoacán” no fueron tomados en cuenta al determinar el valor medio, debido a que presentaron diferencias alrededor del 20% con el resto de las excitaciones empleadas, el cual se califica como un porcentaje significativo, por lo tanto dichos valores se consideran fuera de la tendencia de comportamiento.

Para el sistema con $T = 2.00$ seg. (Ver Figura 4.8), se nota que en término medio se obtiene la mayor reducción de la respuesta cuando el amortiguador se coloca en el primer y tercer entrepiso, con valores de β_p alrededor de 0.82, lo que se traduce en un descenso cercano al 18%. Además, se aprecia que la reducción obtenida para este sistema es menor que la observada para la estructura con período $T = 0.20$ seg., hecho que permite inferir que la repuesta de la estructura con un amortiguador es sensible al período de vibración. Para estos sistemas se encontró que los valores de β_p determinados para las respuestas obtenidas con el acelerograma “Michoacán” presentaron diferencias alrededor del 20% con el resto de las excitaciones empleadas, razón por la que no fueron tomados en cuenta al determinar el valor medio.

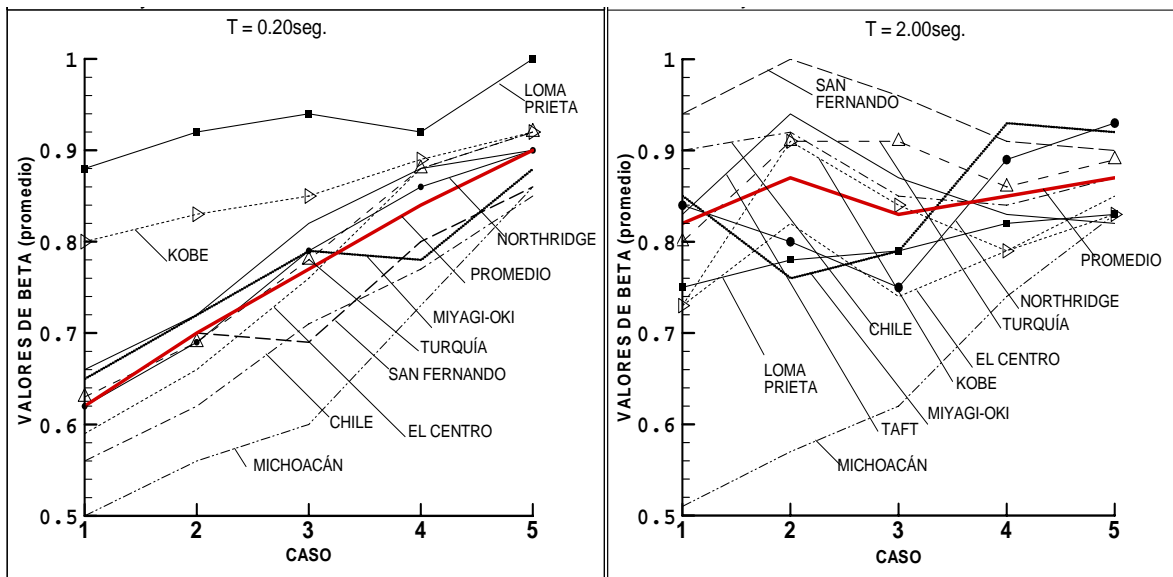


Figura 4.8. Efecto de la posición de un amortiguador: estructuras aporcionadas.

En la Figura 4.9 se aprecian los resultados obtenidos para la estructura de muros con un solo amortiguador. Obsérvese que para el sistema con $T = 0.20$ seg., se obtiene un valor de β_p en torno a 0.65 cuando el amortiguador se ubica en el primer entrepiso, este valor representa la mayor reducción en las derivas de entrepiso en término medio (35 %), asimismo se puede notar como al colocar el amortiguador en los entrepisos superiores se obtiene una menor reducción en la respuesta y en el último entrepiso tiene muy poco efecto sobre el sistema, con un valor de β_p de 0.94 apenas se logra una reducción del orden de 6%. Los valores de β_p determinados para las respuestas obtenidas con los acelerogramas “Loma Prieta”, “Kobe” y “San Fernando” no fueron tomados en cuenta para el valor medio, ya que se observaron diferencias alrededor del 20% en término medio con el resto de los valores obtenidos, por lo tanto dichos valores se consideraron fuera de la tendencia de comportamiento.

Para el sistema con $T = 2.00$ seg., en término medio se consigue la mayor reducción de la respuesta cuando el amortiguador se coloca en el primer y cuarto entrepiso, 23% y 17% respectivamente. En este caso los valores de β_p correspondientes al acelerograma “Michoacán” se consideraron fuera de la

tendencia de comportamiento y no se tomaron en cuenta para calcular el valor medio.

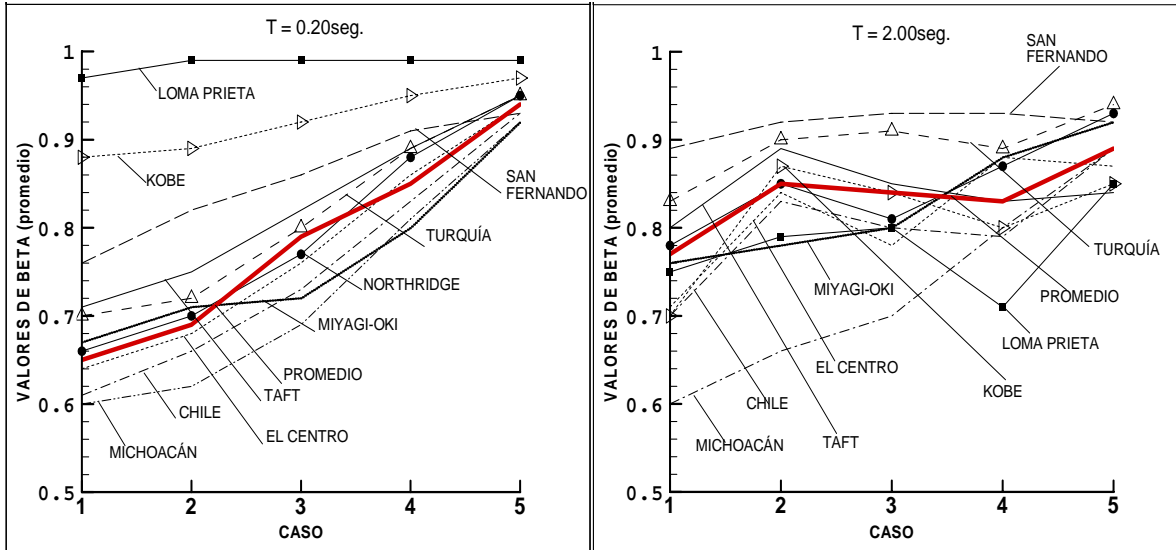


Figura 4.9. Efecto de la posición de un amortiguador: estructuras de muros.

Si se comparan los valores medios obtenidos para la estructura aperticada con los de la estructura de muros (Ver Figura 4.10) se puede observar que la variación entre ellos es menor al 5%, razón de la que se desprende que en término medio la posición de un amortiguador tiene efecto similar en ambos sistemas estructurales. En las Figuras 4.11 y 4.12, se grafican los valores de β_i contra el entrepiso correspondiente para observar el efecto del amortiguador en cada piso. Se muestran sólo los Casos 1 y 3 por considerarse representativos del patrón de comportamiento percibido en la estructura.

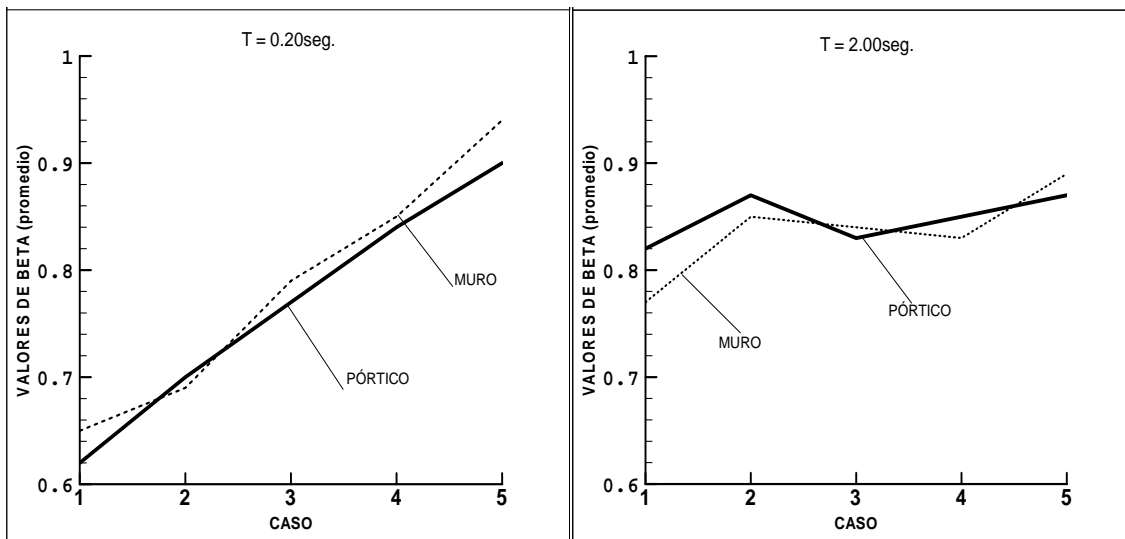


Figura 4.10. Comparación entre los resultados obtenidos para las estructuras con un solo amortiguador.

El Caso 1 puede observarse en la Figura 4.11, donde se nota que para los sistemas con $T = 0.20$ seg., la colocación del amortiguador en la estructura produce en término medio beneficios muy similares a partir del segundo entrepiso. En el primer entrepiso se registra un valor de β_i cercano a 0.35, indicando una reducción importante en la deriva de ese nivel (alrededor del 65%), en los entrepisos restantes se aprecia un valor de β_i alrededor de 0.70 (reducción cercana al 30%), lo cual indica un beneficio importante. En los sistemas con $T = 2.00$ seg., se aprecia que para la estructura aporticada en el primer entrepiso se obtiene un valor de β_i alrededor de 0.37, lo que se traduce en que el amortiguador produce una gran reducción en la deriva (cercano al 63%) y tiene poco efecto en los demás entrepisos, sobretodo en los últimos, ya que se observan reducciones alrededor del 10%. En la estructura de muros también se ve más favorecido el primer entrepiso, con un valor de β_i en torno a 0.60 (reducción del 40%), sin embargo, en los entrepisos restantes el amortiguador tiene un efecto importante, incluso en los últimos, observándose reducciones en la deriva alrededor del 20%.

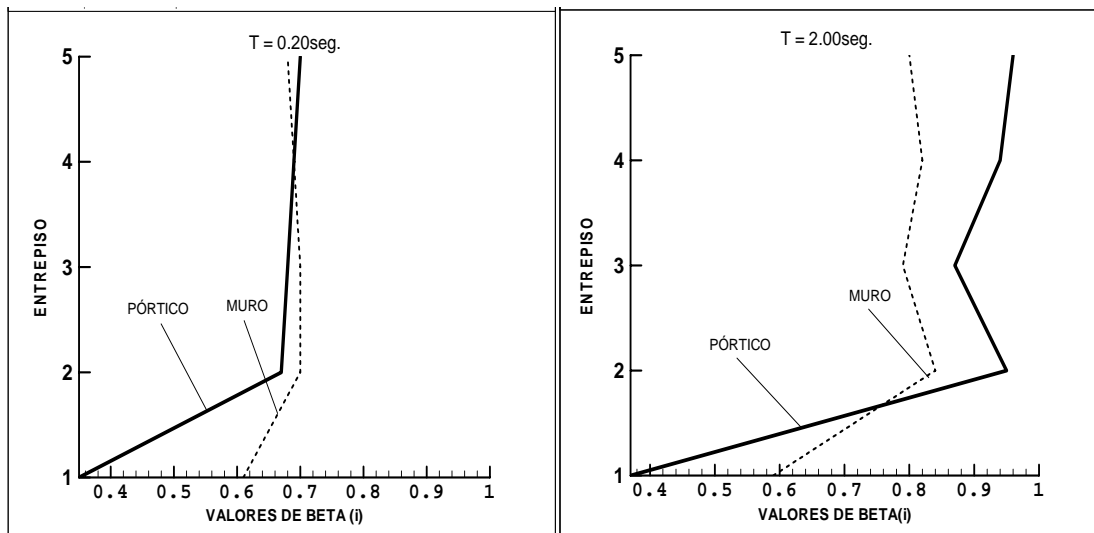


Figura 4.11. Efecto de la posición de un amortiguador: Caso 1.

La Figura 4.12 presenta las gráficas para el Caso 3, un amortiguador en el tercer piso. Para las estructuras de período corto se aprecia que para el sistema aporticado el amortiguador tiene un efecto muy marcado en el tercer entrepiso, el valor de β_i está en torno a 0.40, esto significa un reducción del 60% en la deriva de ese piso, en los demás entrepisos el efecto es apenas notable, escasamente se logran reducciones alrededor del 10%. En el sistema de muros el entrepiso que presenta mayor reducción en la deriva (30%) es igualmente el tercero, con un valor de β_i en torno a 0.70, sin embargo, contrario al sistema de pórticos en los demás entrepisos también se consigue una reducción significativa, la cual está cercana al 22%.

Para las estructuras con período largo se obtienen resultados similares, esto permite inferir que en las estructuras aporticadas el amortiguador sólo favorece de forma significativa al entrepiso donde esté ubicado, mientras que en las estructuras de muros el amortiguador tiende a favorecer a todos los niveles aunque se encuentre en los entrepisos inferiores.

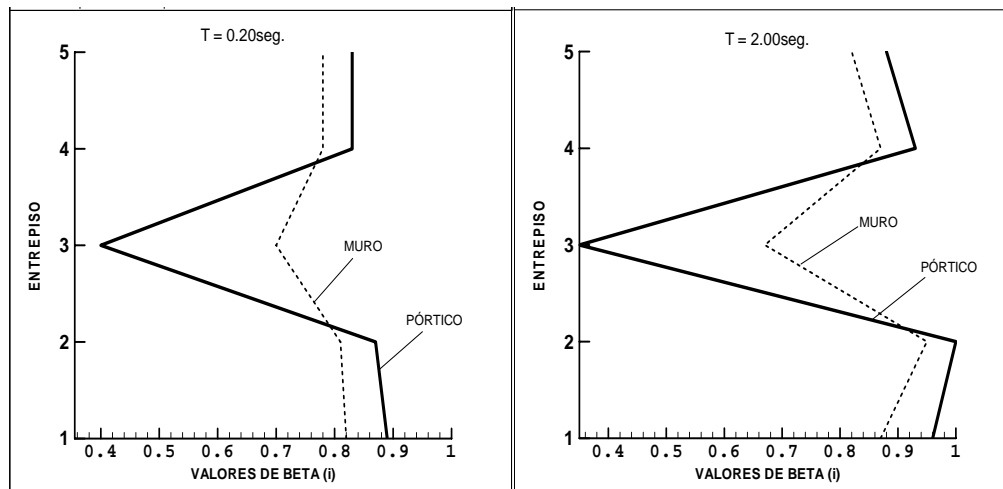


Figura 4.12. Efecto de la posición de un amortiguador: Caso 3.

4.8.2 Efecto en las propiedades dinámicas

En las tablas 4.4 y 4.5 se presentan los valores del amortiguamiento modal obtenidos para cada uno de los casos analizados con un amortiguador. Se puede observar que la inclusión del amortiguador en la estructura aumenta el amortiguamiento en los dos primeros modos de vibración, oscilando entre los valores 0.13 y 0.06, para cualquier posición en la que se le haya colocado. Resulta significativo destacar que en cada caso de estudio para alguno de los modos superiores (3, 4 y 5) se obtuvo valores de amortiguamiento superior al valor crítico ($\xi=100\%$); esto indica que no existe vibración de la estructura para esa forma modal. Esto se cumple para ambos sistemas estructurales.

A continuación se discuten con detalle los valores de amortiguamiento de los modos 1 y 2. En primer lugar se observa que el mayor amortiguamiento se obtiene para el primer modo en los tres primeros casos, siendo levemente mayor en la estructura de muros. El amortiguamiento en el primer modo disminuye a medida que el amortiguador se ubica en los niveles más altos de la estructura, pero este valor es en la mayoría de los casos superior al amortiguamiento inicial. El mayor valor (0.13 para la estructura aporticada y 0.14 para la estructura de muros) se alcanza con el amortiguador en el primer entrepiso. El mayor amortiguamiento en

el modo 2 se logra con el amortiguador colocado en el primer y cuarto entresijos, sin embargo, es importante destacar que en la estructura de muros los valores obtenidos son superiores a los de la estructura de pórticos, 0.14 y 0.7 respectivamente, hecho que se aprecia incluso en el último entresijo. Lo anteriormente expuesto se corresponde con lo observado al estudiar la respuesta de ambos sistemas, donde se observan reducciones importantes en todos los entresijos para el sistema de muros.

Tabla 4.4. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): estructura apórticada con un amortiguador.

Amortiguamiento modal (ξ_n)						
MODO	CASO 0	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
1	0.05	0.13	0.12	0.09	0.07	0.05
2	0.05	0.07	0.05	0.06	0.07	0.06
3	0.05	1.00	0.05	0.06	0.05	1.00
4	0.05	0.06	1.00	1.00	1.00	0.05
5	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Tabla 4.5 Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): estructura de muros con un amortiguador.

Amortiguamiento modal (ξ_n)						
MODO	CASO 0	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
1	0.05	0.14	0.13	0.10	0.07	0.06
2	0.05	0.14	0.06	0.07	0.13	0.08
3	0.05	1.00	0.06	0.08	0.06	1.00
4	0.05	0.08	1.00	1.00	1.00	0.06
5	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05

Las tablas 4.6(a, b) y 4.7(a, b) muestran la variación del período de las estructuras con la posición de un amortiguador. Se observa que el período fundamental disminuye con la presencia del amortiguador, siendo este efecto más manifiesto

en el sistema aporticado, asimismo puede establecerse correspondencia con el patrón de comportamiento observado para los amortiguamientos modales. La mayor reducción en el período fundamental ocurre cuando el amortiguador se coloca en el primer entrepiso (Caso 1) para ambos sistemas, fluctuando alrededor de 0.17seg. y 0.19seg. El amortiguador colocado en el último entrepiso (Caso 5) tiene muy poca influencia en el período fundamental. Por otro lado, en los modos donde se obtuvo amortiguamiento modal mayor al valor crítico, naturalmente no hay período de vibración.

Tabla 4.6 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con un amortiguador, $T = 0.20$ seg.

Período de vibración (T_n) en seg.						
MODO	CASO 0	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
1	0.200	0.170	0.178	0.185	0.193	0.198
2	0.069	0.082	0.068	0.065	0.057	0.064
3	0.044	-	0.042	-	0.043	-
4	0.034	0.037	-	0.038	-	0.039
5	0.030	0.030	0.031	0.033	0.032	0.031

Tabla 4.6 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con un amortiguador, $T = 2.00$ seg.

Período de vibración (T_n) en seg.						
MODO	CASO 0	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
1	2.000	1.697	1.780	1.853	1.929	1.983
2	0.685	0.822	0.676	0.654	0.573	0.635
3	0.435	-	0.420	-	0.428	-
4	0.338	0.372	-	0.381	-	0.389
5	0.297	0.303	0.312	0.335	0.322	0.306

Tabla 4.7 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con un amortiguador, $T = 0.20\text{seg}$.

Período de vibración (T_n) en seg.						
MODO	CASO 0	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
1	0.200	0.194	0.194	0.196	0.198	0.200
2	0.069	0.058	0.068	0.066	0.059	0.064
3	0.044	-	0.042	0.038	0.043	-
4	0.034	0.037	-	-	-	0.04
5	0.030	0.030	0.031	0.033	0.032	0.03

Tabla 4.7 (b) Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con un amortiguador, $T = 2.00\text{seg}$.

Período de vibración (T_n) en seg.						
MODO	CASO 0	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
1	2.000	1.936	1.944	1.957	1.977	1.995
2	0.685	0.585	0.678	0.659	0.587	0.641
3	0.435	-	0.420	0.382	0.429	-
4	0.338	0.371	-	-	-	0.39
5	0.297	0.303	0.313	0.335	0.322	0.31

4.9 EFECTO DEL NÚMERO DE AMORTIGUADORES

4.9.1 Efecto en la respuesta máxima

En la Figura 4.13 se grafican los valores de β_p contra cada uno de los casos estudiados para las estructuras aporticadas con varios amortiguadores (ver Figura 4.5), se presentan los valores determinados para cada sismo destacándose el valor medio entre ellos. Para el sistema con $T = 0.20$ seg., la mayor reducción en las derivas de entrepiso en término medio se logra cuando se colocan tres amortiguadores en la estructura (Caso c, uno por piso, comenzando desde el primer entrepiso) con un valor de β_p alrededor de 0.44, lo que resulta en una reducción del 56%. Por otro lado, se aprecia que al aumentar el número de amortiguadores no se incrementa el beneficio para el sistema. Los valores de β_p calculados para las respuestas obtenidas con los acelerogramas “Loma Prieta”, “Kobe” y “San Fernando” no fueron tomados en cuenta al determinar el valor medio, debido a que se consideran fuera de la tendencia de comportamiento.

Para el sistema con $T = 2.00$ seg. (Ver Figura 4.13), se observa que en término medio se obtiene mayor reducción en la respuesta a medida que se aumenta el número de amortiguadores, lográndose el menor valor de β_p (alrededor de 0.45) para el Caso e, lo que se traduce en un descenso cercano al 55%. Además, se aprecia que la reducción obtenida para este sistema es mayor que la observada para la estructura con período $T = 0.20$ seg., hecho que confirma que la respuesta de la estructura con amortiguadores es sensible al período de vibración. Para estos sistemas se encontró que los valores de β_p determinados para las respuestas obtenidas con los acelerogramas “San Fernando” y “Michoacán” presentaron diferencias alrededor del 20% con el resto de las excitaciones empleadas, razón por la que no fueron tomados en cuenta al determinar el valor medio.

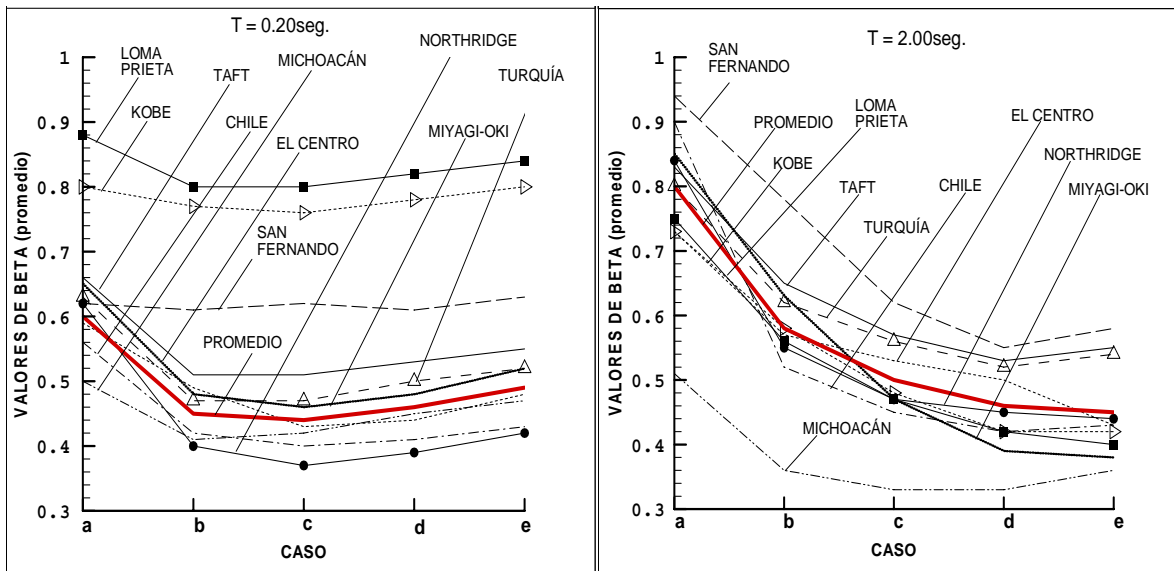


Figura 4.13. Efecto del número de amortiguadores: estructuras aporcadas.

En la Figura 4.14 se aprecian los resultados obtenidos para la estructura de muros, nótese que para el sistema con $T = 0.20$ seg., se obtiene un valor de β_p en torno a 0.62 para el Caso b (dos amortiguadores, uno por piso, comenzando desde el primero), este valor representa la mayor reducción en las derivas de entrepiso en término medio (38%), igualmente se observan beneficios similares al aumentar el número de dispositivos. Los valores de β_p determinados para las respuestas obtenidas con los acelerogramas “Loma Prieta”, “Kobe” y “San Fernando” no fueron tomados en cuenta para el valor medio, ya que dichos valores se consideraron fuera de la tendencia de comportamiento.

Para el sistema con $T = 2.00$ seg., se obtiene la mayor reducción de la respuesta en término medio cuando se colocan entre dos y cuatro amortiguadores en la estructura, casos b y d respectivamente, los valores de β_p están en torno a 0.70. En este caso los valores de β_p correspondientes al acelerograma “San Fernando” y “Turquía” se consideraron fuera de la tendencia de comportamiento y no se tomaron en cuenta para calcular el valor medio.

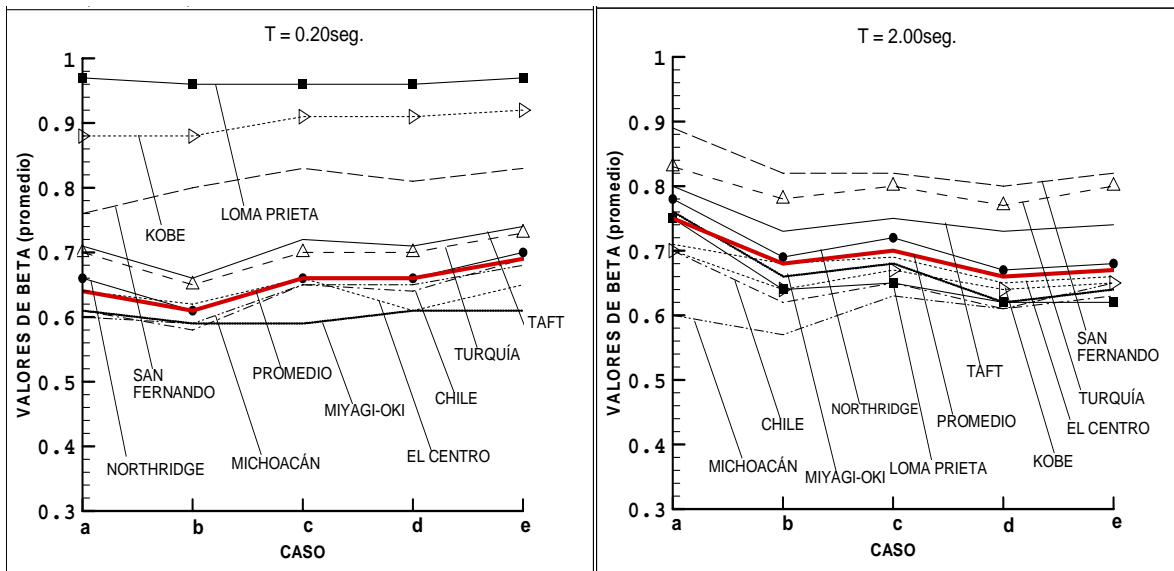


Figura 4.14. Efecto del número de amortiguadores: estructuras de muros.

Si se contrastan los resultados en término medio obtenidos para la estructura aporticada con los de la estructura de muros (Ver Figura 4.15), se puede observar que al aumentar el número de amortiguadores las estructuras aporticadas se ven más favorecidas que las estructuras de muros, sin embargo, en los pórticos con periodo $T = 0.20\text{seg.}$, utilizar más de tres dispositivos no se traduce en la mayor reducción de la respuesta, pues la línea que define el patrón de comportamiento es prácticamente horizontal

En las estructuras de muros es muy poco el beneficio que se produce al utilizar más de un amortiguador, efectivamente los resultados son similares si se coloca uno, dos, tres o más amortiguadores en el sistema.

Se presenta entonces el número de amortiguadores como una variable que afecta sensiblemente la respuesta de las estructuras con estos dispositivos. Efecto que se ve sujeto al sistema estructural utilizado y al periodo de vibración de la estructura, en cuanto a la influencia del sismo, ésta se discute en la sección 4.12.

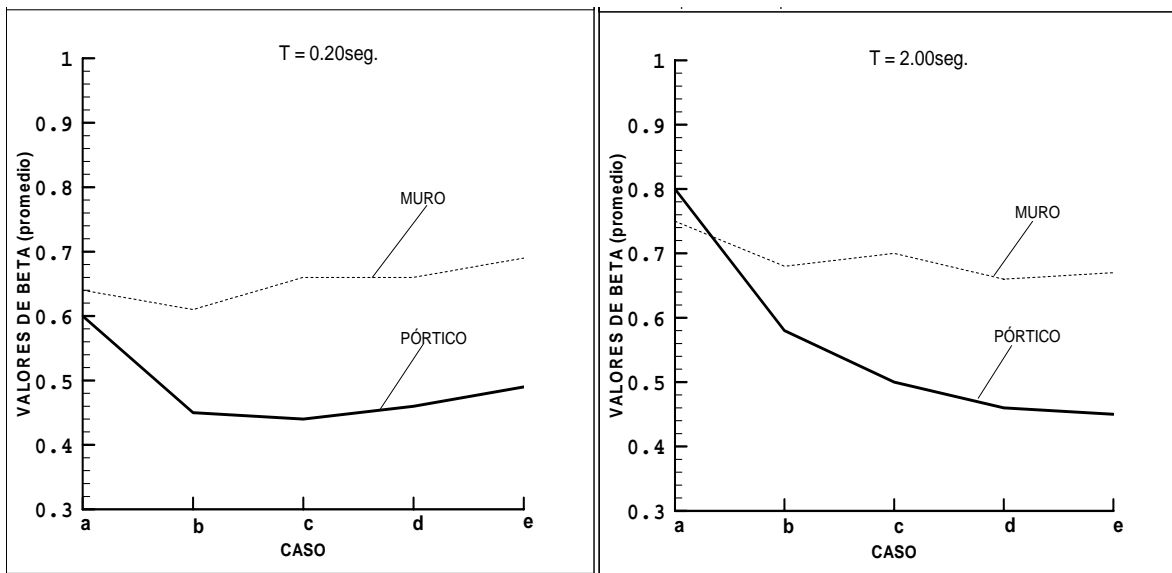


Figura 4.15. Comparación entre los resultados obtenidos para las estructuras con varios amortiguadores.

4.9.2 Efecto en las propiedades dinámicas

En las tablas 4.8 y 4.9 se presentan los valores del amortiguamiento modal obtenidos para cada uno de los casos analizados con varios amortiguadores. Se aprecia que el aumento del número de amortiguadores en la estructura aumenta considerablemente el amortiguamiento en los dos primeros modos de vibración de las estructuras aporticadas, oscilando estos valores entre 0.13 y 0.67, esto se cumple principalmente para los Casos b y c. Los Casos d y e exhiben valores importantes en el segundo modo de vibración, alcanzándose un amortiguamiento de 0.63, hecho que influye en la respuesta de los sistemas de período largo como se discutió anteriormente. En cada caso de estudio para alguno de los modos superiores (3, 4 y 5) se obtuvo valores de amortiguamiento superior al valor crítico ($\xi=100\%$); esto indica que no existe vibración de la estructura para esa forma modal. Esta particularidad se presentó para ambos sistemas estructurales.

En la estructura de muros se observa que en el modo fundamental un número de amortiguadores superior a dos no implica un aumento significativo del amortiguamiento, los mayores valores se obtienen para los Casos a y b, 0.14 y

0.15 respectivamente. En el segundo modo los valores de amortiguamiento más significativos se obtienen para el Caso d y e, 0.23 en ambos casos, sin embargo, estos valores son mucho menores que los obtenidos para la estructura aporricada. Todo lo anteriormente expuesto tiene correspondencia con lo observado al analizar la respuesta estructural, esto es, utilizar un mayor número de amortiguadores beneficia principalmente a las estructuras aporricadas.

Tabla 4.8. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura aporricada con varios amortiguadores.

Amortiguamiento modal (ξ_n)						
MODO	CASO 0	CASO a	CASO b	CASO c	CASO d	CASO e
1	0.05	0.13	0.34	0.35	0.29	0.25
2	0.05	0.07	0.67	0.23	0.63	0.63
3	0.05	1.00	0.12	1.00	0.79	0.97
4	0.05	0.06	1.00	0.07	1.00	1.00
5	0.05	0.05	0.06	1.00	1.00	1.00

Tabla 4.9. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura de muros con varios amortiguadores.

Amortiguamiento modal (ξ_n)						
MODO	CASO 0	CASO a	CASO b	CASO c	CASO d	CASO e
1	0.05	0.14	0.15	0.12	0.12	0.11
2	0.05	0.14	0.19	0.16	0.23	0.23
3	0.05	1.00	0.11	0.42	0.21	0.34
4	0.05	0.08	1.00	0.09	0.43	0.44
5	0.05	0.06	0.06	0.89	0.63	0.51

La variación del período de vibración en las estructuras para los casos con varios amortiguadores se presenta en las tablas 4.10(a, b) y 4.11(a, b).

Se observa que el período fundamental disminuye con la presencia de uno y dos amortiguadores, casos a y b respectivamente. Luego a partir del Caso c el período aumenta muy levemente, siendo este efecto más manifiesto en el sistema

aporticado. Por otro lado, en los modos donde se obtuvo amortiguamiento modal mayor al valor crítico, naturalmente no hay período de vibración.

Tabla 4.10 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con varios amortiguadores, $T = 0.20\text{seg.}$

Período de vibración (T_n)						
MODO	CASO 0	CASO a	CASO b	CASO c	CASO d	CASO e
1	0.200	0.170	0.177	0.207	0.208	0.207
2	0.069	0.057	0.099	0.065	0.075	0.088
3	0.044	-	0.044	-	0.075	0.179
4	0.034	0.037	-	0.034	-	-
5	0.030	0.030	0.006	-	-	-

Tabla 4.10 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con varios amortiguadores, $T = 2.00\text{seg.}$

Período de vibración (T_n)						
MODO	CASO 0	CASO a	CASO b	CASO c	CASO d	CASO e
1	2.000	1.697	1.775	2.067	2.082	2.065
2	0.685	0.571	0.993	0.648	0.748	0.882
3	0.435	-	0.444	-	0.749	1.788
4	0.338	0.372	-	0.341	-	-
5	0.297	0.303	0.063	-	-	-

Tabla 4.11(a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con varios amortiguadores, $T = 0.20\text{seg.}$

Período de vibración (T_n)						
MODO	CASO 0	CASO a	CASO b	CASO c	CASO d	CASO e
1	0.200	0.194	0.200	0.201	0.201	0.201
2	0.069	0.058	0.069	0.066	0.069	0.070
3	0.044	-	0.042	0.048	0.041	-
4	0.034	0.037	-	0.033	-	0.038
5	0.030	0.030	0.031	0.068	0.039	0.034

Tabla 4.11 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con varios amortiguadores, $T = 2.00\text{seg}$.

Período de vibración (T_n)						
MODO	CASO 0	CASO a	CASO b	CASO c	CASO d	CASO e
1	2.000	1.936	2.000	2.012	2.015	2.013
2	0.685	0.585	0.691	0.663	0.688	0.704
3	0.435	-	0.415	0.479	0.415	-
4	0.338	0.371	-	0.335	-	0.377
5	0.297	0.303	0.311	0.682	0.389	0.344

Dado que en esta etapa del estudio las mayores reducciones en la respuesta se obtienen para los casos con tres y cinco dispositivos, a continuación se investigará el efecto de la distribución de los mismos en la estructura.

4.10 EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TRES AMORTIGUADORES

4.10.1 Efecto en la respuesta máxima

La Figura 4.16 muestra los resultados para las diversas distribuciones propuestas para tres amortiguadores (ver Figura 4.6) presentes en la estructura aporticada. Se observa que para el sistema con $T = 0.20\text{seg.}$, la distribución que aporta mayor beneficio a la estructura en término medio corresponde al caso c 3 con valor de β_p alrededor de 0.44, lo cual implica una reducción en la respuesta del 56% aproximadamente, este caso se caracteriza por una distribución uniforme del amortiguamiento en los tres primeros pisos. Los casos restantes (excepto el a 3), en los que se distribuyen los amortiguadores en dos entrepisos, también se nota una reducción importante de la respuesta, del 50% aproximadamente. Esto indica que resulta más beneficioso para la estructura distribuir el amortiguamiento dentro de la misma y no concentrarlo en un solo piso. Las respuestas correspondientes a los sismos “Loma Prieta”, “San Fernando” y “Kobe” no fueron tomadas en cuenta para la obtención del valor medio, ya que se consideraron fuera del patrón de comportamiento.

Asimismo se observa que para el sistema con $T = 2.00\text{ seg.}$, los casos que reportan mayor beneficio para la estructura son el c 3 y el f 3, con valores de β_p en torno a 0.50 y 0.57, lo cual establece reducciones en la deriva del 50% y 43% respectivamente. El caso donde se obtiene la menor reducción de la respuesta es el a 3, la cual está alrededor del 17%, esto coincide totalmente con lo anteriormente descrito para el sistema con $T = 0.20\text{ seg.}$ Al calcular el valor medio no fueron considerados los resultados provenientes de los acelerogramas “Michoacán” y “San Fernando”.

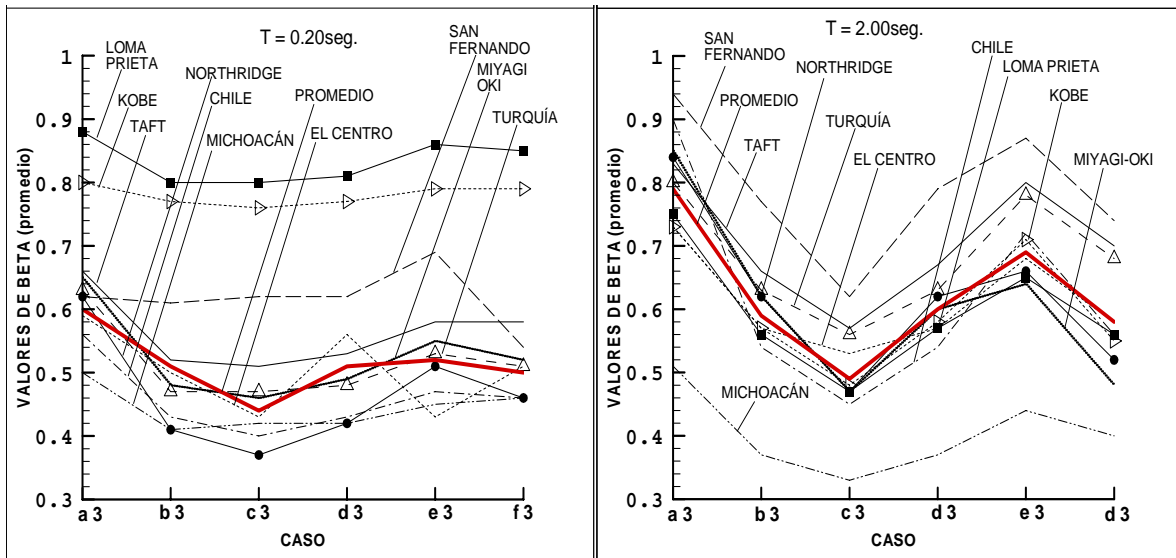


Figura 4.16. Efecto de la distribución de tres amortiguadores: estructuras aporticadas.

Para la estructura de muros con $T = 0.20$ seg. (Ver Figura 4.17), se obtiene la mayor reducción en la respuesta máxima para el Caso b 3, en el que se tiene un valor de β_p cercano a 0.62, que se traduce en una reducción del 48%. También se obtienen reducciones significativas en los Casos a 3 y d 3, cuyos valores oscilan en torno al 45%. Los casos más desfavorables para este sistema son el c 3 y el f 3, en los que se aprecian mayores valores de β_p . Es importante destacar que los valores correspondientes a los sismos “San Fernando”, “Loma Prieta” y “Kobe” se consideraron fuera del patrón regular de comportamiento.

En el sistema de muros con $T = 2.00$ seg., el caso que aporta mayor beneficio a la estructura es el b 3, con un valor de β_p en torno a 0.68. La configuración que produce la menor reducción en la respuesta es la que corresponde al Caso e 3.

Al observar las dos gráficas de los sistemas de muros se puede notar que la curva del valor medio tiene tendencia a la horizontalidad, es decir, presenta poca variación para las distribuciones investigadas.

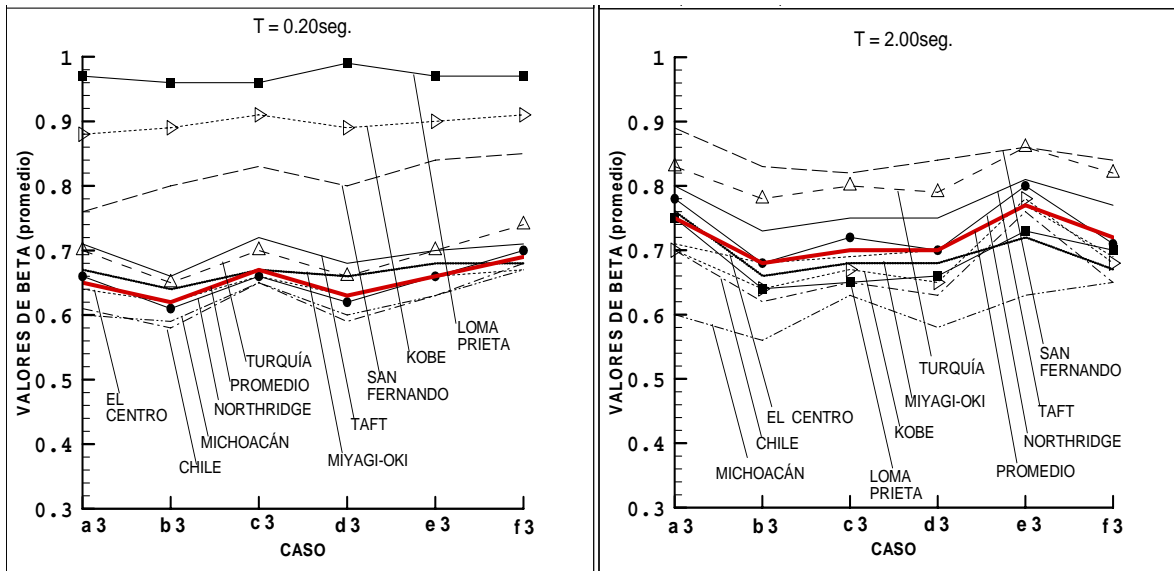


Figura 4.17. Efecto de la distribución de tres amortiguadores: estructuras de muros.

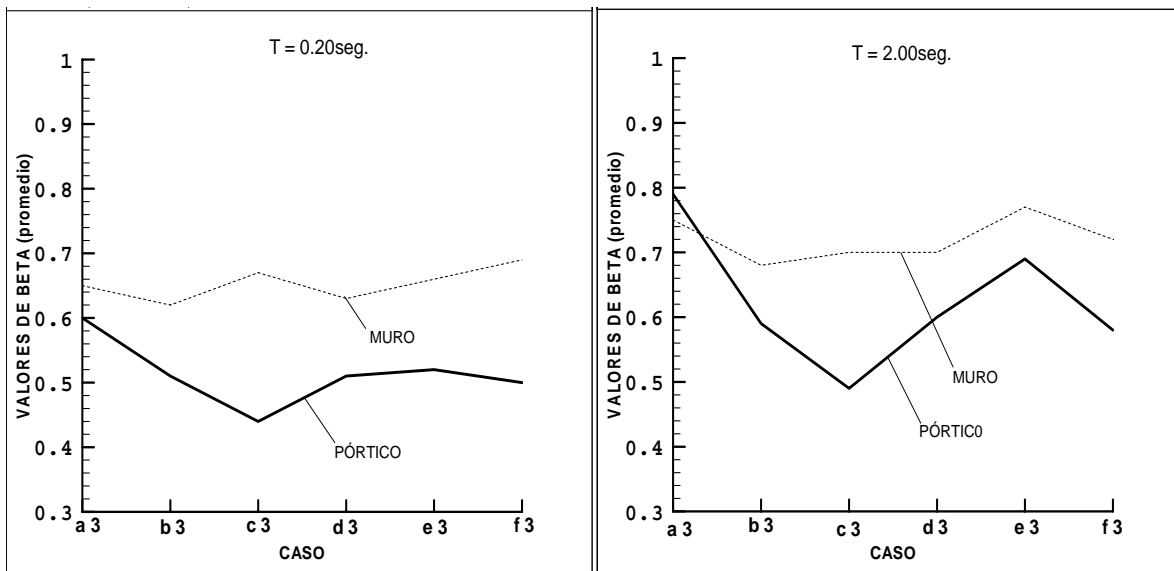


Figura 4.18. Comparación entre los resultados obtenidos para las estructuras con tres amortiguadores.

Todo esto permite inferir que para el sistema de muros, distribuir los amortiguadores en varios pisos tiene un efecto poco significativo en la reducción de la respuesta de la estructura, mientras que en los sistemas de pórticos es más conveniente distribuir uniformemente los amortiguadores. Esto puede ser

observado con más claridad en la Figura 4.18 en la que se comparan los valores medios de ambos sistemas.

4.10.2 Efecto en las propiedades dinámicas

En la tabla 4.12, se puede observar que para las estructuras aporticadas la distribución de los amortiguadores tiene un efecto importante en los valores de amortiguamiento. Para el Caso c 3 donde se distribuye el amortiguamiento de manera uniforme en los tres primeros entresijos, se aprecia un incremento hasta 0.35 en el modo fundamental. Asimismo en el segundo modo de estas estructuras se observa un incremento notable del valor de amortiguamiento, especialmente en los Casos a 3 y b 3, donde se alcanzan valores en el orden del 0.70.

Tabla 4.12. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura aporticada con tres amortiguadores.

Amortiguamiento modal (ξ_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 3	CASO b 3	CASO c 3	CASO d 3	CASO e 3	CASO f 3
1	0.05	0.13	0.32	0.35	0.32	0.23	0.25
2	0.05	0.07	0.62	0.23	0.49	0.07	0.55
3	0.05	1.00	1.00	1.00	0.11	1.00	0.18
4	0.05	0.06	0.13	0.07	1.00	1.00	1.00
5	0.05	0.05	0.06	1.00	0.06	0.07	1.00

La tabla 4.13 presenta los valores de amortiguamiento obtenidos para los casos investigados en la estructura de muros. Se puede observar una tendencia muy estable para los dos primeros modos, obteniéndose un máximo de 0.15 en el primero en el Caso b 3, y 0.21 para el segundo modo para el mismo caso.

En general, en las estructuras con período corto se puede distinguir una clara correspondencia entre la variación del amortiguamiento en el modo fundamental y la reducción de la respuesta, es decir, se evidencia que a mayor amortiguamiento se tiene mayor reducción en la respuesta de la estructura.

Resulta importante destacar luego de analizar estos resultados que para la estructura aporticada, cuando tiene más de un amortiguador, resulta muy favorable distribuir de manera uniforme los dispositivos a lo largo del edificio. Mientras que para la estructura de muros tiene prácticamente el mismo efecto concentrar los amortiguadores en un solo piso que distribuirlos de forma uniforme en todo el sistema. Igualmente se debe resaltar que en esta etapa del estudio también se obtuvo en algunos de los modos superiores valores de amortiguamiento superior al valor crítico ($\xi=100\%$); esto indica que no existe vibración de la estructura en ese modo.

Tabla 4.13. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura de muros con tres amortiguadores.

Amortiguamiento modal (ξ_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 3	CASO b 3	CASO c 3	CASO d 3	CASO e 3	CASO f 3
1	0.05	0.14	0.15	0.12	0.15	0.13	0.11
2	0.05	0.14	0.21	0.16	0.16	0.08	0.19
3	0.05	1.00	0.12	0.42	0.09	0.32	0.18
4	0.05	0.08	1.00	0.09	1.00	0.10	0.49
5	0.05	0.06	0.06	0.89	0.06	1.00	0.92

Las tablas 4.14 (a) y 4.14 (b) presentan la variación de los períodos de vibración de las estructuras aporticadas, se advierte que el período fundamental disminuye en la mayoría de los casos de estos sistemas. La mayor reducción ocurre cuando los amortiguadores se concentran en el primer entrepiso (Caso a 3). La distribución adoptada según el Caso c 3 tiene muy poca influencia en el período fundamental, esto se debe a que la distribución del amortiguamiento es más uniforme con respecto a la estructura, acercando más al sistema a un comportamiento clásico. En cuanto al segundo modo, se observa una situación análoga a la descrita anteriormente.

Tabla 4.14 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con tres amortiguadores. $T = 0.20\text{seg}$.

Período de vibración (T_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 3	CASO b 3	CASO c 3	CASO d 3	CASO e 3	CASO f 3
1	0.200	0.170	0.177	0.207	0.181	0.178	0.194
2	0.069	0.057	0.081	0.065	0.082	0.065	0.063
3	0.044	-	-	-	0.044	-	0.050
4	0.034	0.037	0.041	0.034	-	-	-
5	0.030	0.030	0.031	-	0.031	0.034	-

Tabla 4.14 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con tres amortiguadores. $T = 2.00\text{seg}$.

Período de vibración (T_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 3	CASO b 3	CASO c 3	CASO d 3	CASO e 3	CASO f 3
1	2.000	1.697	1.768	2.067	1.812	1.776	1.937
2	0.685	0.571	0.812	0.648	0.817	0.653	0.634
3	0.435	-	-	-	0.438	-	0.501
4	0.338	0.372	0.411	0.341	-	-	-
5	0.297	0.303	0.314	-	0.314	0.344	-

En las tablas 4.15 (a) y 4.15 (b) se muestran los períodos para la estructura de muros, se observa que la configuración que tiene mayor efecto sobre el período fundamental es la correspondiente al Caso a 3, donde el amortiguamiento se concentra en el primer piso, notándose una leve disminución de su valor. Por otro lado, se aprecia como en los otros casos de distribución planteados el valor del período fundamental prácticamente no se ve afectado, asimismo para el segundo modo se advierte una situación similar. En los modos donde se obtuvo amortiguamiento modal mayor al valor crítico, naturalmente no hay período de vibración.

Tabla 4.15 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con tres amortiguadores. $T = 0.20\text{seg}$.

Período de vibración (T_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 3	CASO b 3	CASO c 3	CASO d 3	CASO e 3	CASO f 3
1	0.200	0.193	0.199	0.201	0.199	0.199	0.200
2	0.069	0.058	0.067	0.066	0.069	0.067	0.067
3	0.044	-	0.041	0.048	0.042	-	0.042
4	0.034	0.037	-	0.033	-	0.034	0.042
5	0.030	0.030	0.031	0.068	0.031	-	0.076

Tabla 4.15 (b). Valores del período de vibración (T_n): Estructura de muros con tres amortiguadores. $T = 2.00\text{seg}$.

Período de vibración (T_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 3	CASO b 3	CASO c 3	CASO d 3	CASO e 3	CASO f 3
1	2.000	1.934	1.992	2.012	1.994	1.986	2.003
2	0.685	0.585	0.671	0.663	0.694	0.671	0.670
3	0.435	-	0.408	0.479	0.418	-	0.418
4	0.338	0.371	-	0.335	-	0.34	0.419
5	0.297	0.303	0.310	0.682	0.312	-	0.764

4.11 EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CINCO AMORTIGUADORES

4.11.1 Efecto en la respuesta máxima

Los resultados debidos a la distribución de cinco amortiguadores en las estructuras aperticadas se presentan en la Figura 4.19. La mayor reducción de la respuesta para la estructura con $T = 0.20\text{ seg.}$, se obtiene para el caso c 5 donde se aprecia un valor de β_p alrededor de 0.43, para una disminución del 57% en término medio. Esto indica que para esta estructura es favorable que el amortiguamiento se distribuya hacia los niveles inferiores, siendo menos pertinentes aquellas distribuciones que impliquen colocar amortiguadores en todos los entresijos como en el Caso a 5, donde se obtuvo un valor de β_p en torno a

0.62, para una reducción en la deriva del 38%. Para determinar el valor medio en estos resultados no se consideraron las respuestas de los sismos “Loma Prieta”, “Kobe” y “San Fernando” por estar fuera del patrón de comportamiento.

Por el contrario, para la estructura con $T = 2.00$ seg., los resultados muestran un efecto muy distinto, es decir, para el Caso a 5 se obtiene un valor de β_p de 0.45, lo que representa la mayor reducción de las derivas (55%) y en el Caso f 5 se registra un valor de β_p alrededor de 0.83. que equivale a la menor reducción (17%). Para la estructura aporricada de período largo sí resulta conveniente adoptar distribuciones en las que se coloquen amortiguadores en todos los entresijos, distribuyendo la cantidad de amortiguamiento uniformemente, como en el Caso a 5. Para estos sistemas se estimaron fuera de tendencia los sismos “San Fernando” y “Michoacán”, por lo que no se tomaron en cuenta para calcular los valores medios.

En la estructura de muros (ver Figura 4.20) la distribución que aporta mayor beneficio para la estructura con $T = 0.20$ seg., es el caso d 5 donde se aprecia un valor de β_p en torno a 0.62, para una disminución de la respuesta del 38% en término medio. El caso menos favorable es el a 5, donde se consigue un valor de β_p cercano a 0.70, esto representa la menor reducción de la deriva obtenida (alrededor del 30%). Para esta estructura resulta conveniente que los amortiguadores se concentren hacia los niveles inferiores, más que colocar dispositivos en todos los entresijos.

Para el sistema con $T = 2.00$ seg., cualquier distribución produce un efecto favorable, es decir, la reducción de las derivas en general se mantiene alrededor del 35%. De aquí se desprende que para la estructura de muros de período largo colocar una gran cantidad de amortiguadores produce un efecto similar que concentrar los dispositivos en los entresijos inferiores, como en el Caso b 5.

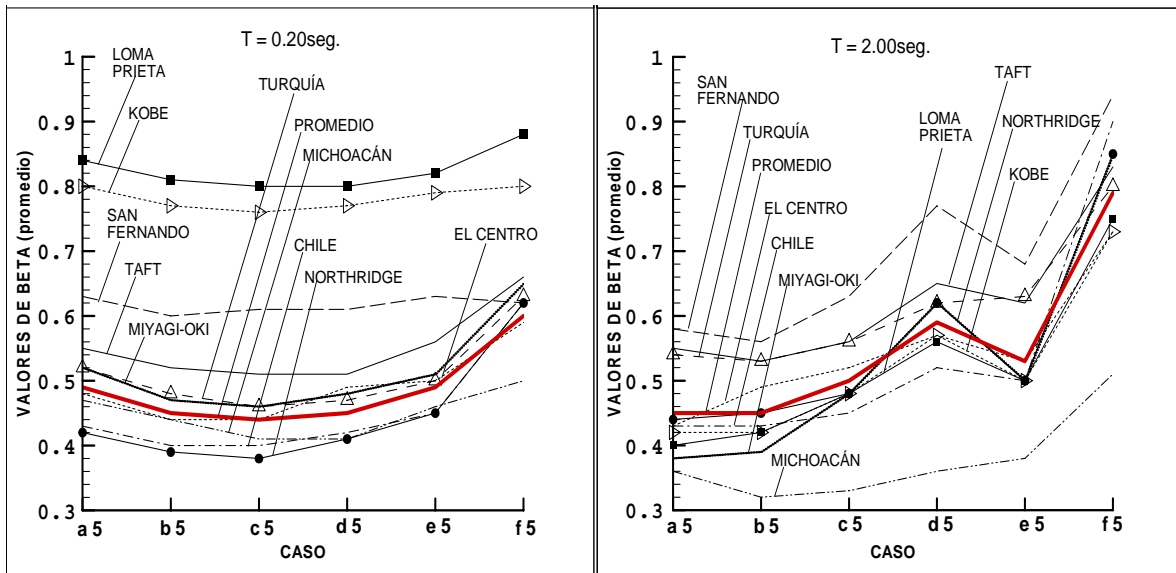


Figura 4.19. Efecto de la distribución de cinco amortiguadores: estructuras aperticadas.

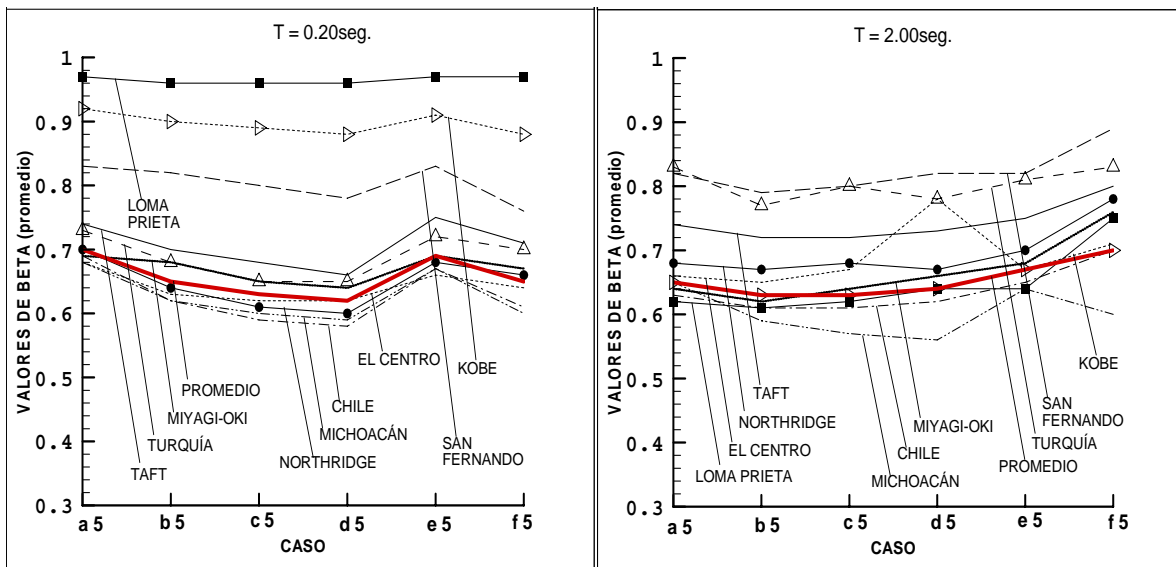


Figura 4.20. Efecto de la distribución de cinco amortiguadores: Estructura de muros.

En la Figura 4.21 se comparan los valores medios de los dos sistemas estructurales investigados, y se aprecia con más claridad lo discutido anteriormente, es decir, para las estructuras con período corto la tendencia del comportamiento es similar, se consigue una mayor reducción en la respuesta

cuando la distribución adoptada tiende a concentrar el amortiguamiento en los niveles inferiores.

En las estructuras con período largo, si se trata de un sistema aporticado, la distribución de amortiguadores más favorable es aquella en la que el amortiguamiento se distribuye uniformemente en todo el edificio. Si el sistema es de muros el mejor arreglo de amortiguadores es aquel que contempla la concentración de los dispositivos hacia los entrepisos inferiores.

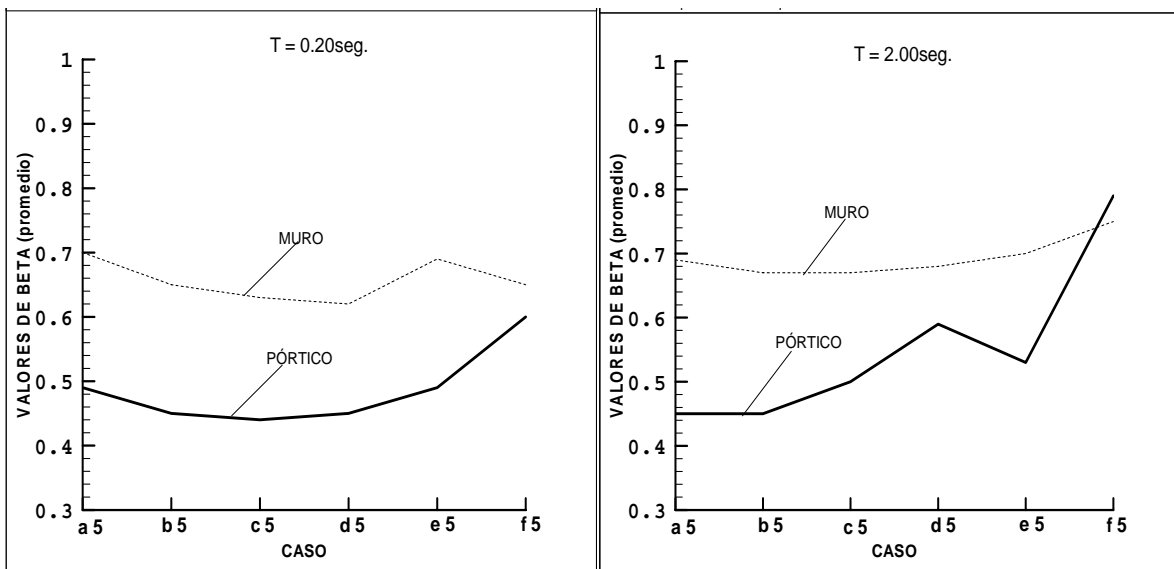


Figura 4.21. Comparación entre los resultados obtenidos para las estructuras con cinco amortiguadores.

4.11.2 Efecto en las propiedades dinámicas

Los amortiguamientos modales se ven influenciados con la distribución de los amortiguadores, esto se puede observar en la tabla 4.16, donde en el primer modo para el sistema aporricado el menor valor de amortiguamiento (0.13) se produce para el Caso f 5, en el cual todos los dispositivos se concentran en el primer entrepiso.

Los valores más elevados, que están alrededor de 0.35, se obtienen cuando los amortiguadores se distribuyen entre los tres primeros entrepisos. Esto permite establecer una relación directa con el comportamiento exhibido ante las derivas de entrepiso por las estructuras aporricadas de período corto. En el segundo modo los valores de amortiguamiento son significativamente mayores que en el primer modo, alcanzando su máximo (0.80) para el Caso b 5.

Tabla 4.16. Variación de amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura aporricada con cinco amortiguadores.

Amortiguamiento modal (ξ_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 5	CASO b 5	CASO c 5	CASO d 5	CASO e 5	CASO f 5
1	0.05	0.25	0.31	0.17	0.35	0.25	0.13
2	0.05	0.63	0.80	0.10	0.68	0.39	0.07
3	0.05	0.97	0.19	0.79	0.12	1.00	1.00
4	0.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06
5	0.05	1.00	1.00	1.00	0.06	0.12	0.05

En las estructuras de muros la variación del amortiguamiento se presenta en la tabla 4.17 con una tendencia muy estable para los dos primeros modos, los valores oscilan entre 0.15 para el primer modo y 0.25 para el segundo.

Los casos que muestran los valores máximos son el f 5 y el d 5, en los cuales parte del amortiguamiento se concentra en el primer entrepiso.

Se debe resaltar que en esta etapa del estudio también se obtuvo en algunos modos superiores valores de amortiguamiento mayor al valor crítico ($\xi=100\%$); esto indica que no existe vibración de la estructura en ese modo.

Tabla 4.17. Variación del amortiguamiento modal (ξ_n): Estructura de muros con cinco amortiguadores.

Amortiguamiento modal (ξ_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 5	CASO b 5	CASO c 5	CASO d 5	CASO e 5	CASO f 5
1	0.05	0.11	0.13	0.14	0.15	0.11	0.14
2	0.05	0.23	0.25	0.18	0.21	0.22	0.14
3	0.05	0.34	0.23	0.30	0.12	0.64	1.00
4	0.05	0.44	0.40	1.00	1.00	0.51	0.08
5	0.05	0.51	0.51	0.10	0.06	0.14	0.06

En las tablas 4.18(a, b) y 4.19(a, b) se muestran los resultados correspondientes a la variación de los períodos de vibración, nótese que en las estructuras aporticadas (tablas 4.18(a, b)) la variación del período fundamental es mucho más notable que en las estructuras de muros (tabla 4.19 (a, b)).

Se evidencia de forma clara la correspondencia entre el período fundamental y la distribución de los amortiguadores, ya que éste disminuye a medida que los dispositivos se concentran en los entrepisos inferiores.

En las estructuras de muros la variación es apenas notable, sin embargo, puede establecerse cierta relación con la distribución de los amortiguadores, ya que se nota una leve disminución en cuanto los dispositivos se agrupan hacia los niveles inferiores.

Nótese que al igual que los otros casos analizados existen modos de vibración en los que no hay período, que corresponden a los que tienen un amortiguamiento superior al valor crítico.

Tabla 4.18 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con cinco amortiguadores. $T = 0.20\text{seg}$.

Período de vibración (T_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 5	CASO b 5	CASO c 5	CASO d 5	CASO e 5	CASO f 5
1	0.200	0.207	0.205	0.192	0.178	0.194	0.170
2	0.069	0.089	0.089	0.061	0.093	0.066	0.057
3	0.044	0.179	0.046	0.075	0.044	-	-
4	0.034	-	-	-	-	-	0.037
5	0.030	-	-	-	-	0.036	0.030

Tabla 4.18 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura aporticada con cinco amortiguadores. $T = 2.00\text{seg}$.

Período de vibración (T_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 5	CASO b 5	CASO c 5	CASO d 5	CASO e 5	CASO f 5
1	2.000	2.065	2.053	1.924	1.777	1.936	1.697
2	0.685	0.886	0.891	0.606	0.934	0.660	0.571
3	0.435	1.788	0.459	0.753	0.445	-	-
4	0.338	-	-	-	-	-	0.372
5	0.297	-	-	-	-	0.360	0.303

Tabla 4.19 (a). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con cinco amortiguadores. $T = 0.20\text{seg}$.

Período de vibración (T_n)							
MODO	CASO 0	CASO a 5	CASO b 5	CASO c 5	CASO d 5	CASO e 5	CASO f 5
1	0.200	0.201	0.201	0.201	0.200	0.200	0.194
2	0.069	0.070	0.068	0.068	0.068	0.067	0.058
3	0.044	0.046	0.041	0.044	0.041	0.050	-
4	0.034	0.038	0.040	-	-	0.04	0.037
5	0.030	0.034	0.036	0.033	0.031	0.03	0.030

Tabla 4.19 (b). Variación del período de vibración (T_n): Estructura de muros con cinco amortiguadores. $T = 2.00\text{seg.}$

MODO	Período de vibración (T_n)						
	CASO 0	CASO a 5	CASO b 5	CASO c 5	CASO d 5	CASO e 5	CASO f 5
1	2.000	2.010	2.010	2.010	2.000	2.000	1.940
2	0.690	0.700	0.680	0.680	0.680	0.670	0.580
3	0.440	0.460	0.410	0.440	0.410	0.500	-
4	0.340	0.380	0.400	-	-	0.400	0.370
5	0.300	0.340	0.360	0.330	0.310	0.300	0.300

4.12 EFECTO DEL SISMO

La evaluación del efecto del sismo se lleva a cabo en dos fases, la primera, se basa en un análisis comparativo simple de cada uno de los casos investigados en contraste con lo observado en los espectros de velocidad de las excitaciones (Figuras 4.2 y 4.3). La segunda fase comprende un análisis más refinado de los valores obtenidos mediante el cual se estudia la significación estadística que existe entre dichos resultados. Para ello se realizó un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA), que permite detectar si existen diferencias significativas en un grupo de datos, y luego una prueba de rangos múltiples o prueba de la honestidad (Método de Tukey) para detectar diferencias significativas entre cada uno de los datos de una muestra (Steel y Torrie, 1988), todo esto a través del programa de análisis estadístico SPSS v.13.0 (SPSS 13.0, 1989-2004).

Todas las tablas que muestran los resultados de este análisis se presentan al final de los comentarios que se exponen a continuación. Lo observado al realizar la investigación descrita anteriormente permitirá fijar una posición con respecto al efecto del sismo en el análisis de estructuras con amortiguadores.

Al estudiar la respuesta de las estructuras con un amortiguador para $T = 0.20\text{seg.}$, en la Figura 4.8 se puede notar que al ubicar el amortiguador hacia los pisos superiores las respuestas de los diferentes sismos utilizados tienden a uniformizarse, es decir, a medida que el amortiguador tiene menos efecto en la

estructura las diferencias entre las respuestas va disminuyendo. Por otro lado, si se analiza el Caso 1 (ubicación con mayor efecto en el sistema) y se confronta con el espectro de velocidades de la Figura 4.2, se advierte que cuando los sismos exhiben velocidades moderadas-altas se obtienen mayores reducciones de las respuestas, tales como las excitaciones de “Chile”, “Michoacán”, y “Northridge”; por el contrario cuando los sismos exhiben velocidades más bajas, tales como “Kobe”, “Loma Prieta” y “San Fernando”, se nota como el amortiguador prácticamente no tiene efecto en la estructura, aún cuando se le haya ubicado en la posición más favorable. Esto se cumple para los dos sistemas analizados, pórtico y muro, aunque con mayor intensidad en la estructura de muros. Esto indica que la excitación sísmica tiene un efecto muy importante en la respuesta de las estructuras con amortiguadores.

La tabla 4.20(a, b) refrenda estadísticamente lo antes discutido, en ella se presentan los valores de β_p para cada caso investigado y la significación entre cada uno de ellos. La tabla muestra los valores de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones.

Los valores en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos mediante un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey para un valor de $p < 0.05$. Los valores en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos mediante un ANOVA para un valor de $p > 0.05$.

Así puede observarse que en el Caso 1 son estadísticamente significativos los valores correspondientes a los sismos Chile, Loma Prieta, Kobe y Michoacán, reportados anteriormente como las excitaciones con velocidades altas-moderadas y bajas. Igualmente es notable como a partir del Caso 3 ya no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos, lo cual se corresponde con el análisis realizado anteriormente. Para la estructura de muros (tabla 4.20(b)) se aprecia una situación muy particular, y es que para el Caso 1 todos los valores son estadísticamente significativos entre sí, sin embargo, sobresalen de nuevo los sismos Chile, Loma Prieta, Kobe, San Fernando y Michoacán al tener diferencias significativas con la mayoría de los valores presentados, esto se puede notar en la

cantidad de letras que exhiben en la tabla, por lo tanto estos sismos tienen un efecto importante en el patrón de comportamiento de la estructura. Obsérvese que para los Casos 4 y 5 ya las diferencias se atenúan notablemente, esto debido a que el amortiguador ya tiene muy poco efecto para estas configuraciones.

Para las estructuras con $T = 2.00\text{seg.}$, la situación es muy distinta, en las Figuras 4.8 y 4.9 se puede notar que aunque cuantitativamente la mayor reducción de la respuesta se da para el Caso 1 la tendencia para el resto de los casos en general es muy estable. Esto se cumple tanto para las estructuras aporticadas como para las de muros. En cuanto a los sismos sólo se aprecia una marcada diferencia para el sismo Michoacán que produce una gran reducción en la respuesta comparada con las otras excitaciones. Si se analiza la Figura 4.3 que muestra los espectros de velocidades para el período cuestionado, se observa que efectivamente Michoacán exhibe una muy alta velocidad con relación a los otros sismos, lo cual justifica la situación planteada, luego le sigue Turquía y el resto de las excitaciones se mantiene en un rango de velocidades moderado-bajo.

Las tablas 4.21(a, b) validan estadísticamente lo antes discutido, en ellas se presentan los valores de β_p para cada caso investigado y la significación entre cada uno de ellos. Las tablas muestran los valores de β_p y la desviación estándar de cinco mediciones.

Se advierte que para la estructura aporticada (Tabla 4.21 (a)) no existen diferencias significativas, lo cual podría decirnos que para los casos investigados en este tipo de sistemas si colocamos un amortiguador se obtienen efectos similares para todos los sismos estudiados y para todas las posiciones del amortiguador cuestionadas. Para las estructuras de muros, tabla 4.21 (b), se aprecia una situación análoga, sin embargo, los resultados arrojan que si existen diferencias significativas por lo menos entre las respuestas obtenidas con los sismos Michoacán y San Fernando para el Caso 1 y entre Michoacán y Northridge para el Caso 2, excitaciones que presentan alta y moderada-baja velocidad respectivamente, este hecho se corrobora en la Figura 4.8 donde precisamente destacan las respuestas de dichos acelerogramas.

Al estudiar el caso de las estructuras aporticadas con tres amortiguadores, la tendencia entre la mayoría de los sismos es muy similar para todas las distribuciones propuestas, excepto para los acelerogramas de “Kobe”, “Loma Prieta” y San Fernando en los sistemas con $T = 0.20$ seg., que exhiben reducciones de respuesta muy pequeñas (altos valores de β_p) con relación al resto de las excitaciones. Al confrontar la Figura 4.16 (izq.) con el espectro de velocidades de la Figura 4.2 puede notarse cierta proporcionalidad inversa entre las velocidades y los valores de β_p , es decir, los sismos que presentan altas velocidades como “Northridge”, “Turquía” y “Chile” conducen a los valores más bajos de este parámetro o lo que es igual las mayores reducciones en la respuesta. Los sismos con velocidades mucho más bajas como “Kobe” y “Loma Prieta” llevan a que los amortiguadores prácticamente no tengan efecto en la estructura, sea cual sea la distribución adoptada.

Situación análoga ocurre en las estructuras con $T=2.00$ seg. (Figura 4.16 derecha) donde destacan particularmente las respuestas de los sismos “Michoacán” para el que se obtienen los menores valores de β_p y de “San Fernando” con el que se alcanzan los mayores valores. Al comparar con el espectro de velocidades de la Figura 4.3, se aprecia la gran diferencia de velocidades entre las excitaciones mencionadas anteriormente. “Michoacán” exhibe una velocidad muy alta para el periodo en cuestión y “San Fernando” una velocidad mucho más baja.

Cabe destacar que la distribución de los amortiguadores influye en este comportamiento, puesto que como se observa en la Figura 4.16 para el caso c 3 que tiene la distribución más uniforme, los valores de β_p tienden a homogeneizarse.

Las tablas 4.22 (a) y 4.22 (b) validan estadísticamente lo antes discutido, en ellas se presentan los valores de β_p para cada caso investigado y la significación entre cada uno de ellos. Las tablas muestran los valores de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones.

En la tabla 4.22 (a) muestra los valores que corresponden a las estructuras con $T = 0.20\text{seg.}$, en todos los casos existe significación estadística, pero destacan principalmente los casos b 3, c 3 y d 3 en los que se observa mayor significación. En estos tres casos, que representan las distribuciones más favorables para la estructura, se distinguen las respuestas de los sismos “Kobe”, “San Fernando” y “Loma Prieta” ya que son las que presentan mayor número de letras, quiere decir entonces que son las que tienen mayores diferencias significativas con respecto a los demás valores. Anteriormente se reportaron estas excitaciones como las de menor velocidad para un periodo de 0.20 seg.

En la tabla 4.22 (b) se pueden observar los valores pertenecientes a las estructuras con $T = 2.00\text{seg.}$, en los que sobresalen igualmente los casos b 3, c 3 y d 3, en los que se encuentra significación estadística. Al comparar los resultados, se observa para estos tres casos que los valores que presentan diferencias significativas son las respuestas correspondientes a los sismos “San Fernando” y “Michoacán”, hecho que coincide plenamente con lo discutido anteriormente con relación a las estructuras con $T = 2.00\text{seg.}$

En el caso de las estructuras de muros con tres amortiguadores tal y como se discutió oportunamente, hay poca variación entre los valores de β_p en las distribuciones de amortiguadores investigadas (ver Figura 4.17), sin embargo, sobresalen especialmente las respuestas de los sismos “Loma Prieta”, “Kobe” y “San Fernando”, para los cuales se obtienen altos valores de dicho parámetro en los sistemas con $T = 0.20\text{seg.}$ Al observar el espectro de velocidades (Figura 4.2) se nota que esas tres excitaciones presentan las velocidades más bajas de la gráfica. Situación similar ocurre en los sistemas con $T = 2.00\text{seg.}$, en los que destaca la gran diferencia entre los valores de β_p de los sismos “San Fernando” y “Michoacán”, que al ubicarlos en el espectro de la Figura 4.3 se aprecia la divergencia entre las velocidades de las dos curvas.

Las tablas 4.23 (a) y 4.23 (b) confirman estadísticamente lo antes razonado. en ellas se presentan los valores de β_p para cada caso investigado y la significación entre cada uno de ellos. Las tablas muestran los valores de $\beta_p \pm$ la desviación

estándar de cinco mediciones. Los valores en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos mediante un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey para un valor de $p < 0.05$. Los valores en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos mediante un ANOVA para un valor de $p > 0.05$.

En la tabla 4.23 (a) se muestran los valores correspondientes a los sistemas con $T = 0.20\text{seg.}$, se aprecia que hay significación estadística prácticamente entre todos los valores y para todas las distribuciones de amortiguadores estudiadas, pero en cada caso se distinguen las respuestas de los acelerogramas de “Kobe”, “San Fernando” y “Loma Prieta” que son los que exhiben mayores diferencias significativas con el resto de los valores, esto se nota porque presentan la mayor cantidad de letras.

La tabla 4.23 (b) expone los valores procedentes de los sistemas con $T = 2.00\text{seg.}$, se advierte que en la mayoría de los casos investigados hay significación estadística, sin embargo, sobresalen mayormente las respuestas de los sismos “San Fernando” y “Michoacán” entre los que hay diferencias significativas en la mayor parte de las distribuciones adoptadas. Hecho que coincide con lo razonado anteriormente con respecto a este tipo de estructuras.

Al estudiar el efecto de la distribución de cinco amortiguadores, tal y como se discutió oportunamente, en las estructuras aporticadas se distinguen los casos c 5 y a 5, para $T = 0.20\text{seg.}$, y $T = 2.00\text{seg.}$, respectivamente, por ser los que aportan los menores valores de β_p . La mayoría de los sismos utilizados sigue dicha tendencia, sin embargo, se salen de este comportamiento al igual que en los casos anteriormente considerados. los sismos “Loma Prieta” y “Kobe” para los sistemas de periodo corto y “San Fernando” y “Michoacán” para los sistemas de periodo largo. Como se ha discutido anteriormente esto tiene su origen en las velocidades exhibidas por dichas excitaciones, que en algunos casos son muy bajas y no activan lo suficiente a los amortiguadores. en otros casos son muy altas y magnifican el efecto de los dispositivos.

En las estructuras de muros la situación no dista de la descrita para el caso con tres amortiguadores, los valores de β_p para las distribuciones propuestas varían muy poco. pero sobresalen las respuestas pertenecientes a los sismos mencionados más arriba para las estructuras aporticadas.

Las tablas siguientes corroboran estadísticamente lo antes razonado tal y como se ha hecho antes, en ellas se presentan los valores de β_p para cada caso investigado y la significación entre cada uno de ellos.

Se aprecia en la tabla 4.24 (a) que los sismos “Loma Prieta” y “Kobe” tienen la mayor significación estadística para la mayoría de las distribuciones de amortiguadores planteadas para las estructuras aporticadas de periodo corto, esto concuerda con lo que muestra la Figura 4.18.

La tabla 4.24 (b) muestra que hay menos significación estadística entre los valores presentados para las estructuras aporticadas con periodo largo, pero es notable como en los casos b 5, c 5 y d 5 las respuestas correspondientes a los acelerogramas de “San Fernando” y “Michoacán” son las que muestran diferencias significativas. hecho que se corrobora a simple vista en la Figura 4.18.

Los valores para las estructuras de muros con $T = 0.20\text{seg.}$, se pueden observar en la tabla 4.25 (a), en ella se verifica que hay significación estadística entre los valores de todos los casos investigados, lo que indica que todas las distribuciones adoptadas tienen efectos similares, sin embargo, destacan las respuestas de los sismos de “Kobe”, “San Fernando” y “Loma Prieta”. Situación que se infiere a simple vista al observar la Figura 4.19 (izquierda).

Las estructuras de muros con $T = 2.00\text{seg.}$, se presentan en la tabla 4.25 (b). Se observa significación estadística en los casos b 5, c 5, d 5 y f 5, para todos ellos se verifica que las respuestas correspondientes a los sismos “San Fernando” y “Michoacán” son las que exhiben diferencias significativas, esto debido a la diferencia entre las velocidades de dichas excitaciones (ver Figura 4.3).

Como comentario final se puede agregar que evidentemente el sismo tiene una marcada influencia en el efecto de los amortiguadores en las estructuras

investigadas, a tal punto que puede prácticamente anular o magnificar el efecto de los dispositivos en la reducción de la respuesta sísmica. Para el tipo de estructuras utilizadas y el tipo de amortiguadores supuestos en esta investigación la propiedad de la excitación que desencadena esta influencia es la velocidad, si la velocidad es relativamente baja, se conseguirán reducciones muy pequeñas en la respuesta sísmica con las distribuciones de amortiguadores estudiadas. Por el contrario, si la velocidad es relativamente alta el efecto de los amortiguadores se ve magnificado y por lo tanto se obtienen grandes reducciones en la respuesta sísmica. Así pues resulta importante contrastar las respuestas obtenidas de varios acelerogramas con los espectros de velocidades correspondientes a las excitaciones utilizadas. Lo aquí obtenido coincide con lo expuesto en el trabajo de Shukla y Datta (1999), en el que aunque se trabaja sólo con dos tipos de excitaciones, queda entendido que las mismas tienen una influencia directa sobre la respuesta de las estructuras con amortiguadores.

Tabla 4.20 (a). Efecto del sismo en las estructuras con un amortiguador: Sistema Aporticado. $T = 0.20\text{seg.}$
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
El Centro	0.59±0.14	0.66±0.17	0.76±0.21	0.88±0.26	0.92±0.26
Taft	0.66±0.14	0.72±0.18	0.82±0.23	0.88±0.25	0.90±0.25
Chile	0.56±0.14 ^a	0.67±0.16	0.71±0.20	0.77±0.25	0.85±0.23
Kobe	0.80±0.03 ^b	0.83±0.06	0.85±0.09	0.89±0.13	0.92±0.15
San Fernando	0.62±0.12	0.70±0.16	0.69±0.14	0.80±0.18	0.86±0.19
Northridge	0.62±0.18	0.69±0.20	0.79±0.24	0.86±0.25	0.90±0.25
Loma Prieta	0.88±0.16 ^{ac}	0.92±0.18 ^a	0.94±0.19	0.92±0.18	1.00±0.00
Turquía	0.63±0.17	0.69±0.19	0.78±0.21	0.88±0.23	0.92±0.23
Michoacán	0.50±0.11 ^{bc}	0.56±0.15 ^a	0.60±0.14	0.73±0.16	0.86±0.19
Miyagi-Oki	0.65±0.14	0.72±0.18	0.79±0.21	0.78±0.21	0.88±0.27

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.20 (b). Efecto del sismo en las estructuras con un amortiguador: Sistema de muros. $T = 0.20\text{seg.}$
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
El Centro	0.64 ± 0.05^{ak}	0.68 ± 0.05^{ab}	0.76 ± 0.06^{ak}	0.86 ± 0.06^a	0.94 ± 0.07
Taft	0.71 ± 0.03^{cghl}	0.75 ± 0.05^{cd}	0.82 ± 0.06^{bcd}	0.89 ± 0.07	0.95 ± 0.07
Chile	0.61 ± 0.04^{bcg}	0.66 ± 0.04^{efg}	0.73 ± 0.05^{ef}	0.83 ± 0.05^a	0.93 ± 0.07
Kobe	0.88 ± 0.01^{bcdhjk}	0.89 ± 0.02^{acehijk}	0.92 ± 0.03^{eghijk}	0.95 ± 0.03^{bc}	0.97 ± 0.03
San Fernando	0.76 ± 0.05^{abdie}	0.82 ± 0.06^{flmn}	0.86 ± 0.03^{bfl}	0.91 ± 0.07	0.93 ± 0.08
Northridge	0.66 ± 0.06^e	0.70 ± 0.05^{hl}	0.77 ± 0.06^{gm}	0.88 ± 0.06	0.95 ± 0.07
Loma Prieta	0.97 ± 0.05^{adfl}	0.99 ± 0.06^{bdglño}	0.99 ± 0.02^{adfmnop}	0.99 ± 0.07^{ade}	1.01 ± 0.08
Turquía	0.70 ± 0.04^{fj}	0.72 ± 0.04^{iñ}	0.80 ± 0.05^{hn}	0.89 ± 0.05	0.95 ± 0.06
Michoacán	0.60 ± 0.02^{fhil}	0.62 ± 0.03^{jm}	0.69 ± 0.03^{bhio}	0.81 ± 0.04^{bd}	0.92 ± 0.04
Miyagi-Oki	0.67 ± 0.05^d	0.71 ± 0.05^{kno}	0.72 ± 0.07^{cjp}	0.80 ± 0.07^{ce}	0.92 ± 0.09

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.21 (a). Efecto del sismo en las estructuras con un amortiguador: Sistema Aporticado. $T = 2.00\text{seg}$.
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
El Centro	0.73±0.26	0.82±0.27	0.74±0.22	0.79±0.32	0.85±0.37
Taft	0.83±0.27	0.94±0.33	0.87±0.32	0.83±0.39	0.82±0.36
Chile	0.90±0.34	0.92±0.30	0.85±0.27	0.84±0.33	0.87±0.37
Kobe	0.73±0.10	0.91±0.33	0.84±0.29	0.74±0.35	0.83±0.37
San Fernando	0.94±0.32	1.01±0.34	0.96±0.35	0.91±0.32	0.90±0.35
Northridge	0.84±0.36	0.80±0.29	0.75±0.25	0.89±0.33	0.93±0.39
Loma Prieta	0.75±0.20	0.78±0.26	0.79±0.30	0.82±0.34	0.83±0.38
Turquía	0.80±0.21	0.91±0.26	0.91±0.30	0.86±0.33	0.89±0.32
Michoacán	0.51±0.16	0.57±0.19	0.62±0.19	0.74±0.24	0.83±0.27
Miyagi-Oki	0.85±0.38	0.76±0.28	0.79±0.30	0.93±0.33	0.92±0.42

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.21 (b). Efecto del sismo en las estructuras con un amortiguador: Sistema de muros. $T = 2.00\text{seg}$.
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
El Centro	0.71±0.08	0.84±0.09	0.78±0.08	0.78±0.18	0.87±0.23
Taft	0.80±0.14	0.89±0.11 ^a	0.85±0.13	0.83±0.25	0.84±0.24
Chile	0.70±0.11	0.83±0.12	0.80±0.09	0.79±0.17	0.89±0.22
Kobe	0.70±0.12	0.87±0.12	0.84±0.11	0.80±0.19	0.85±0.23
San Fernando	0.89±0.12 ^a	0.92±0.11	0.93±0.13	0.93±0.12	0.92±0.20
Northridge	0.78±0.13	0.85±0.13 ^b	0.81±0.11	0.87±0.18	0.93±0.27
Loma Prieta	0.75±0.18	0.79±0.12	0.80±0.13	0.71±0.16	0.85±0.27
Turquía	0.83±0.05	0.90±0.07 ^c	0.91±0.13	0.89±0.18	0.94±0.15
Michoacán	0.60±0.04 ^a	0.66±0.08 ^{abc}	0.70±0.06	0.80±0.09	0.89±0.11
Miyagi-Okí	0.76±0.15	0.78±0.13	0.80±0.13	0.88±0.14	0.92±0.29

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.22 (a). Efecto del sismo en las estructuras con tres amortiguadores: Sistema Aporticado. $T = 0.20\text{seg.}$
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso a 3	Caso b 3	Caso c 3	Caso d 3	Caso e 3	Caso f 3
El Centro	0.59±0.14	0.50±0.10 ^{ab}	0.43±0.06 ^{ab}	0.50±0.11 ^a	0.56±0.14 ^a	0.51±0.07
Taft	0.66±0.14	0.52±0.05 ^{cd}	0.51±0.03 ^{cdefg}	0.53±0.07 ^{bc}	0.58±0.10 ^{bc}	0.58±0.07
Chile	0.56±0.14 ^a	0.43±0.07 ^{ef}	0.40±0.03 ^{chi}	0.43±0.07 ^{de}	0.47±0.08 ^{de}	0.46±0.05 ^{abc}
Kobe	0.80±0.03 ^b	0.77±0.01 ^{acehij}	0.76±0.01 ^{acegjk}	0.77±0.02 ^{abdfghi}	0.79±0.04 ^{abdfghi}	0.79±0.03 ^{ade}
San Fernando	0.62±0.12	0.61±0.09 ^{eklm}	0.62±0.06 ^{adhlmno}	0.62±0.09 ^{djkl}	0.69±0.11 ^j	0.54±0.24
Northridge	0.62±0.12	0.41±0.08 ^{gkn}	0.37±0.03 ^{elp}	0.42±0.08 ^{fjm}	0.51±0.12 ^{fk}	0.46±0.06 ^{dfg}
Loma Prieta	0.88±0.16 ^{ac}	0.80±0.07 ^{bdfilmnopq}	0.80±0.03 ^{bfilmno}	0.81±0.08 ^{acekmnlo}	0.86±0.11 ^{acekmnl}	0.85±0.07 ^{bfn}
Turquía	0.63±0.17	0.47±0.06 ^{ho}	0.47±0.02 ^{im}	0.48±0.07 ^{gn}	0.53±0.10 ^{gl}	0.51±0.05 ^{cgi}
Michoacán	0.50±0.11 ^{bc}	0.41±0.04 ^{impq}	0.42±0.01 ^{gn}	0.42±0.04 ^{hl}	0.45±0.06 ^{hjm}	0.46±0.03 ^{ehi}
Miyagi-Oki	0.65±0.14	0.48±0.06 ^j	0.46±0.03 ^{kop}	0.49±0.07 ^{io}	0.55±0.10 ⁱⁿ	0.52±0.07

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.22 (b). Efecto del sismo en las estructuras con tres amortiguadores: Sistema Aporticado. $T = 2.00\text{seg.}$
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso a 3	Caso b 3	Caso c 3	Caso d 3	Caso e 3	Caso f 3
El Centro	0.73±0.26	0.57±0.16	0.53±0.05	0.57±0.15	0.68±0.15	0.58±0.13
Taft	0.83±0.27	0.66±0.19	0.57±0.02 ^a	0.67±0.18	0.80±0.23	0.70±0.26
Chile	0.90±0.34	0.54±0.16	0.45±0.06	0.54±0.14	0.72±0.20	0.56±0.13
Kobe	0.73±0.10	0.57±0.18	0.48±0.10	0.58±0.18	0.71±0.23	0.55±0.16
San Fernando	0.94±0.32	0.77±0.24 ^a	0.62±0.13 ^b	0.79±0.25 ^a	0.87±0.27	0.74±0.17
Northridge	0.84±0.36	0.62±0.17	0.47±0.10	0.62±0.17	0.66±0.23	0.52±0.14
Loma Prieta	0.75±0.20	0.56±0.26	0.47±0.15	0.57±0.25	0.65±0.23	0.56±0.20
Turquía	0.80±0.21	0.63±0.11	0.56±0.08 ^c	0.63±0.11	0.78±0.22	0.68±0.20
Michoacán	0.51±0.16	0.37±0.07 ^a	0.33±0.03 ^{abc}	0.37±0.08 ^a	0.44±0.11	0.40±0.07
Miyagi-Okí	0.85±0.38	0.62±0.23	0.47±0.14	0.60±0.22	0.64±0.24	0.48±0.12

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.23 (a). Efecto del sismo en las estructuras con tres amortiguadores: Sistema de muros. $T = 0.20\text{seg.}$
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso a 3	Caso b 3	Caso c 3	Caso d 3	Caso e 3	Caso f 3
El Centro	0.64 ± 0.05^{ab}	0.62 ± 0.02^{ab}	0.66 ± 0.01^a	0.63 ± 0.03^a	0.66 ± 0.03^a	0.67 ± 0.01^{abc}
Taft	0.71 ± 0.03^{cde}	0.66 ± 0.02^{cdep}	0.72 ± 0.01^{bc}	0.68 ± 0.02^{bc}	0.70 ± 0.04^{bc}	0.75 ± 0.01^{def}
Chile	0.61 ± 0.04^{cf}	0.58 ± 0.02^{cfo}	0.65 ± 0.01^{bd}	0.59 ± 0.02^b	0.63 ± 0.02^{de}	0.68 ± 0.01^{dhij}
Kobe	0.88 ± 0.01^{acghi}	0.89 ± 0.00^{acdehi}	0.91 ± 0.01^{abefgh}	0.89 ± 0.01^{abdefg}	0.90 ± 0.01^{abdfgh}	0.91 ± 0.01^{bchklm}
San Fernando	0.76 ± 0.05^{afgjk}	0.80 ± 0.04^{adfgklm}	0.83 ± 0.02^{abgijk}	0.80 ± 0.03^{abhijk}	0.84 ± 0.02^{aceijkl}	0.85 ± 0.03^{aginop}
Northridge	0.66 ± 0.06^{gl}	0.61 ± 0.03^{gjn}	0.66 ± 0.00^{ejl}	0.62 ± 0.03^{dhl}	0.66 ± 0.02^{fim}	0.70 ± 0.01^{kn}
Loma Prieta	0.97 ± 0.05^{bdfilmn}	0.96 ± 0.04^{bdnopqr}	0.96 ± 0.05^{acdilmno}	0.99 ± 0.04^{abclmno}	0.97 ± 0.04^{acelmno}	0.97 ± 0.04^{ajnopq}
Turquía	0.70 ± 0.04^{hm}	0.65 ± 0.01^{hkp}	0.70 ± 0.00^{fim}	0.66 ± 0.01^{eim}	0.70 ± 0.02^{gjn}	0.74 ± 0.01^{clo}
Michoacán	0.60 ± 0.02^{ehjm}	0.59 ± 0.00^{ehlq}	0.65 ± 0.01^{cgn}	0.60 ± 0.01^{cfjkm}	0.63 ± 0.02^{gkn}	0.67 ± 0.01^{fmp}
Miyagi-Oki	0.67 ± 0.05^{ikn}	0.64 ± 0.05^{imr}	0.67 ± 0.07^{hko}	0.66 ± 0.06^{gkn}	0.68 ± 0.06^{hl}	0.68 ± 0.07^{egq}

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.23 (b). Efecto del sismo en las estructuras con tres amortiguadores: Sistema de muros. T = 2.00seg.
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso a 3	Caso b 3	Caso c 3	Caso d 3	Caso e 3	Caso f 3
El Centro	0.71±0.08	0.68±0.07	0.69±0.07	0.70±0.06	0.77±0.05	0.69±0.10
Taft	0.80±0.14	0.73±0.12 ^a	0.75±0.11	0.75±0.10 ^a	0.81±0.07 ^a	0.77±0.15
Chile	0.70±0.11	0.62±0.05 ^{bc}	0.65±0.03 ^{ab}	0.63±0.05 ^{bc}	0.76±0.05	0.65±0.10
Kobe	0.70±0.12	0.64±0.07 ^d	0.67±0.07 ^c	0.65±0.04 ^{de}	0.78±0.05 ^b	0.68±0.10
San Fernando	0.89±0.12 ^a	0.83±0.08 ^{bcdefg}	0.82±0.08 ^{acdef}	0.84±0.08 ^{bcdfgh}	0.86±0.08 ^c	0.84±0.07
Northridge	0.78±0.13	0.68±0.06	0.72±0.07	0.70±0.06 ^b	0.80±0.10 ^d	0.71±0.12
Loma Prieta	0.75±0.18	0.64±0.10 ^e	0.65±0.04 ^{dg}	0.66±0.09 ^f	0.73±0.07	0.70±0.10
Turquía	0.83±0.05	0.78±0.03 ^{ch}	0.80±0.04 ^{bgh}	0.79±0.01 ^{cei}	0.86±0.05 ^e	0.82±0.07
Michoacán	0.60±0.04 ^a	0.56±0.01 ^{afh}	0.63±0.02 ^{eh}	0.58±0.03 ^{agi}	0.63±0.04 ^{abcde}	0.65±0.02
Miyagi-Oki	0.76±0.15	0.66±0.07 ^g	0.68±0.04 ^f	0.68±0.07 ^h	0.72±0.11	0.67±0.09

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.24 (a). Efecto del sismo en las estructuras con cinco amortiguadores: Sistema Aporticado.

T = 0.20seg. (Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso a 5	Caso b 5	Caso c 5	Caso d 5	Caso e 5	Caso f 5
El Centro	0.48±0.01 ^{ab}	0.44±0.02 ^{ab}	0.44±0.06 ^{ab}	0.49±0.10 ^{abc}	0.50±0.07 ^{ab}	0.59±0.14
Taft	0.55±0.04 ^{acde}	0.52±0.01 ^{acde}	0.51±0.02 ^{cde}	0.51±0.05 ^{de}	0.56±0.05 ^{cd}	0.66±0.14
Chile	0.43±0.02 ^{cfg}	0.40±0.01 ^{cfg}	0.40±0.03 ^{cf}	0.42±0.06 ^{abdghi}	0.45±0.05 ^{ef}	0.56±0.14 ^a
Kobe	0.80±0.02 ^{adefg}	0.77±0.01 ^{acegh}	0.76±0.01 ^{acghi}	0.77±0.01 ^{fgj}	0.79±0.03 ^{aceghij}	0.80±0.03 ^b
San Fernando	0.63±0.03 ^{achij}	0.60±0.03 ^{acdh}	0.61±0.07 ^{acgij}	0.61±0.09 ^{bjk}	0.63±0.08 ^{aegikl}	0.62±0.12
Northridge	0.42±0.01 ^{dhk}	0.39±0.03 ^{bcdi}	0.38±0.04 ^{dgk}	0.41±0.07 ^{cefklm}	0.45±0.05 ^{gm}	0.62±0.18
Loma Prieta	0.84±0.04 ^{bcklm}	0.81±0.02 ^{bdfj}	0.80±0.03 ^{bdfjkl}	0.80±0.06 ^{hl}	0.82±0.05 ^{bdfklmn}	0.88±0.16 ^{ac}
Turquía	0.52±0.02 ^{fhl}	0.48±0.01 ^{ehj}	0.46±0.02 ^{gl}	0.47±0.06 ^{hl}	0.50±0.04 ^{hk}	0.63±0.17
Michoacán	0.47±0.01 ^{eim}	0.44±0.01 ^{ehj}	0.41±0.01 ^{ehj}	0.41±0.03 ^{cg}	0.46±0.02 ⁱⁿ	0.50±0.11 ^{bc}
Miyagi-Oki	0.52±0.06 ^{gjk}	0.47±0.04 ^{dg}	0.46±0.02 ^{ik}	0.48±0.06 ^{im}	0.51±0.06 ^{jl}	0.65±0.14

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.24 (b). Efecto del sismo en las estructuras con cinco amortiguadores: Sistema Aporticado.

T = 2.00seg. (Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso a 5	Caso b 5	Caso c 5	Caso d 5	Caso e 5	Caso f 5
El Centro	0.43±0.09	0.49±0.08 ^a	0.52±0.07	0.57±0.16	0.53±0.17	0.73±0.26
Taft	0.55±0.17	0.53±0.11 ^b	0.56±0.06 ^a	0.65±0.18	0.62±0.22	0.83±0.27
Chile	0.43±0.10	0.43±0.08	0.45±0.08	0.52±0.16	0.50±0.17	0.90±0.34
Kobe	0.42±0.11	0.42±0.07	0.48±0.10	0.57±0.19	0.50±0.17	0.73±0.10
San Fernando	0.58±0.08	0.56±0.04 ^{cd}	0.63±0.14 ^b	0.77±0.24 ^a	0.68±0.19	0.94±0.32
Northridge	0.44±0.12	0.45±0.06	0.48±0.10	0.63±0.17	0.50±0.16	0.84±0.36
Loma Prieta	0.40±0.12	0.42±0.10	0.48±0.16	0.56±0.27	0.50±0.23	0.75±0.20
Turquía	0.54±0.09	0.53±0.05 ^e	0.56±0.07 ^c	0.62±0.10	0.63±0.12	0.80±0.21
Michoacán	0.36±0.04	0.32±0.02 ^{abce}	0.33±0.03 ^{abc}	0.36±0.07 ^a	0.38±0.06	0.51±0.16
Miyagi-Oki	0.38±0.08	0.39±0.03 ^d	0.48±0.15	0.62±0.23	0.50±0.20	0.85±0.38

La tabla muestra los valores medios de β_p ± la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.25 (a). Efecto del sismo en las estructuras con cinco amortiguadores: Sistema de muros. T = 0.20seg.
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso a 5	Caso b 5	Caso c 5	Caso d 5	Caso e 5	Caso f 5
El Centro	0.68±0.00 ^{ab}	0.63±0.01 ^a	0.62±0.01 ^a	0.62±0.02 ^a	0.66±0.01 ^{ab}	0.64±0.05 ^{ab}
Taft	0.74±0.00 ^{abcj}	0.70±0.01 ^{abcd}	0.68±0.01 ^{bcd}	0.66±0.01 ^{bcd}	0.75±0.02 ^{abcde}	0.71±0.03 ^{cd}
Chile	0.69±0.01 ^{de}	0.62±0.01 ^{bce}	0.59±0.01 ^{bef}	0.58±0.01 ^{bef}	0.67±0.02 ^{ef}	0.61±0.04 ^{ce}
Kobe	0.92±0.01 ^{acdfgh}	0.90±0.01 ^{abdfgh}	0.89±0.01 ^{abeghi}	0.88±0.00 ^{abcgh}	0.91±0.01 ^{ae hij}	0.88±0.01 ^{acdfgh}
San Fernando	0.83±0.03 ^{adijkl}	0.82±0.03 ^{acdgi}	0.80±0.03 ^{abjklm}	0.78±0.03 ^{abcegi}	0.83±0.05 ^{bklmn}	0.76±0.05 ^{aefij}
Northridge	0.70±0.01 ^{fi}	0.64±0.01 ^{cfj}	0.61±0.01 ^{cgj}	0.60±0.03 ^{cj}	0.68±0.01 ^{cgk}	0.66±0.06 ^{fk}
Loma Prieta	0.97±0.05 ^{beilmn}	0.96±0.04 ^{aegijkl}	0.96±0.04 ^{abckln}	0.96±0.04 ^{abgijkl}	0.97±0.05 ^{bkllop}	0.97±0.05 ^{bdeklm}
Turquía	0.73±0.01 ^{gjm}	0.68±0.00 ^g	0.65±0.00 ^{ek}	0.65±0.01 ^{ekm}	0.72±0.01 ^{hl}	0.70±0.04 ^{gl}
Michoacán	0.68±0.01 ^{ckn}	0.62±0.01 ^{dk}	0.60±0.01 ^{dhl}	0.59±0.00 ^{dglm}	0.67±0.01 ^{dimo}	0.60±0.02 ^{dgi}
Miyagi-Oki	0.69±0.07 ^{hl}	0.68±0.06 ^{hil}	0.65±0.06 ^{fi mn}	0.64±0.05 ^{fghi}	0.69±0.07 ^{jnp}	0.67±0.05 ^{hjm}

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Tabla 4.25 (b). Efecto del sismo en las estructuras con cinco amortiguadores: Sistema de muros. T = 2.00seg.
(Expresado como valores de β_p)

Sismo	Caso a 5	Caso b 5	Caso c 5	Caso d 5	Caso e 5	Caso f 5
El Centro	0.66±0.13	0.65±0.10	0.67±0.07 ^{ab}	0.68±0.07	0.67±0.14	0.71±0.08
Taft	0.74±0.16	0.72±0.13	0.72±0.11 ^c	0.73±0.12 ^a	0.75±0.16	0.80±0.14
Chile	0.63±0.08	0.61±0.06 ^a	0.61±0.03 ^{de}	0.62±0.05 ^{bc}	0.65±0.10	0.70±0.11
Kobe	0.65±0.14	0.63±0.10	0.63±0.07 ^{fg}	0.64±0.07 ^d	0.67±0.14	0.70±0.12
San Fernando	0.82±0.08	0.79±0.07 ^{abcd}	0.80±0.07 ^{adfhij}	0.82±0.08 ^{bdfgh}	0.82±0.10	0.89±0.12 ^a
Northridge	0.68±0.13	0.67±0.09	0.68±0.06	0.67±0.05 ^e	0.70±0.12	0.78±0.13
Loma Prieta	0.62±0.13	0.61±0.08 ^b	0.62±0.04 ^{hk}	0.64±0.10 ^f	0.64±0.14	0.75±0.18
Turquía	0.83±0.05	0.77±0.05 ^e	0.80±0.04 ^{begklm}	0.78±0.02 ^{ci}	0.81±0.06	0.83±0.05
Michoacán	0.65±0.03	0.59±0.02 ^{ce}	0.57±0.02 ^{cil}	0.56±0.01 ^{agi}	0.64±0.03	0.60±0.04 ^a
Miyagi-Oki	0.64±0.09	0.62±0.05 ^d	0.64±0.05 ^{jm}	0.66±0.06 ^h	0.68±0.12	0.76±0.15

La tabla muestra los valores medios de $\beta_p \pm$ la desviación estándar de cinco mediciones

Los valores medios en cada columna con letras iguales son estadísticamente significativos para un ANOVA y una prueba de rango múltiple de Tukey con un valor de $p < 0.05$

Los valores medios en cada columna sin letras son estadísticamente no significativos para un ANOVA con un valor de $p < 0.05$

Capítulo 5

Comparación entre el método simplificado y el método de integración directa

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se comparan dos métodos de análisis utilizados para obtener la respuesta de estructuras con amortiguadores. El primero, el método simplificado, es utilizado por defecto en la mayoría de los programas comerciales de análisis estructural. En este método tal y como se explica en el capítulo 3 se emplea el método de superposición modal clásico de igual manera que para las estructuras tradicionales sin amortiguadores, por lo que se omiten una serie de condiciones que acompañan a las estructuras con amortiguamiento adicional y que influyen notablemente en el comportamiento de las mismas. El segundo método, el de integración directa, supone la obtención de una respuesta más exacta para este tipo de estructuras ya que se consideran todas las particularidades que se derivan de su análisis.

Se contrastan las respuestas obtenidas por ambos métodos con la finalidad de evaluar el error que se comete al utilizar el método simplificado para analizar estructuras amortiguadas. Asimismo, se investigan los factores que pueden magnificar o reducir este error, tales como: el período de la estructura, la posición y distribución de los amortiguadores, y la excitación sísmica.

5.2 SISTEMAS Y PROPIEDADES

Este estudio se lleva a cabo utilizando el sistema aporticado definido en la sección 4.2 y mostrado en la figura 4.1. Igualmente sus propiedades pueden observarse en la tabla 4.1. En cuanto a las configuraciones con amortiguadores se utilizan aquellas correspondientes a la estructura con un amortiguador (Figura 4.4), con tres amortiguadores (Figura 4.6) y con cinco amortiguadores (Figura 4.7). Las excitaciones sísmicas consideradas son las expuestas en la tabla 4.2.

5.3 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Se definen a continuación dos parámetros adimensionales para estimar el error en el cálculo de la respuesta de la estructura con amortiguadores. El primer parámetro e_i , se obtiene a través del cociente entre la respuesta máxima de la estructura con amortiguadores obtenida con el método simplificado (Respuesta aproximada, R_a) y la respuesta máxima de la misma estructura obtenida con el método de integración directa (Respuesta exacta, R_e), ambas representadas por las derivas de entrepiso conseguidas en cada caso. Este parámetro evalúa la relación entre ambas respuestas en cada entrepiso i , puede decirse que es una medida del local del error que se comete en el cálculo de la respuesta de la estructura con el método simplificado. Así pues e_i queda definido como:

$$e_i = \frac{R_{a_i}}{R_{e_i}} \quad (5.1)$$

El parámetro e_p (e promedio) evalúa el error global en el cálculo de la respuesta de la estructura con el método simplificado, ya que se trata del valor promedio de e_i para todo el edificio.

$$e_p = \left(\sum_{i=1}^n \frac{R_{a_i}}{R_{e_i}} \right) * \frac{1}{n} \quad (5.2)$$

Donde n es el número de pisos del sistema.

Nótese que un valor de e cercano a uno indica un menor error en el cálculo de la respuesta de la estructura con el método simplificado, mientras que un valor cercano a cero o muy alejado de uno indica un error mayor.

Los resultados se presentan a través de gráficas que exponen los valores de los parámetros definidos anteriormente correspondientes a las distribuciones de amortiguadores adoptadas, estos valores se muestran para cada una de las excitaciones sísmicas utilizadas, asimismo se destaca en cada una de las gráficas el resultado promedio para todos los sismos. Resulta oportuno destacar que se consideró la selección más adecuada posible para el paso de integración (Δt) usado en la integración directa, este paso puede ser distinto para cada excitación.

5.4 ERROR EN EL CÁLCULO DE LA RESPUESTA MÁXIMA

5.4.1 Estructuras con un amortiguador

La figura 5.1 muestra los resultados correspondientes a las estructuras aporticadas con un solo amortiguador, puede notarse en primer lugar que la tendencia para ambos períodos es similar, la mayor diferencia entre las respuestas se da para el Caso 1, es decir, el amortiguador ubicado en el primer entrepiso. Particularmente, para las estructuras con $T = 0.20$ seg., se obtienen para este caso valores de e_p alrededor de 0.70 en término medio, mientras que en los sistemas con $T = 2.00$ seg., éste valor está sobre 0.55.

Luego, cuando el amortiguador se ubica en los niveles superiores la diferencia entre las respuestas disminuye, principalmente para el Caso 5 donde el parámetro e_p es muy cercano a 1.00.

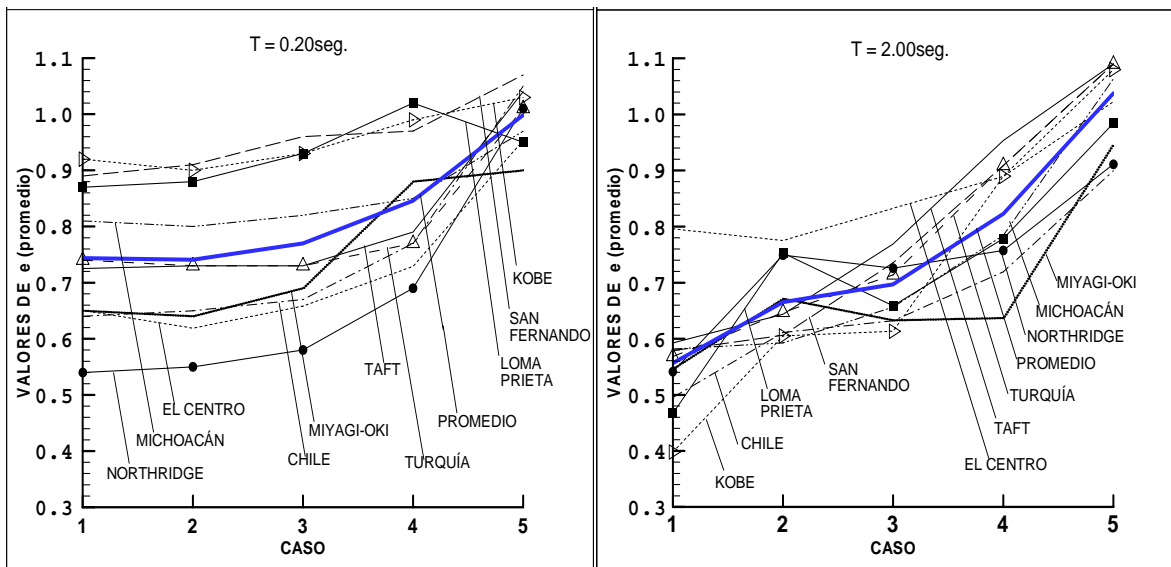


Figura 5.1. Error en el cálculo de la respuesta máxima para estructuras con un amortiguador.

Cabe mencionar que en las estructuras de período corto se observa que los sismos que tienen poco efecto sobre los amortiguadores, tales como: Kobe, San Fernando y Loma prieta, producen valores de e_p cercanos a uno para todos los casos estudiados. Por el contrario, para los sismos que tienen mayor efecto, tales como: Northridge, Chile y El Centro, los valores de e_p son bastante menores. Este efecto no es tan manifiesto en las estructuras de período largo.

Lo anteriormente expuesto permite inferir varias cosas, la primera, es que el error en el cálculo de la respuesta máxima obtenida con el método simplificado de las estructuras con un amortiguador es sensible a la posición del amortiguador. Es mayor cuando el dispositivo se ubica en los entrepisos inferiores, donde tiene mayor efecto sobre la reducción de la respuesta, y es muy pequeño cuando el amortiguador se ubica en el último entrepiso, en el que prácticamente no influye en la respuesta de la estructura. Por otro lado, el período de la estructura también influye en la magnitud del error cometido, para el período largo se consiguen errores mayores que los obtenidos para el período corto, aunque la tendencia en

el comportamiento es la misma. Finalmente, la excitación sísmica también repercute sobre la medida del error, esto puede ser observado principalmente en las estructuras de período corto, así se tiene que cuando el sismo tiene más efecto sobre los amortiguadores, el error cometido en el cálculo de la respuesta con el método simplificado es mucho mayor.

5.4.2 Estructuras con tres amortiguadores

En la figura 5.2 se presentan los resultados obtenidos para las estructuras aporticadas con tres amortiguadores. Se aprecia que al utilizar más de un amortiguador la distribución de los mismos tiene una influencia notable en el error cometido al calcular la respuesta máxima con el método simplificado, esto se cumple para todos los sistemas investigados. Llama particularmente la atención los casos c 3 y f 3, en los cuales los valores de e_p están cercanos a 1.00, lo que se traduce en un error muy pequeño, principalmente en el caso c 3, con una dispersión muy pequeña entre las respuestas obtenidas para todos los sismos empleados. Estos casos se caracterizan por distribuir de manera uniforme los dispositivos, ubicando un amortiguador por piso, comenzando por los entrepisos más bajos (ver figura 4.6).

La distribución que arroja los menores valores de e_p , es decir, mayor error, corresponde al caso a 3 en el que todos los amortiguadores se concentran en un solo piso, el primero. Los valores oscilan alrededor de 0.70 para los sistemas con período corto y alrededor de 0.55 para los sistemas con período largo, siendo equivalente al resultado obtenido para el caso 1 discutido en la sección anterior. Luego, cuando los amortiguadores se van distribuyendo en más de un piso la relación entre la respuesta exacta y la respuesta aproximada va aumentando, es decir, el error va disminuyendo. Los valores de e_p están entre 0.85 y 0.90 en término medio en los casos b 3, d 3 y e 3 para la estructura con $T = 0.20$ seg., y entre 0.70 y 0.75 para los mismos casos en la estructura con $T = 2.00$ seg.

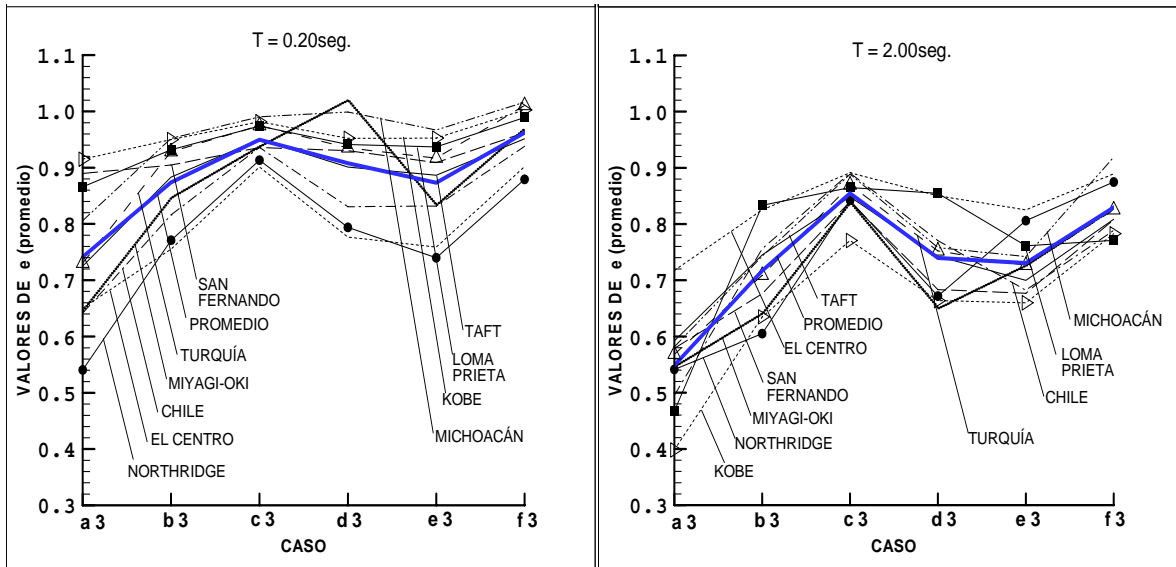


Figura 5.2. Error en el cálculo de la respuesta máxima para estructuras con tres amortiguadores.

5.4.3 Estructuras con cinco amortiguadores

Los resultados pertenecientes a las estructuras aporticadas con cinco amortiguadores pueden ser vistos en la figura 5.3. Destaca principalmente en las gráficas el caso a 5, ya que para los dos períodos estudiados la relación entre las respuestas obtenidas según los métodos investigados es muy próxima a 1.00, hecho que se cumple para todos los sismos analizados. Esto quiere decir que el error cometido es mínimo. El caso a 5 tiene una distribución uniforme del amortiguamiento en la estructura, puesto que se coloca un amortiguador por piso, en todos los pisos, ver figura 4.7.

Analizando lo que ocurre con los casos restantes, nuevamente se comprueba que la distribución de los amortiguadores tiene gran influencia en el error que se comete al calcular la respuesta máxima de la estructura con el método simplificado. Para los casos b 5, c 5 y d 5, en los que progresivamente se van concentrando los dispositivos en los pisos inferiores, se aprecia como los valores

de e_p van descendiendo desde 0.90 hasta 0.85 en las estructuras con período corto y desde 0.90 hasta 0.75 en las estructuras con período largo.

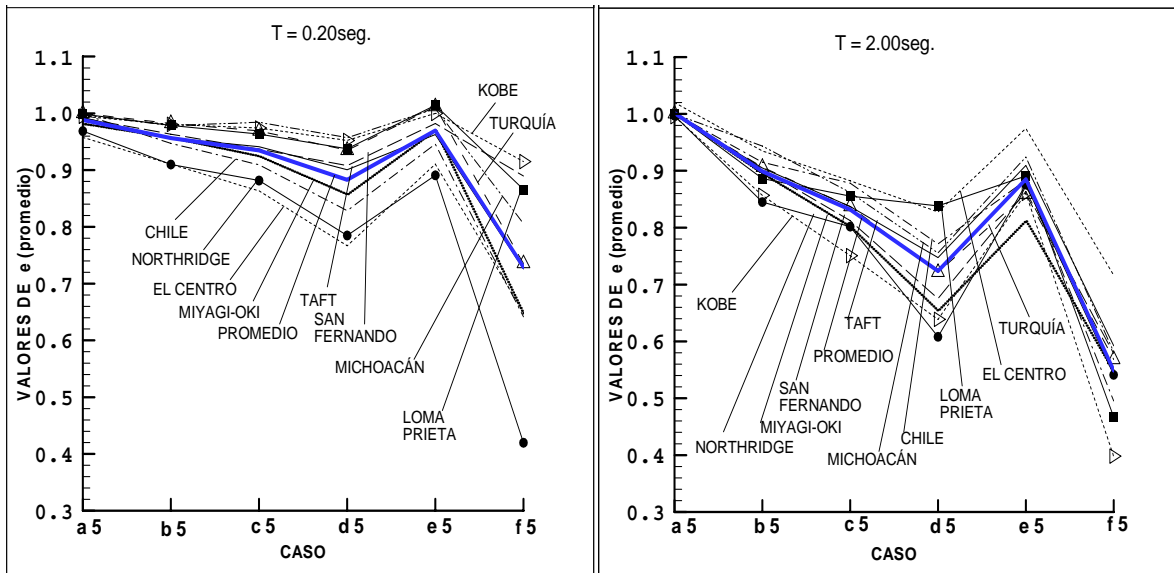


Figura 5.3. Error en el cálculo de la respuesta máxima para estructuras con cinco amortiguadores.

La distribución menos favorable resulta ser la correspondiente al caso f 5, cuyos resultados son equivalentes a los obtenidos para los casos 1 y a 3 discutidos anteriormente. En el caso f 5 los cinco amortiguadores se concentran en el primer piso, lo que se traduce en una distribución dispar del amortiguamiento.

El caso e 5 también se distingue en las gráficas debido a que los valores de e_p conseguidos están alrededor de 0.95 y 0.90 en término medio para cada uno de los períodos estudiados. Este caso tiene una distribución de amortiguadores muy particular, ya que concentra tres de los dispositivos en los dos primeros pisos y el resto en el último piso, por lo tanto hay un arreglo más uniforme de los disipadores de energía.

5.4.4 Comentarios finales

En la figura 5.4 se comparan los casos de estudio más relevantes, estos son: el caso 1, el caso c 3 y el caso a 5. Se presentan los valores de e_i en término medio para todos los sismos estudiados. Es evidente que la cantidad y distribución de los amortiguadores en la estructura influyen totalmente en los resultados obtenidos al aplicar el método simplificado. A medida que los amortiguadores se distribuyen uniforme y equitativamente en todos los pisos de la estructura, los mecanismos de disipación de energía en las diferentes partes del edificio no presentan variaciones drásticas, en consecuencia el sistema se aproxima a la situación de amortiguamiento clásico, en la cual se verifica que la matriz de amortiguamiento \mathbf{C} satisface condiciones de ortogonalidad, por lo tanto la matriz de amortiguamiento generalizada \mathbf{C}^* es diagonal. Esto conlleva a que mientras más uniforme sea la distribución del amortiguamiento en el sistema mayor validez adquiere el método simplificado como método de cálculo para estructuras con amortiguadores. Por el contrario, en el caso 1 y sus equivalentes (a 3, f 5) al concentrarse todo el amortiguamiento en un solo piso, los mecanismos de disipación de energía de la estructura varían en forma muy dispar, magnificándose el grado de amortiguamiento no clásico en el sistema y por ende se pierde exactitud al calcular la respuesta con el método simplificado. Todo esto coincide con lo encontrado por Grecco y Santini (2002) al estudiar algunos de los métodos de análisis para estructuras con amortiguadores. En el mencionado trabajo la magnitud del error en el cálculo de la respuesta se atribuye en gran medida a la distribución del amortiguamiento en las estructuras.

Es claro que el período de la estructura y la excitación sísmica también juegan un papel destacado en el error cometido al calcular la respuesta de la estructura con el método simplificado, ya que repercuten en la magnitud del mismo, sin embargo, estas circunstancias se ven sometidas a la influencia de la cantidad y distribución de los amortiguadores que representan el factor decisivo en la medida del error.

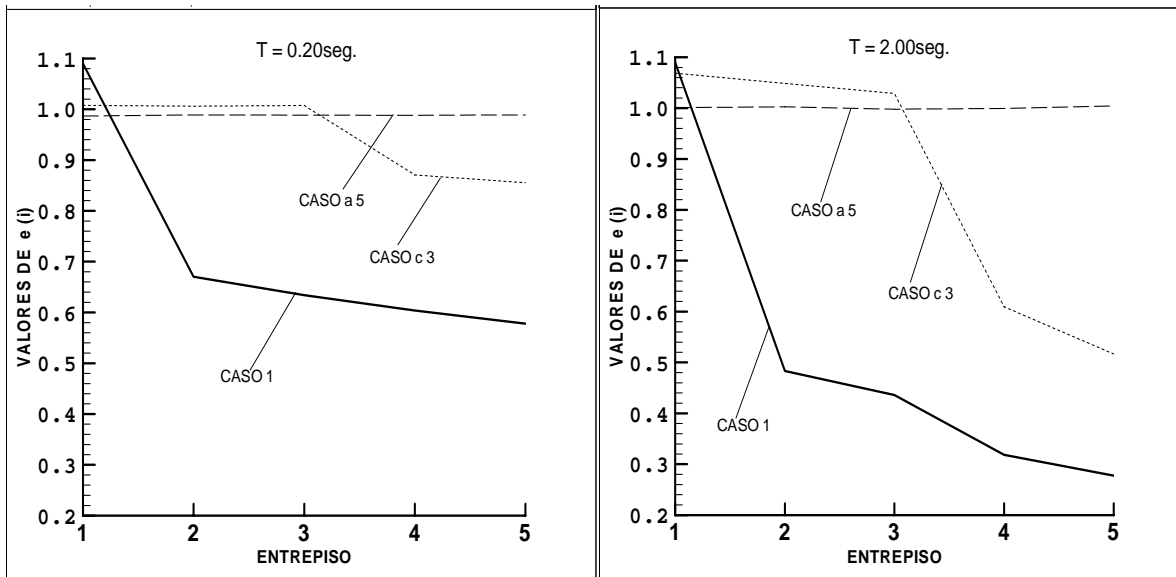


Figura 5.4. Comparación de resultados entre los casos investigados más relevantes.

Los resultados presentados anteriormente fueron validados estadísticamente realizando una correlación de Pearson y una prueba t de student (Steel y Torrie, 1988), utilizando el programa de análisis estadístico SPSS v.13 (SPSS 13.0, 1989-2004), se consideró un nivel de significancia para $\alpha = 0.05$. A continuación en las tablas 5.1 y 5.2 se muestran los resultados correspondientes a los casos más relevantes, para las estructuras con $T = 0.20\text{seg}$. y $T = 2.00\text{seg}$. Se aprecian las respuestas en término medio más o menos su desviación estándar obtenidas con el método exacto (ME), con el método simplificado (MS) y el correspondiente coeficiente de correlación (r) entre ambos métodos. Un valor de r cercano a 1.00 indica mayor coincidencia entre los dos métodos, por lo tanto un margen de error menor, mientras que un valor de r cercano a 0.00 se traduce en poca coincidencia entre los dos métodos analizados y por ende una mayor porcentaje de error en el cálculo de la respuesta. Se resaltan con un asterisco los valores que representan una correlación casi perfecta entre los dos métodos estudiados.

Obsérvese como en sintonía con lo discutido anteriormente, para las estructuras con $T = 0.20\text{seg}$. (Tabla 5.1), en el Caso1 se obtienen los menores valores de r , indicando una menor coincidencia entre el método exacto y el método simplificado. En los casos c 3 y a 5 la situación mejora drásticamente y se consiguen valores de r prácticamente iguales a la unidad para todos los sismos estudiados, lo que muestra una correlación casi perfecta entre los dos métodos de análisis.

Tabla 5.1. Análisis de correlación estadística entre el método exacto y el método simplificado para estructuras con $T = 0.20\text{seg}$.

Sismo	Caso 1			Caso c 3			Caso a 5		
	ME	MS	r	ME	MS	r	ME	MS	r
El Centro	0.11±0.04	0.07±0.03	0.59	0.08±0.03	0.08±0.03	0.98 *	0.09±0.04	0.09±0.04	1.00 *
Taft	0.05±0.02	0.04±0.02	0.63	0.04±0.01	0.04±0.02	0.99 *	0.05±0.02	0.04±0.02	1.00 *
Chile	0.07±0.02	0.04±0.02	0.60	0.05±0.02	0.05±0.02	0.99 *	0.06±0.03	0.06±0.03	1.00 *
Kobe	0.21±0.09	0.20±0.10	0.98 *	0.20±0.10	0.20±0.10	1.00 *	0.21±0.10	0.21±0.10	1.00 *
San Fernando	0.31±0.11	0.29±0.14	0.80	0.32±0.12	0.31±0.14	0.99 *	0.34±0.16	0.34±0.16	1.00 *
Northridge	0.14±0.05	0.07±0.03	0.51	0.09±0.03	0.08±0.03	0.99 *	0.10±0.04	0.10±0.04	0.99 *
Loma Prieta	0.23±0.09	0.20±0.10	0.79	0.21±0.09	0.21±0.10	0.99 *	0.23±0.11	0.23±0.11	1.00 *
Turquía	0.08±0.03	0.06±0.03	0.54	0.06±0.03	0.06±0.03	0.99 *	0.07±0.03	0.07±0.03	1.00 *
Michoacán	0.04±0.01	0.03±0.01	0.76	0.04±0.01	0.04±0.01	0.99 *	0.04±0.02	0.04±0.02	1.00 *
Miyagy-Oki	0.08±0.03	0.05±0.02	0.62	0.06±0.02	0.06±0.03	0.99 *	0.07±0.03	0.07±0.03	1.00 *

Para las estructuras con $T = 2.00\text{seg}$. (Tabla 5.2) en sintonía con lo discutido al inicio del capítulo se observa gran coincidencia entre los dos métodos para el Caso a 5, mientras que para el Caso 1 y el Caso c 3 se consigue muy poca correlación entre los dos métodos.

Tabla 5.2. Análisis de correlación estadística entre el método exacto y el método simplificado para estructuras con $T = 2.00\text{seg}$.

Sismo	Caso 1			Caso c 3			Caso a 5		
	ME	MS	r	ME	MS	r	ME	MS	r
El Centro	3.01±0.98	2.02±0.60	-0.34	2.27±0.43	2.08±0.88	0.85	1.96±0.77	2.33±1.03	0.99 *
Taft	1.64±0.59	0.85±0.37	0.14	1.13±0.19	0.98±0.34	0.79	1.12±0.43	1.12±0.43	1.00 *
Chile	2.24±0.75	0.92±0.43	-0.10	1.17±0.24	1.06±0.43	0.67	1.18±0.49	1.18±0.49	1.00 *
Kobe	10.2±1.85	4.20±1.90	0.77	6.65±1.20	5.02±1.84	-0.02	6.19±2.54	6.17±2.56	1.00 *
San Fernando	12.2±4.88	6.00±2.69	0.12	8.02±1.65	6.90±2.58	0.85	8.02±3.08	8.02±3.08	1.00 *
Northridge	0.67±0.25	0.29±0.16	-0.19	0.40±0.11	0.34±0.16	0.73	0.40±0.20	0.39±0.19	1.00 *
Loma Prieta	3.96±0.67	1.74±0.91	-0.27	2.50±0.45	2.07±0.96	-0.25	2.25±0.92	2.25±0.92	1.00 *
Turquía	4.07±1.40	2.18±0.97	0.33	2.84±0.65	2.54±0.97	0.89 *	2.93±1.17	2.94±1.17	1.00 *
Michoacán	2.66±0.84	1.47±0.71	0.28	1.83±0.64	1.70±0.80	0.98 *	2.14±0.98	2.13±0.98	1.00 *
Miyagy-Oki	1.43±0.48	0.62±0.32	-0.28	0.81±0.15	0.68±0.30	0.60	0.73±0.33	0.73±0.33	1.00 *

Cabe destacar que según este análisis, cuando se tiene una distribución uniforme del amortiguamiento en la estructura, hay correlación entre el método simplificado y el método exacto independientemente de la excitación sísmica.

Capítulo 6

Diseño, construcción y evaluación de un disipador de energía metálico

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrolla una propuesta de un nuevo disipador de energía metálico, que pueda ser incluido en edificaciones de baja altura, fabricado con materiales comunes y de relativo bajo costo.

Esta propuesta podría considerarse como una solución viable para la rehabilitación y readecuación sísmica de estructuras existentes de baja altura que así lo requieran, como por ejemplo edificaciones escolares.

Se decidió proponer un disipador de energía metálico debido a las múltiples ventajas que ofrecen este tipo de dispositivos, entre las principales se pueden enumerar las siguientes:

- El proceso de disipación, la plastificación del metal, se puede producir bajo cualquier estado de tensión (flexión, torsión, corte, tracción, compresión)
- Los metales tienen un comportamiento predecible y estable bajo carga alternante
- El material es relativamente económico y fácil de obtener
- Se requiere muy poco mantenimiento de los componentes del disipador
- Su eficiencia no se ve afectada por los cambios de temperatura

En general, el dispositivo propuesto debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Disipación de energía para un rango de pequeños derivas de entrepiso
- Fuerza desarrollada y controlada en un rango apropiado
- Proceso de disipación estable y predecible
- Rigidez importante en el plano de deformación para evitar efectos de torsión
- Factibilidad constructiva y dimensiones manejables
- Fácil desmontaje y reemplazo una vez dañado
- Bajo costo

El capítulo comienza con la concepción geométrica del disipador, descripción del prototipo y su proceso constructivo. Luego se proponen dos modelos para la predicción de la fuerza y desplazamiento que inician el proceso de plastificación, un modelo analítico, basado en la aplicación de conceptos generales de resistencia de materiales, y un modelo numérico, realizado con un programa de elementos finitos. Este último permite estimar la curva fuerza-desplazamiento del dispositivo, asimismo se toma en cuenta el patrón de esfuerzos observados en cada parte del dispositivo, para así predecir puntos y zonas de falla.

Luego, se realiza la evaluación experimental del prototipo con la finalidad de caracterizar el proceso de disipación de energía del dispositivo. Se lleva a cabo un ensayo pseudo-estático que permite obtener las propiedades mecánicas y el comportamiento histerético del disipador. Finalmente, se analiza numéricamente el desempeño del disipador dentro de una estructura, que corresponde al modelo de una edificación escolar existente.

6.2 DISEÑO DEL DISIPADOR

6.2.1 Concepción geométrica

La concepción geométrica del prototipo se llevó a cabo a través de un proceso de selección entre varios modelos propuestos. Los criterios utilizados para la elección del modelo definitivo fueron los siguientes:

- Garantizar un comportamiento inelástico conveniente en las zonas adecuadas para ello
- Disipación de energía de manera estable y predecible a partir de pequeños desplazamientos
- Facilidad de construcción y montaje
- Estabilidad
- Bajo peso propio
- Dimensiones manejables
- Niveles de carga y rango de deformaciones

Se construyeron prototipos primarios en cartón y madera para cada uno de los modelos formulados, la idea inicial de la propuesta se muestra en la Figura 6.1 y consiste en una caja con dos tapas, superior e inferior, unidas por una serie de láminas dispuestas en forma vertical.

Estas láminas deben experimentar deformaciones hasta incursionar en el rango inelástico y a través de este proceso disipar la energía introducida por el sismo. Este primer modelo fue descartado luego de un análisis físico, debido a que durante su funcionamiento el dispositivo podría presentar problemas de pandeo, torsión y falta de rigidez en el sentido perpendicular al canto de las láminas, lo cual conduciría a un rápido agotamiento de la pieza y posterior disminución de su capacidad para disipar energía, por otro lado, el reemplazo de las partes dañadas resultaría complicado.

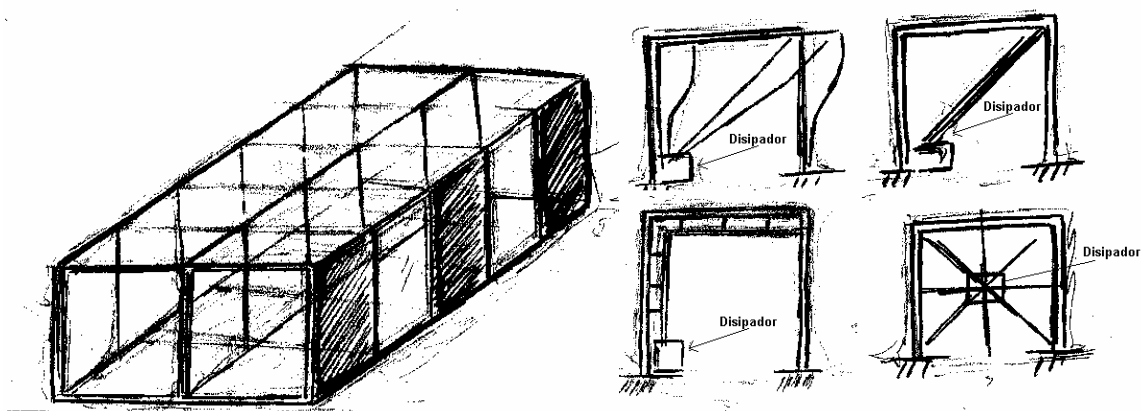


Figura 6.1. Modelo 1 del disipador de energía y sus posibles ubicaciones en la estructura.

El segundo modelo propuesto se muestra en la Figura 6.2, se mantiene la idea de la caja como elemento contenedor y de las láminas como componentes para disipar la energía.

En este caso dichas láminas cambian de orientación, ahora se colocan horizontales, cada una funcionando como una viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro. Esa carga puntual sería aplicada por el componente interior del dispositivo, que consiste en una especie de perfil H con unas ranuras en el centro del alma para permitir el paso de las láminas cedentes.

Este perfil debe ser capaz de deslizarse libremente a través de la caja externa, para provocar la deformación por flexión de las láminas. Las alas superiores deben estar sujetas a la losa superior del entrepiso.

La caja externa está compuesta por dos especies de perfiles canal, en cuya alma se sujetan las láminas cedentes. A su vez las alas inferiores deben ir ancladas a una estructura especialmente diseñada para soporte del dispositivo. De este modelo se construyó un prototipo en cartón (ver Figura 6.3) para estudiar el grado de complejidad de su construcción y manejo de dimensiones.

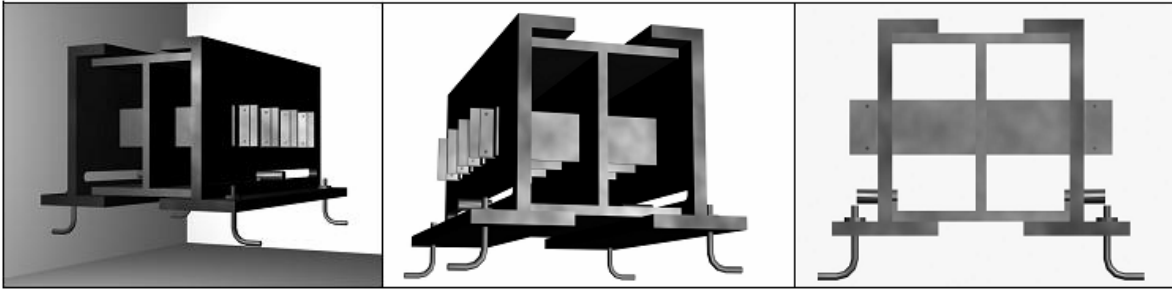


Figura 6.2. Modelo 2. Vistas en perspectiva y Vista frontal.



Figura 6.3. Prototipo del modelo 2. Vista en perspectiva, vista lateral y vista frontal.

El análisis de este prototipo revela algunos inconvenientes desde el punto de vista constructivo, tales como: excesiva flexión en las alas de la caja exterior, lo cual se traduce en deformaciones indeseables para el modelo, dificultad para el montaje y desmontaje del mismo.

Esta última parte resulta muy importante ya que uno de los principales requisitos que debe tener el disipador, es que al agotar su capacidad de disipación y las láminas queden con una deformación permanente, éstas puedan reemplazarse con facilidad, lo que en este caso por la fijación propuesta a la estructura (Figura 6.4) es un proceso engorroso, ya que ambas partes, externa e interna, se encontrarían ancladas a estructuras no removibles. Por las razones mencionadas anteriormente este modelo también fue descartado.

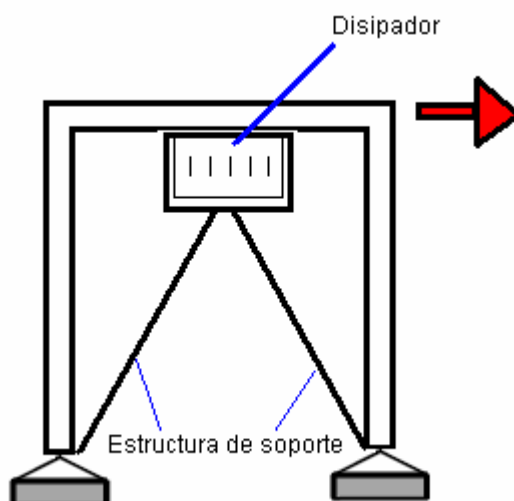


Figura 6.4. Propuesta para la fijación del modelo 2 en la estructura.

En la Figura 6.5 se observa el tercer modelo planteado construido a escala 1:3 en madera balsa. Este prototipo pretende hacer más sencillo el montaje y desmontaje del dispositivo, manteniendo en esencia la idea original, para ello se separan totalmente la parte superior e inferior.

Sin embargo, esta propuesta también conduce a problemas de estabilidad ya que al estar separadas las dos partes, hace susceptible al pandeo lateral a la pieza central que aloja a las láminas y produciría movimientos de rotación indeseables en la caja superior. Esto podría desvirtuar el patrón de deformación concebido para las láminas.

La fijación a la estructura es similar a la mostrada en la Figura 6.4, la parte superior va fijada a la viga y la parte inferior anclada a una estructura de soporte. Para mejorar el comportamiento del modelo anterior, se introduce una pequeña variante, esto es, la caja superior aloja completamente a la pieza central y se remata en la parte inferior con unas alas, esto evitaría los movimientos de rotación de la parte superior (ver Figura 6.6).



Figura 6.5. Prototipo del modelo 3. Vista frontal. Vista lateral y Perspectiva. Modelo construido en madera balsa, escala 1:3.

No obstante, haciendo un análisis más cuidadoso, puede notarse que la propuesta de fijación del dispositivo a la estructura no elimina la posibilidad de pandeo lateral del elemento central, lo que alteraría el funcionamiento esperado del modelo. Por otro lado, las alas inferiores quedan totalmente susceptibles a la flexión, hecho que introduciría efectos no deseados en el comportamiento del disipador.



Figura 6.6. Variante del modelo 3. Vista Frontal. Perspectiva. Vista lateral. Modelo construido en madera balsa, escala 1:3.

En la Figura 6.7 se aprecia un modelo del prototipo final hecho a escala 1:1 en cartón. El prototipo final es producto de las siguientes modificaciones al tercer modelo presentado:

- Se cierra completamente la caja, actuando como una especie de contenedor, de esta manera se eliminan las posibles inestabilidades de la pieza.
- Se propone que la unión entre cada una de las planchas componentes sea atornillada, esto con la finalidad de facilitar su montaje y desmontaje.
- En la pieza interna se colocan dos láminas centrales a un tercio y dos tercios de la longitud, respectivamente. De esta forma las láminas cedentes se comportarán como una viga simplemente apoyada, con dos cargas puntuales aplicadas a un tercio y a dos tercios de la longitud total, respectivamente. Esto resulta ser un comportamiento predecible y de fácil reproducción en el laboratorio, ya que cada lámina estaría en un estado de flexión pura en su tercio central.

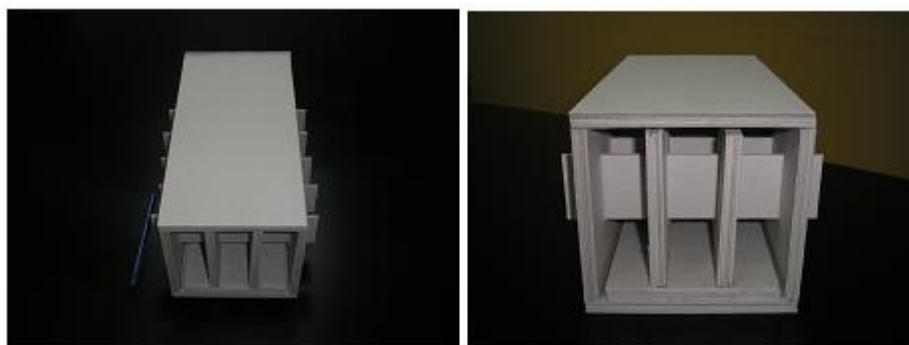


Figura 6.7. Prototipo final. Perspectiva y vista frontal. Modelo construido en cartón, escala 1:1.

La fijación en la estructura para el prototipo final se aprecia en la Figura 6.8, se propone una instalación diagonal al pórtico, así el dispositivo funcionará sólo con fuerzas axiales de tracción o compresión, evitando flexiones o torsiones indeseables.

En la siguiente sección se describen cada uno de los componentes del prototipo final para el disipador de energía.

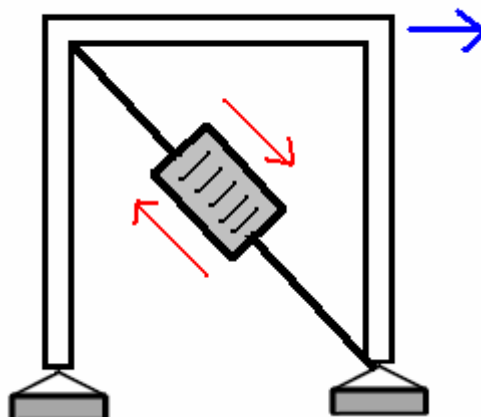


Figura 6.8. Fijación del prototipo final a una estructura aporticada.

6.2.2 Descripción del disipador

El disipador desarrollado consiste en una caja metálica cerrada de dimensiones 15cmx15cmx32cm, aproximadamente, construida con planchas de acero, en cuyo interior está contenida una serie de láminas metálicas de pequeño espesor, que tienen como función disipar la energía inelásticamente a través de su deformación por flexión. La geometría puede ser vista en la Figura 6.9.

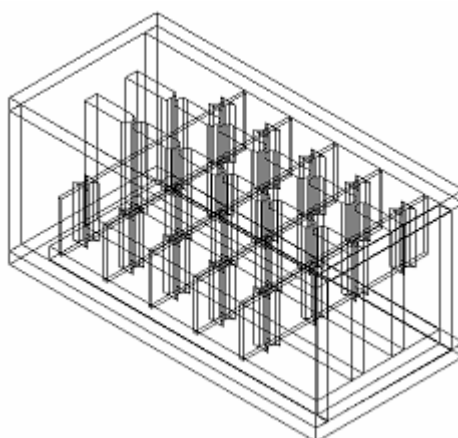


Figura 6.9. Geometría del disipador de energía metálico propuesto.

El dispositivo tiene los siguientes componentes (Ver Figura 6.10):

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

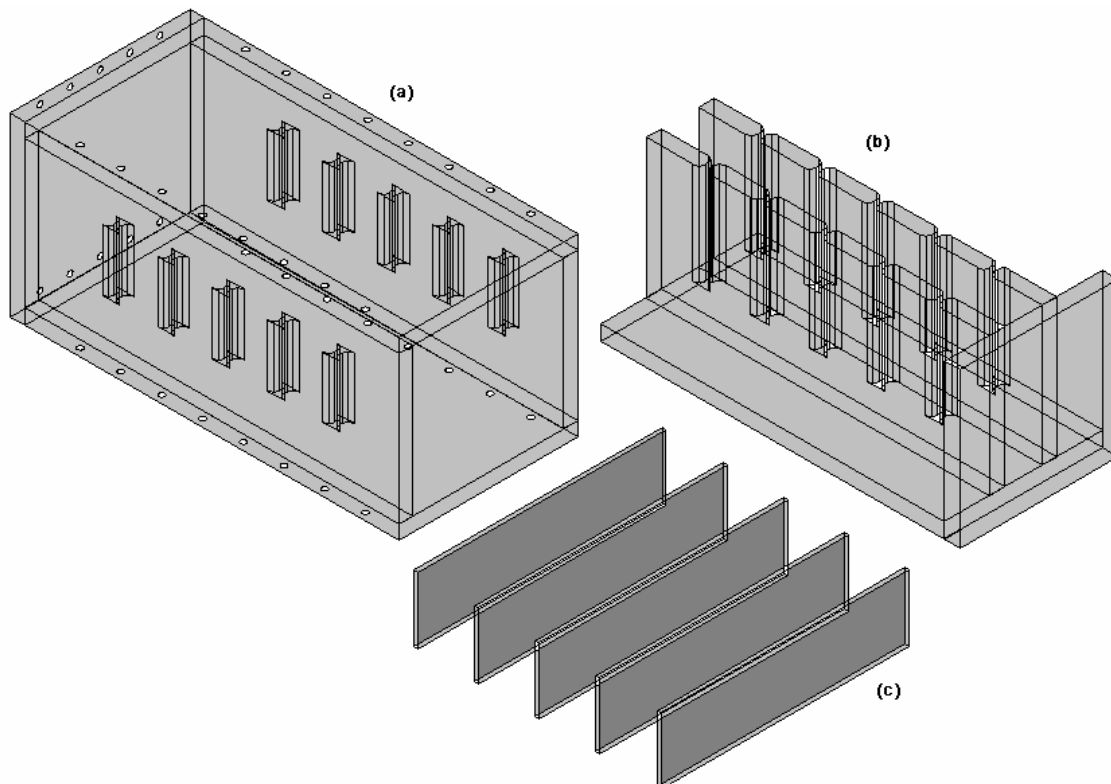


Figura 6.10. Componentes del disipador de energía metálico propuesto. (a) Parte externa (Caja). (b) Parte interna (Pi). (c) Láminas cedentes.

A continuación se enumeran los materiales utilizados para la construcción del prototipo:

1. Láminas de 12mm de espesor Acero A-36
2. Pletina de 50mmx 3mm Acero A-36
3. Tornillos de acero tipo “allen”, grado 8.8, diámetro 4.50mm y largo 1”
4. Grasa para partes mecánicas

6.2.3 Principio de acción

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

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

Debido a la particular geometría propuesta (Caja cerrada), el disipador de energía puede ubicarse dentro del sistema estructural de la edificación en cualquiera de las cuatro formas propuestas por Skinner *et al.* (1975) mostradas en la Figura 6.11 (repetida por conveniencia) y anteriormente descritas en el capítulo 2.

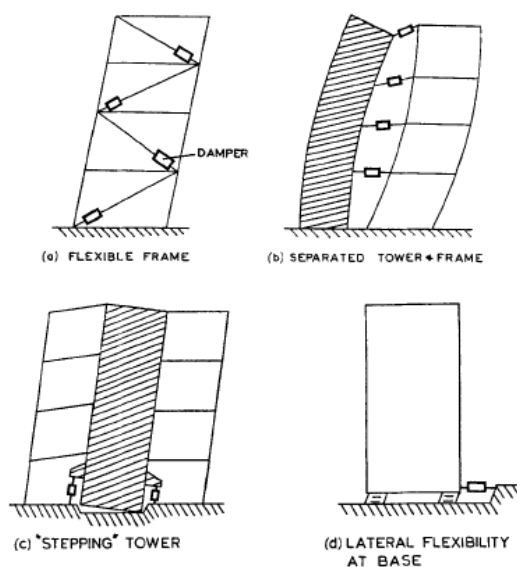


Figura 6.11. Posibles ubicaciones del disipador de energía propuesto en un sistema estructural.

6.2.4 Dimensionado de componentes

En el dimensionado de los componentes del disipador se considera que las piezas externa e interna tendrán un comportamiento elástico, mientras que las láminas tendrán un comportamiento inelástico con deformaciones permanentes y daño.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, se proponen los espesores de cada una de las láminas y diámetro de los conectores.

El disipador se supone como un componente estructural y parte del sistema resistente a sismos de la edificación, por esta razón se hace un análisis de esfuerzos y se verifica la resistencia de cada componente siguiendo las prescripciones de la norma AISC 2005 (ANSI/AISC 360-05, 2005) para el control de planchas y conectores (Cáp. G, Diseño de elementos a corte. Cáp. J, Diseño de conexiones).

6.3 CONSTRUCCIÓN DEL DISIPADOR DE ENERGÍA

6.3.1 Ensayos de caracterización del material

Para cada una de las láminas de acero empleadas en la construcción del disipador de energía (láminas de 12mm de espesor acero A-36 y pletina de 50mmx 3mm acero A-36) se realizaron ensayos, con la finalidad de determinar sus propiedades mecánicas y caracterizar su comportamiento bajo carga. Se llevó a cabo una prueba a tracción simple en ambos especímenes, según la norma COVENIN 299-89 (COVENIN 299, 1989) y adicionalmente una prueba de flexión simple para las láminas cedentes.

Los ensayos se realizaron en la Nave de Ensayos Físicos del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (NEF-IMME-UCV).

En la tabla 6.1 se pueden observar las propiedades mecánicas de los aceros obtenidas de los ensayos mencionados anteriormente.

Tabla 6.1. Propiedades mecánicas de los aceros empleados para la construcción del disipador.

Componente	Alargamiento (%)	f_y^* (kgf/cm ²)	f_u^* (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)
Pieza Externa e Interna	34	2770	4493	2.6×10^6
Láminas	24	2950	3332	2.4×10^6

En la Figura 6.12 se aprecian imágenes que forman parte de la ejecución de uno de los ensayos de tracción simple.

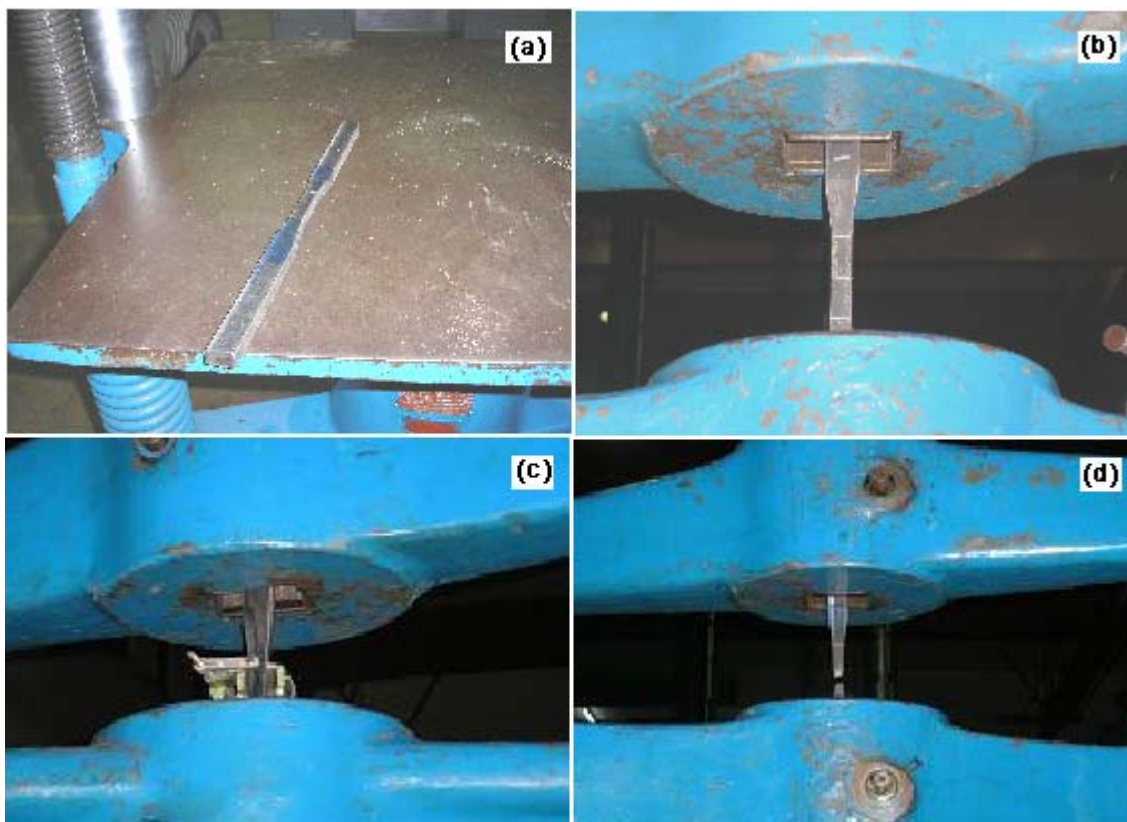


Figura 6.12. Ensayo de tracción simple. NEF-IMME-UCV. (a) Probeta. (b) Probeta en mordazas. (c) Probeta con flexímetro. (d) Rotura de la probeta.

En la Figura 6.13 se presentan las gráficas tensión-deformación de los aceros ensayados. El acero que pertenece a las láminas exhibe un escalón de cedencia más extenso y poco endurecimiento por deformación, el comportamiento mostrado puede considerarse cercano al modelo elástico perfectamente plástico. El acero de la caja y parte interna, presenta un escalón de cedencia reducido y una fase de endurecimiento por deformación importante, sin embargo, luego de esto admite grandes deformaciones con poco aumento de la carga aplicada.

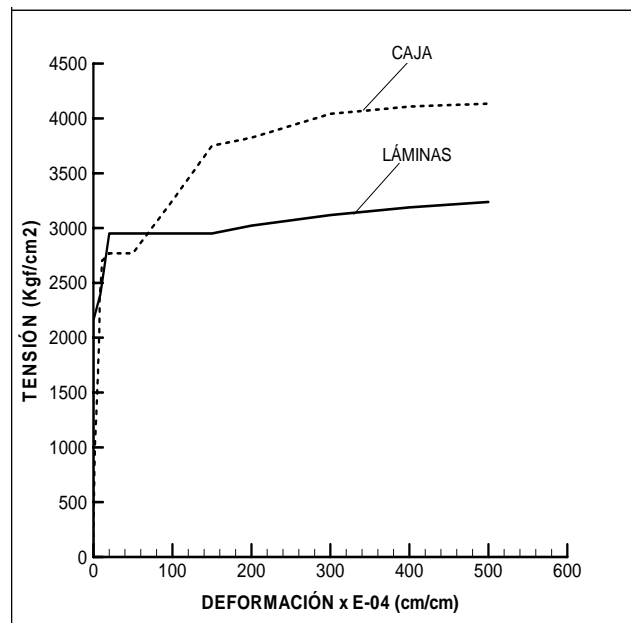


Figura 6.13. Gráficas tensión-deformación para los aceros ensayados.

El ensayo de flexión se realizó simulando la situación que se presentará en las láminas del disipador, es decir, vigas simplemente apoyadas con dos cargas puntuales ubicadas a un tercio y a dos tercios de la distancia entre los apoyos, respectivamente. Para ello se cortaron dos listones de la pletina de 50mmx 3mm, de 300mm de largo cada uno, y se colocaron en el dispositivo mostrado en la Figura 6.14. La carga se aplicó en forma monotónicamente creciente hasta observar en las láminas una flexión considerable, pero sin llegar hasta el agotamiento ni hasta la falla del material, ver Figura 6.14 (b).

Los valores máximos alcanzados en término medio para esta situación fueron de 110 kgf para la carga y de 8,50mm para la flecha. En la Figura 6.15 se muestra el gráfico fuerza-flecha obtenido para las dos muestras ensayadas.

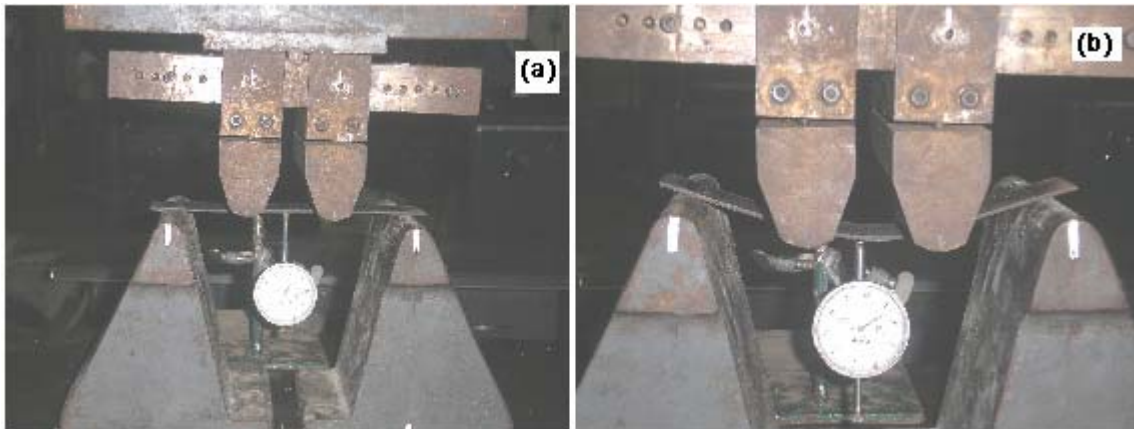


Figura 6.14. Ensayo de flexión para las láminas del disipador. (a) Inicio del ensayo, lámina sin deformación. (b) Final del ensayo, lámina con deformación inelástica.

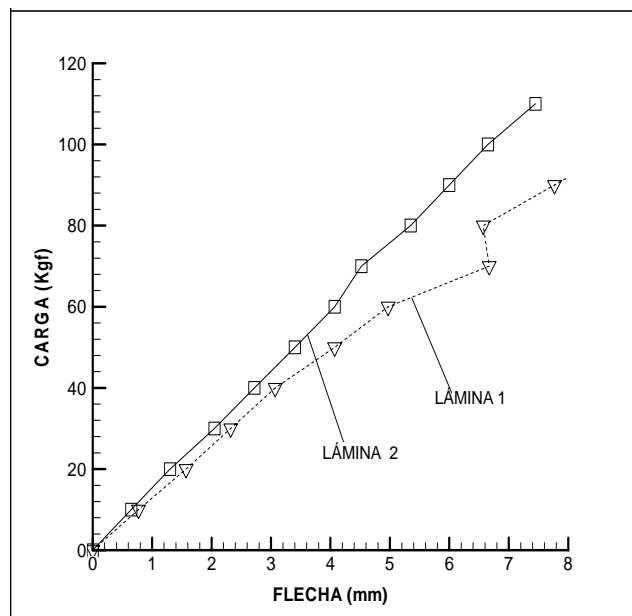


Figura 6.15. Gráficas obtenidas a partir del ensayo de flexión de las láminas.

6.3.2 Proceso constructivo

La construcción del dispositivo se llevó a cabo en dos fases, la primera, corresponde al cortado de las láminas y fue realizada en el Taller Mecánico del

IMME. La segunda fase, es la conformación del disipador, se ejecutó en el Taller de Micromecánica de la Escuela de Física en la Facultad de Ciencias UCV. Esta etapa incluye el ajuste a las dimensiones de diseño por fresado de las láminas (ver Figura 6.16), la realización de los orificios y ranuras por microfresado y el ensamblaje del dispositivo (ver Figuras 6.18 a 6.20). Esta segunda etapa fue la que se llevó mayor tiempo de ejecución, debido a la precisión requerida en el trabajo. A continuación se presenta el informe fotográfico de este proceso.



Figura 6.16. Ajuste a las dimensiones de diseño por fresado de las láminas.



Figura 6.17. Presentación y ajuste de cada una de las láminas componentes.



Figura 6.18. Apertura de orificios, colocación de tornillos, ajuste y ensamblaje.

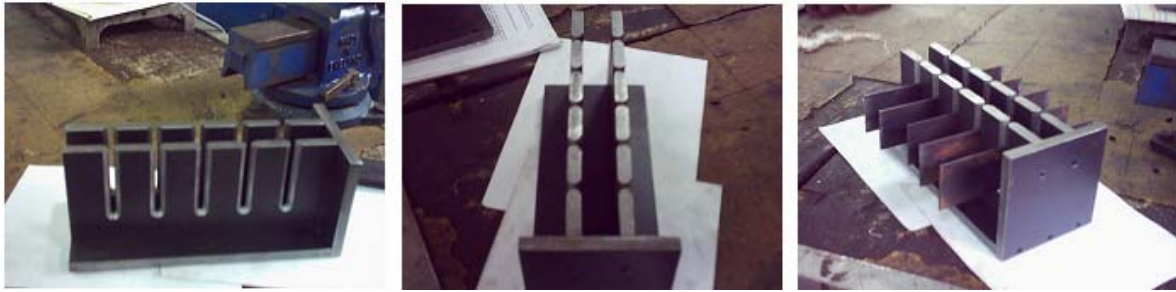


Figura 6.19. Realización de las ranuras e inicio del ensamblaje final.



Figura 6.20. Ensamblaje final del disipador.

6.4 MODELOS DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL DISIPADOR

6.4.1 Modelo analítico

Este modelo, permite realizar una primera estimación de la deformación elástica máxima que puede experimentar el disipador y la carga que la produce. Se trata de un modelo analítico que utiliza los conceptos básicos de resistencia de materiales.

Cada lámina cedente se idealiza como una viga simplemente apoyada con dos cargas puntuales ubicadas a un tercio y a dos tercios de la distancia entre apoyos

(L), respectivamente, quedando el tercio central trabajando a flexión pura como se muestra en el diagrama de momento flector de la Figura 6.21.

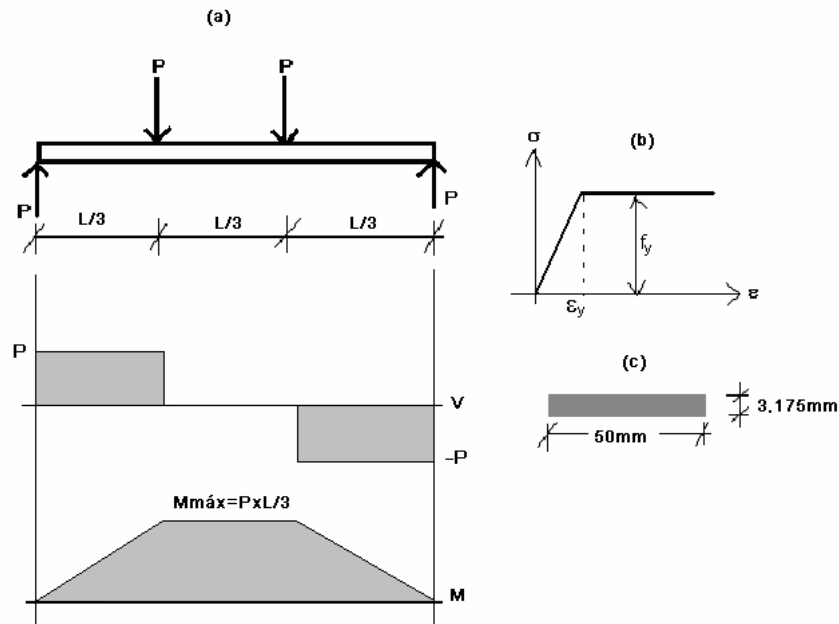


Figura 6.21. (a) Diagrama de fuerza cortante y momento flector para viga en flexión pura. (b) Modelo elástico perfectamente plástico para el acero. (c) Sección transversal de las láminas.

El primer paso es predecir el momento flector máximo que las láminas son capaces de resistir. Suponiendo flexión elástica el momento flector máximo será:

$$M_{\text{max}} = \frac{f_y \cdot I_x}{c} \quad (6.1)$$

Donde:

f_y = tensión cedente del acero

I_x = Momento de inercia de la sección transversal

c = distancia desde la fibra más alejada al eje neutro

Si se supone flexión inelástica, el acero se supone elástico perfectamente plástico con diagrama esfuerzo-deformación idéntico a tracción y a compresión, ver Figura 6.21 (b). La sección es rectangular, ver Figura 6.21 (c), y por ende tiene dos ejes de simetría. Entonces, el eje neutro coincide con el eje centroidal, existiendo una separación bien definida de las zonas plástica y elástica, como se observa en la Figura 6.22(a), cuando las deformaciones son relativamente pequeñas la zona elástica es superior a la zona plástica, a medida que se va incrementando la deformación la zona elástica se reduce, Figura 6.22(b y c).

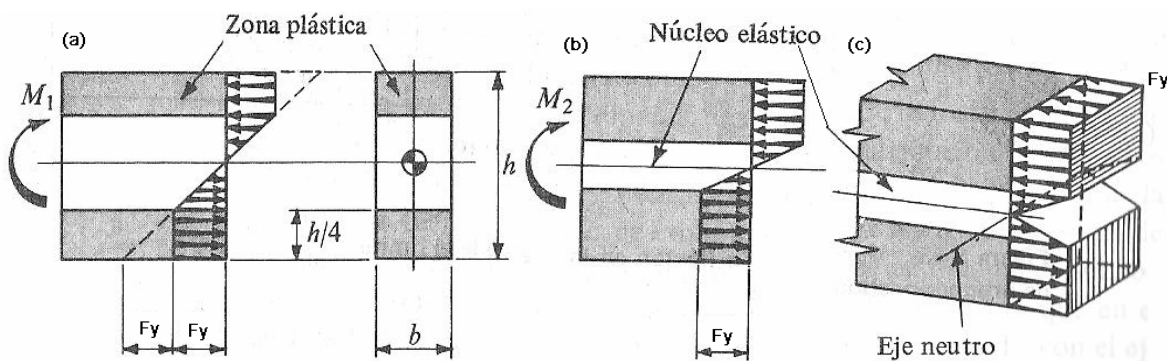


Figura 6.22. (a) Viga elastoplástica que trabaja a un valor moderado de deformación. (b) y (c) Estados de tensión para deformaciones mayores (Popov, 1999).

Las deformaciones que se producen durante la cedencia son mucho mayores a la deformación elástica máxima. Por la tanto, el momento plástico puede tomarse como el momento último. La distribución de tensiones mostrada en la Figura 6.23(a) se aplica luego de que ocurre una gran deformación general en la viga. Sin embargo, se puede hacer la idealización de la Figura 6.23 (b), en la que se deduce por simetría que la viga se divide en zonas iguales de compresión y tracción (Popov, 1999).

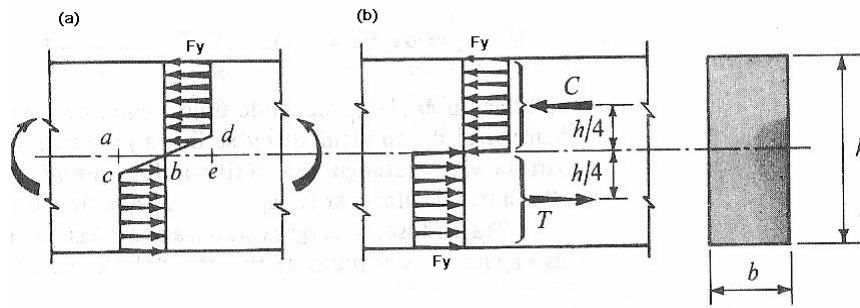


Figura 6.23. (a) Distribución de tensiones para grandes deformaciones. (b) Idealización. (Popov, 1999)

Por lo tanto, en este caso el momento plástico o momento flector máximo es:

$$M_{\max} = \frac{f_y \cdot b \cdot h^2}{4} \quad (6.2)$$

En el que:

b = base de la sección transversal

h = altura de la sección transversal

En cualquier caso se tiene que la deflexión en el centro de la lámina será igual a:

$$f = 0.035 \cdot \frac{P \cdot L^3}{E \cdot I_x} \quad (6.3)$$

En la que $P = M_{\max}/(L/3)$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.2. La carga P representa la carga máxima estimada que puede ser aplicada a la lámina, para incursionar en el rango inelástico, calculada usando el diagrama de la Figura 6.21 (a) y la ecuación 6.2 para el momento flector. La flecha de la lámina representa la deflexión elástica máxima esperada bajo la carga P. La carga total entonces que se debe aplicar al disipador, según este modelo, para iniciar la cedencia de las cinco láminas estará

alrededor de 442.50 kgf, produciendo una deflexión elástica máxima de 1.90mm en cada una de ellas.

Tabla 6.2. Resultados obtenidos al aplicar el modelo de predicción analítico.

L(mm)	b(mm)	h(mm)	$I_x(\text{mm}^4)$	$M_{\max}(\text{Elast.})$ Kgf.mm	$M_{\max}(\text{Inelast.})$ Kgf.mm	P(kgf)	f(mm)
126	50	3.175	133.36	2478.2	3717.23	88.50	1.90

6.4.2 Modelo numérico

Con la finalidad de predecir el comportamiento que tendrá el disipador, estimar la fuerza y desplazamiento correspondiente al inicio de la plastificación, y establecer zonas de posible daño, se realizó un modelo de simulación numérica. Para ello se utilizó el programa comercial de análisis por elementos finitos Ansys 10.0 (Ansys, 2005).

6.4.2.1 Geometría

En la Figura 6.24 se observa la geometría del disipador configurada en la interfase gráfica del programa. Ésta fue simplificada en buena medida para minimizar el esfuerzo computacional requerido, sin que esto significara la alteración del principio de acción del disipador.

En este sentido, se suprimen las tapas posterior, frontal y superior del dispositivo, y las ranuras se modelan con bordes en ángulo recto. Cada uno de los elementos fue creado con la herramienta para dibujar sólidos del software.

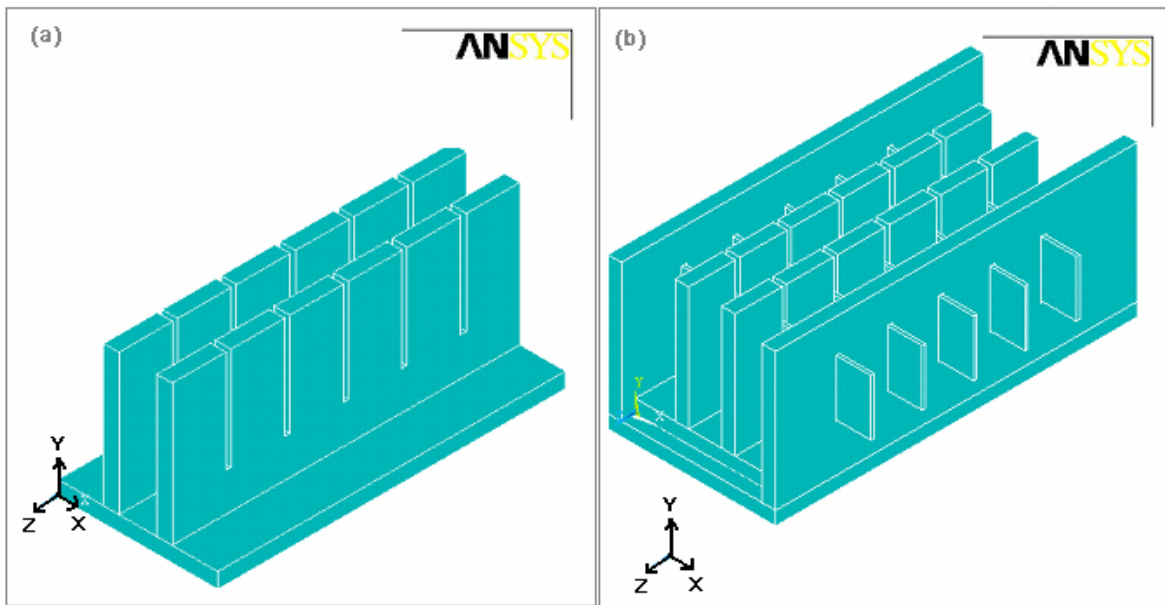


Figura 6.24. Modelo numérico: Geometría. (a) Parte interna.
(b) Geometría completa.

6.4.2.2 Discretización, cargas y condiciones de contorno

Para discretizar los sólidos que componen el modelo, se utilizaron elementos tetraédricos de veinte nodos, “*solid 186*” en Ansys. Debido a la presencia de nodos intermedios, este tipo de elemento resultó el más adecuado para la configuración geométrica del disipador, garantizando mayor precisión en los resultados y convergencia de la solución. En la Figura 6.25(a) se observa la representación general del elemento utilizado en este modelo.

Para simular el contacto entre los componentes, en este caso, tanto entre la cara interna de la base de la caja y la cara externa de la base de la “pi” invertida, como entre las ranuras y las láminas se utilizaron los elementos “*targe120*” y “*conta174*”, cuya representación general se muestra en la Figura 6.25(b).

El tipo de contacto considerado fue superficie con superficie, asimétrico, suponiendo las rigideces normal y tangencial equivalentes, se adoptó un coeficiente de roce alrededor de 0.10, ligeramente menor que el recomendado

para roce entre metal y metal (0.15), tomando en cuenta que las piezas estarían altamente lubricadas. La razón entre el coeficiente de roce estático y el coeficiente de roce dinámico se supuso igual a 1.00. El ajuste de la rigidez en cada superficie se hizo a través de un proceso iterativo, hasta lograr convergencia de la solución y un tiempo razonable de cómputo.

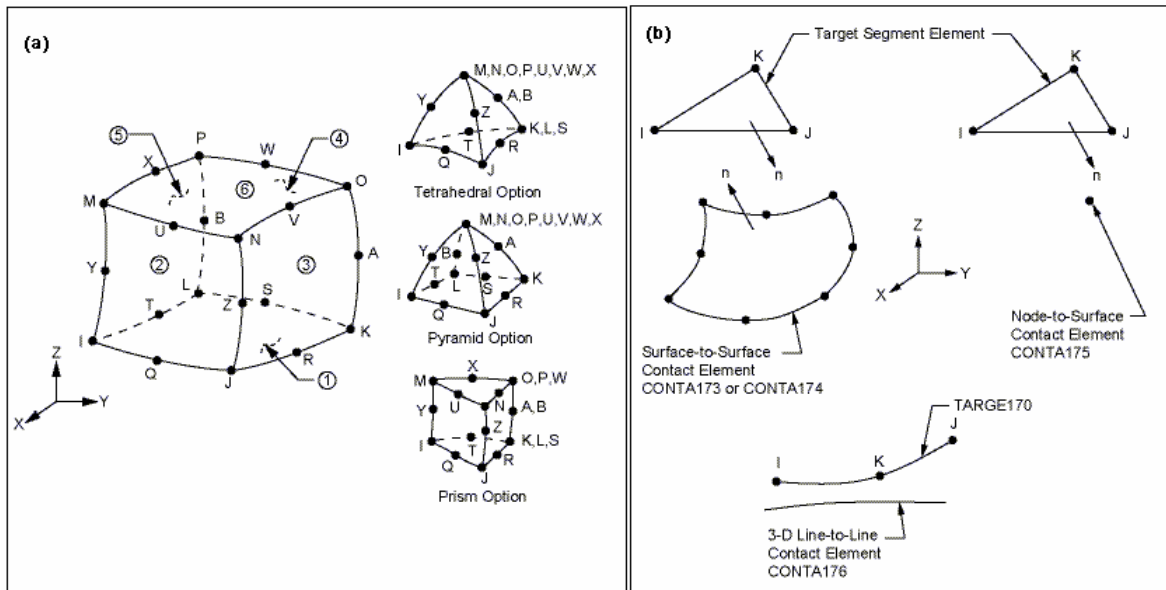


Figura 6.25. Elementos de ANSYS utilizados en el modelo numérico. (a) "solid186". (b) "targe170" y "conta174" (Ansys, 2005)

Se consideraron tres tipos de malla, una malla poco refinada (Figura 6.26 (a)), una malla muy refinada (Figura 6.26 (b)) y una malla combinación de las anteriores (Figura 6.27), es decir, refinada en las zonas donde se supone habrá concentración de tensiones como en las ranuras y en las láminas cedentes, y menos refinada en las áreas en las que se supone no habrá tensiones importantes, como en el resto de las partes exterior e interior del disipador. La malla poco refinada, ocasionaba problemas en las zonas de contacto, principalmente en las ranuras, por la poca precisión que ofrecía para el análisis. La malla muy refinada, requería un gran esfuerzo computacional, lo cual se traduce

en un alto costo y mayor tiempo de ejecución. Por estas razones fueron descartadas estas opciones. La alternativa seleccionada fue la malla combinada, con la que se logró convergencia en la solución y un tiempo razonable de ejecución. Esta malla está constituida por 63654 elementos y 93173 nodos.

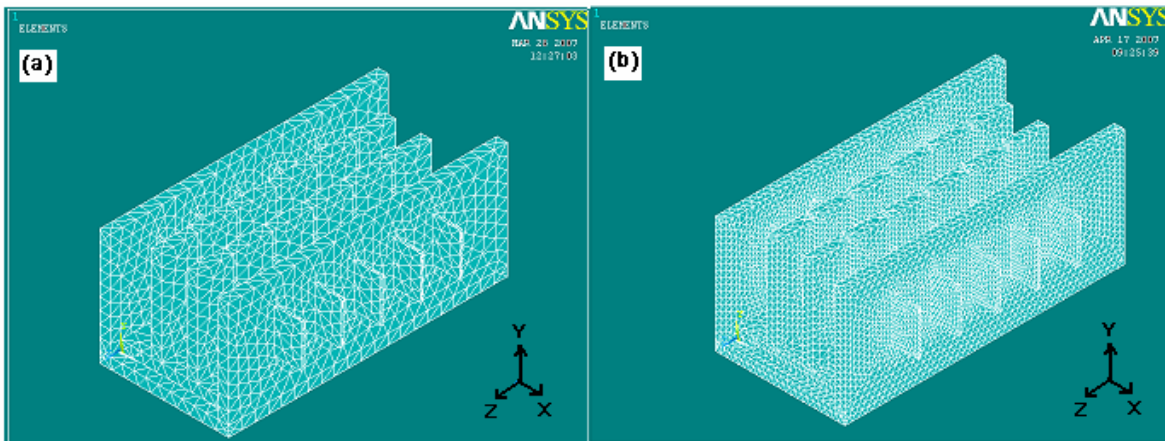


Figura 6.26. Discretización del modelo numérico. (a) Malla poco refinada. (b) Malla muy refinada.

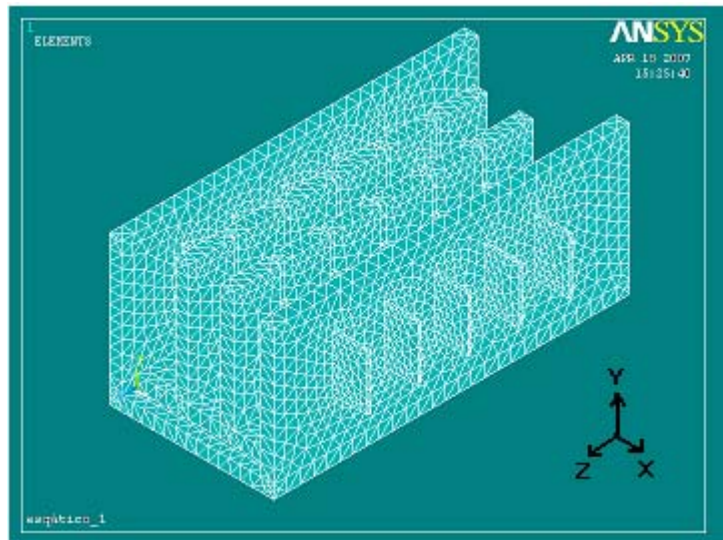


Figura 6.27. Discretización del modelo numérico. Malla definitiva.

Una vez conseguida la malla para el modelo, se crearon los elementos de contacto mencionados anteriormente, estos pueden ser vistos en la Figura 6.28(a).

Las condiciones de contorno aplicadas al modelo se muestran en la Figura 6.28(b). Se restringen todos los desplazamientos en la cara anterior y posterior de la caja, ya que se supone que esta conexión será empotrada. En la parte superior de la pieza interna se restringen los desplazamientos en X y en Y, para poder permitir el deslizamiento entre las partes y se ejecute el principio de acción del disipador. En las láminas se restringen los desplazamientos verticales en su cara superior. De esta manera queda libre el desplazamiento en Z, que es la dirección en la que debe ocurrir el deslizamiento.

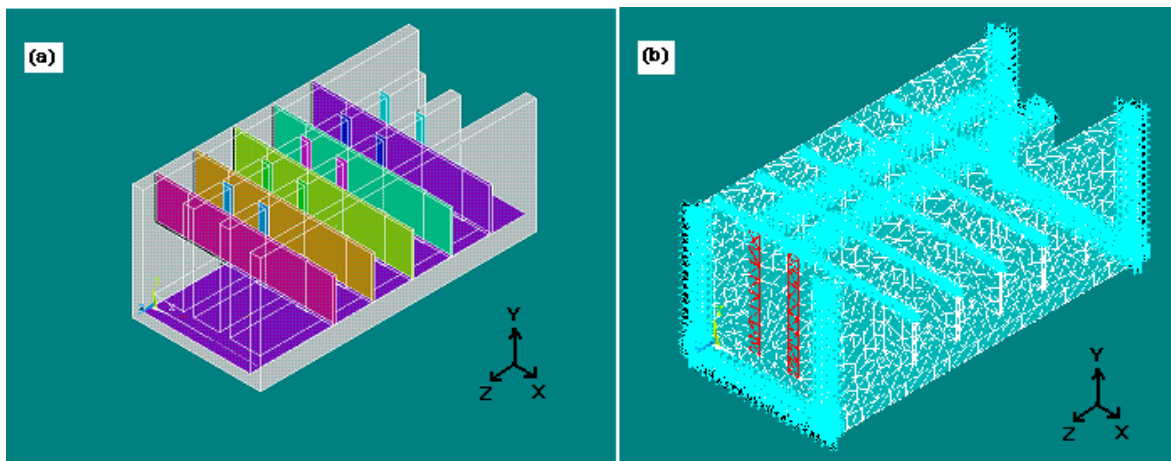


Figura 6.28. (a) Elementos de contacto. (b) Condiciones de contorno.

En cuanto a las cargas, en la realidad será una carga puntual transmitida a través de la tapa frontal pero debido a que ésta se ha suprimido para simplificar la geometría del modelo, se impone una secuencia creciente de desplazamientos alternantes en las áreas frontales de la pieza interna. La variación entre cada desplazamiento es de 0.25mm hasta un máximo de 6mm (ver Figura 6.29), tomando en cuenta que luego de la cedencia se pueden producir deformaciones mucho mayores que la deformación elástica máxima.

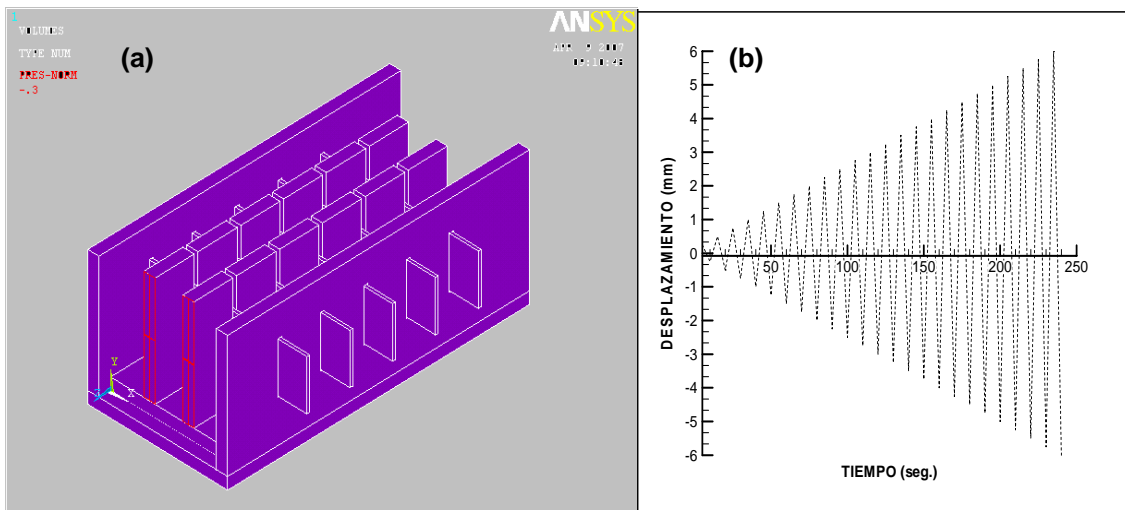


Figura 6.29. (a) Cargas aplicadas al modelo. (b) Secuencia de desplazamientos impuestos.

6.4.2.3 Modelo de comportamiento del material

Se adoptó un modelo de material multilíneal que pudiera reflejar el comportamiento exhibido en los ensayos de tracción simple presentados en la sección 6.3.1. El modelo de material, denominado “*Multilinear Kinematic hardening*” en Ansys, es recomendado para análisis con deformaciones pequeñas a moderadas en los que se requiera modelar el comportamiento plástico de metales, admitiendo la aplicación de cargas cíclicas.

Para recrear el modelo real del disipador, se asignaron materiales diferentes a cada una de las partes según corresponde. En la caja y la pieza interna se utilizó el material (1), ver Figura 6.30 (a), y para las láminas se consideró el material (2) (Figura 6.30 (b)). Nótese, que prácticamente se reproduce el comportamiento de los materiales ensayados.

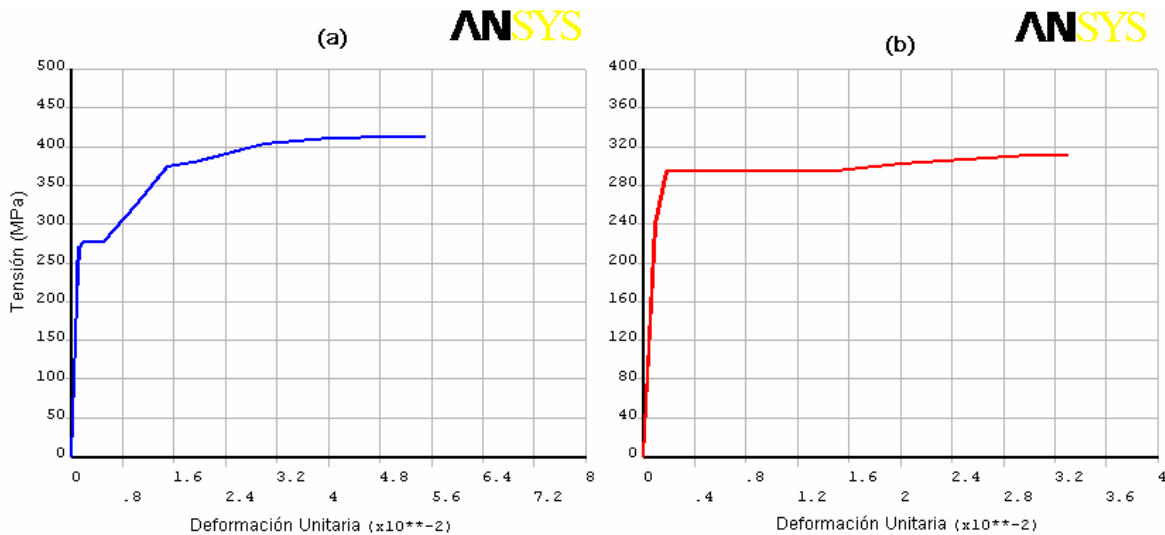


Figura 6.30. Modelo de material considerado. (a) Material 1. (b) Material 2.

6.4.2.4 Predicción de la fuerza y desplazamiento que dan inicio a la plastificación

A continuación se presentan los resultados del análisis por elementos finitos bajo las condiciones descritas anteriormente, con el programa Ansys. Se muestran los campos resultantes de tensiones en el modelo idealizado del disipador de energía propuesto, asimismo se analiza el comportamiento del sistema bajo el esquema de cargas explicado en la sección 6.4.2.2 que trata de reproducir el principio de acción del dispositivo.

Los resultados expuestos corresponden a los casos que se consideraron más representativos para el modelo, pues se muestra una etapa de comportamiento elástico, una de inicio de la plastificación y finalmente una de inicio del endurecimiento por deformación. Se trabaja con el criterio de Von Mises, ya que permite predecir fallas por cedencia en materiales con comportamiento dúctil y arroja resultados que guardan una correlación mucho más estrecha con los valores obtenidos experimentalmente (Goncalves, 2002).

La Figura 6.31(a), presenta la distribución de tensiones y deformada para un desplazamiento impuesto de 0.50mm en sentido positivo. En este caso de carga la

distribución de tensiones indica un patrón uniforme para la caja y la pieza interna, con una tensión de 0.012MPa (0,12 kgf/cm²) en término medio, situándose entre los menores valores obtenidos. En las láminas se observan tensiones muy bajas hacia los extremos, similares a las de la caja y pieza interna. En la zona donde se aplica la carga se aprecia cierta concentración de tensiones, justo donde las láminas hacen contacto con la pieza interna. Para una tensión entre 139.14MPa (1391.4 kgf/cm²) y 178.89MPa (1788.9 kgf/cm²). En la parte central de las láminas se observa una distribución uniforme, para una tensión media de 99.39MPa (993.9 kgf/cm²). La deformación de las láminas es la típica de un elemento sometido a flexión.

En esta etapa el disipador se encuentra totalmente en el rango elástico, hecho que se verifica porque en ninguna región de las láminas se sobrepasa la tensión cedente del material (295MPa, 2950 kgf/cm²). Como se aprecia en la caja y la pieza interna las tensiones que se manifiestan son mínimas, tal y como fue previsto en el diseño conceptual del dispositivo.

Con un desplazamiento impuesto de 0.75mm en el sentido negativo, ver Figura 6.31 (b), la distribución de tensiones es análoga a la descrita anteriormente. Sin embargo, aunque no se sobrepasa la tensión cedente del material en las láminas, se alcanzan tensiones sensiblemente mayores a las del caso de carga anterior. En este sentido, en las láminas, en las zonas próximas al contacto con la pieza interna se obtienen tensiones entre 176.81MPa (1768.1 kgf/cm²) y 265.18MPa (2651.8 kgf/cm²).

Adicionalmente, se observa un aumento en las tensiones en la parte central de las láminas y que el patrón de distribución empieza a perder uniformidad, hecho que se observa en el borde inferior de la lámina en el mencionado tramo.

La deformación que se presenta en las láminas es la deformación característica de las vigas a flexión y se muestra acorde con el desplazamiento impuesto.

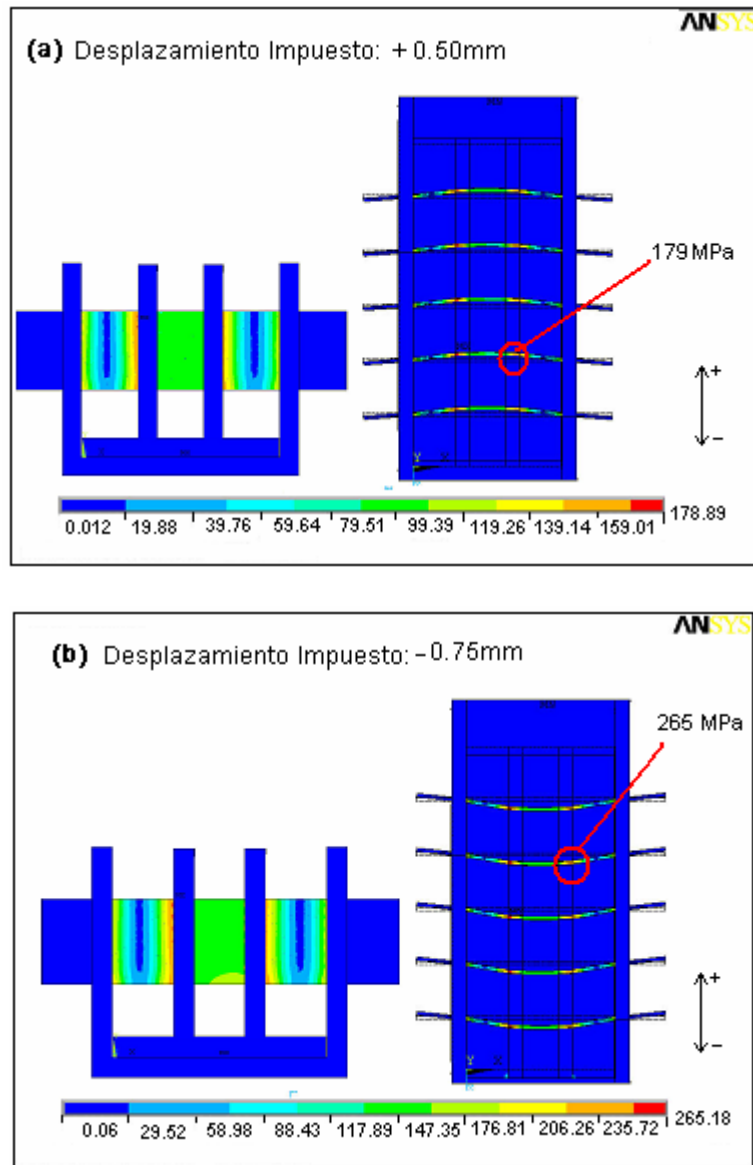


Figura 6.31. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +0.50mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -0.75mm.

La Figura 6.32 (a) corresponde a los resultados al imponer un desplazamiento de 1.00mm en sentido positivo. Para este caso de carga la situación se muestra un poco distinta. No obstante, la caja y la pieza interna siguen presentando una distribución de tensiones totalmente uniforme, con valores muy bajos, los cuales están limitados por 0.02MPa (0.2kgf/cm²) y 37.81MPa (378.1kgf/cm²). En cuanto a las láminas, se aprecia una distribución de tensiones variable, creciente en las regiones cercanas a las zonas de contacto con la caja y la pieza interna. Si se observa la vista frontal del dispositivo, puede notarse que en las láminas predominan los colores amarillo y verde, que según la escala corresponden a valores de tensión entre 188.96MPa (1889.6kgf/cm²) y 264.54MPa (2645.4kgf/cm²), sin embargo, cerca de la zona de contacto con la pieza interna se aprecian áreas muy pequeñas de color naranja, según la escala 302.32MPa (3023.2kgf/cm²). Esta transición indica que en esa zona, ya ha comenzado parcialmente la incursión en el rango inelástico del material, pues se sobrepasa la tensión cedente (295MPa, 2950kgf/cm²).

En ciertos puntos del modelo, se pudo alcanzar valores de tensiones superiores a lo esperado, esto se debe a la interacción entre las superficies que simulan el contacto entre las láminas y los otros elementos, en este proceso se reportaba excesiva penetración para unos pocos nodos en estas áreas, sin que esto afectara la convergencia de la solución o el comportamiento deseado.

Con un desplazamiento impuesto de 1.25mm en el sentido negativo, ver Figura 6.32 (b), la distribución de tensiones es similar a la descrita anteriormente. Se observa en las láminas ciertas zonas en las que se rebasa levemente la tensión cedente del material, lo cual indica que se encuentra en el inicio de la etapa de plastificación. Esto se verifica al observar la vista frontal del disipador, se nota que predominan tensiones entre 234.02MPa (2340.2kgf/cm²) y 280.80MPa (2808kgf/cm²), con una pequeña transición hacia 327.59MPa (3275.9kgf/cm²).

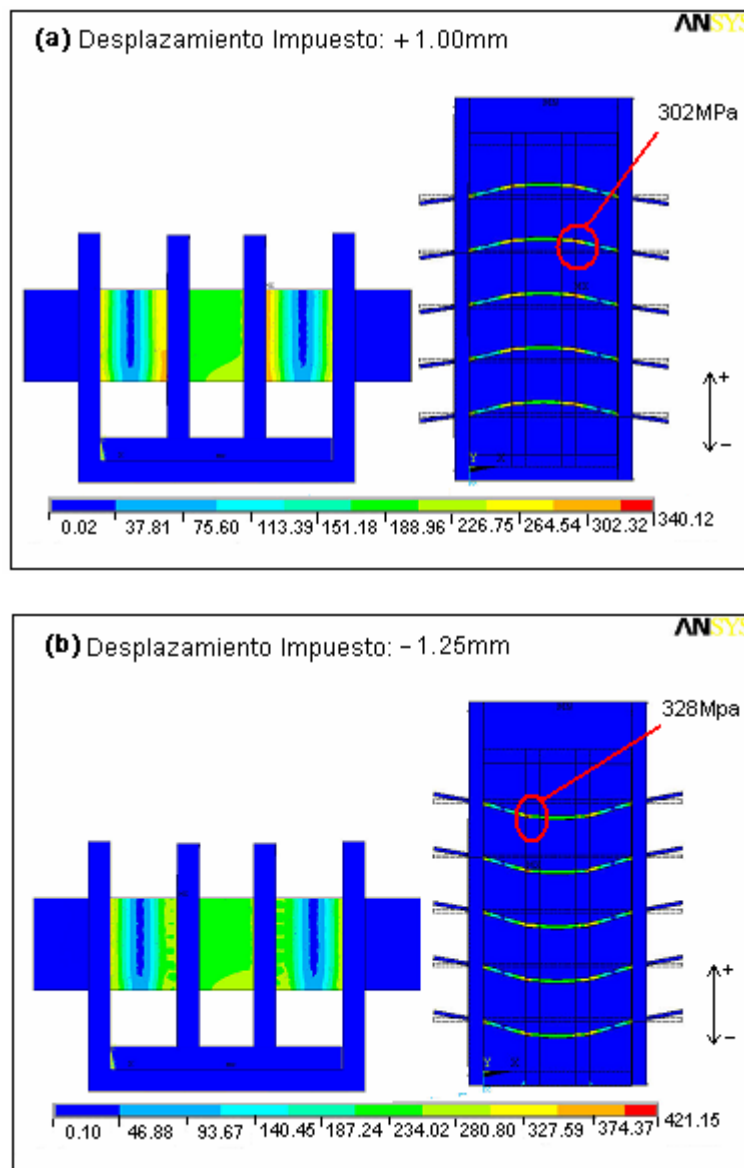


Figura 6.32. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +1.00mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -1.25mm.

Los resultados correspondientes a un desplazamiento impuesto de 1.50mm en sentido positivo, se muestran en la Figura 6.33(a). Obsérvese que la distribución de tensiones en la caja y la pieza interna continúa siendo uniforme, aunque con un ligero aumento en su valor, oscilando entre 0.32Mpa (3.2kgf/cm²) y 40.11MPa (401.1kgf/cm²). En las láminas se aprecia como en casos anteriores una distribución variada de tensiones, con incrementos hacia la zona de contacto. El tramo central ya no muestra un patrón totalmente uniforme. Los valores que destacan están en promedio entre 240.50MPa (2405kgf/cm²) y 280.58MPa (2805.8kgf/cm²), con mayor influencia de éste último. Esta situación indica que hay una leve oscilación entre el rango elástico y el rango plástico en el disipador, pues aunque existen zonas en las que ha comenzado la cedencia, esta no se ha generalizado.

En la Figura 6.33 (b), se muestran cambios interesantes que se relacionan con los resultados para un desplazamiento impuesto de 1.75mm en sentido negativo. En primer lugar, la caja sigue con una distribución de tensiones totalmente uniforme, con valores entre 0.11Mpa (1.1kgf/cm²) y 44.38MPa (443.8kgf/cm²). En la pieza interna, aunque en la mayor parte predominan tensiones con valores similares a los de la caja, se presenta un aumento en los valores de la parte frontal, que puede ser observado en la vista superior. Allí las tensiones alcanzan un valor por encima de 44.38MPa (443.8kgf/cm²). En las láminas, indiscutiblemente hay una leve incursión en el rango inelástico. Pues hay un claro influjo de tensiones que oscilan entre los valores 265.69MPa (2656.9kgf/cm²) y 309.96MPa (3099.6kgf/cm²), en cuya transición evidentemente se rebasa la tensión cedente del material (295MPa, 2950kgf/cm²). Cabe destacar, que esto es especialmente cierto en el tramo central de las láminas, y aunque la distribución de tensiones dejó de ser uniforme, aún no se observa plastificación generalizada en elemento.

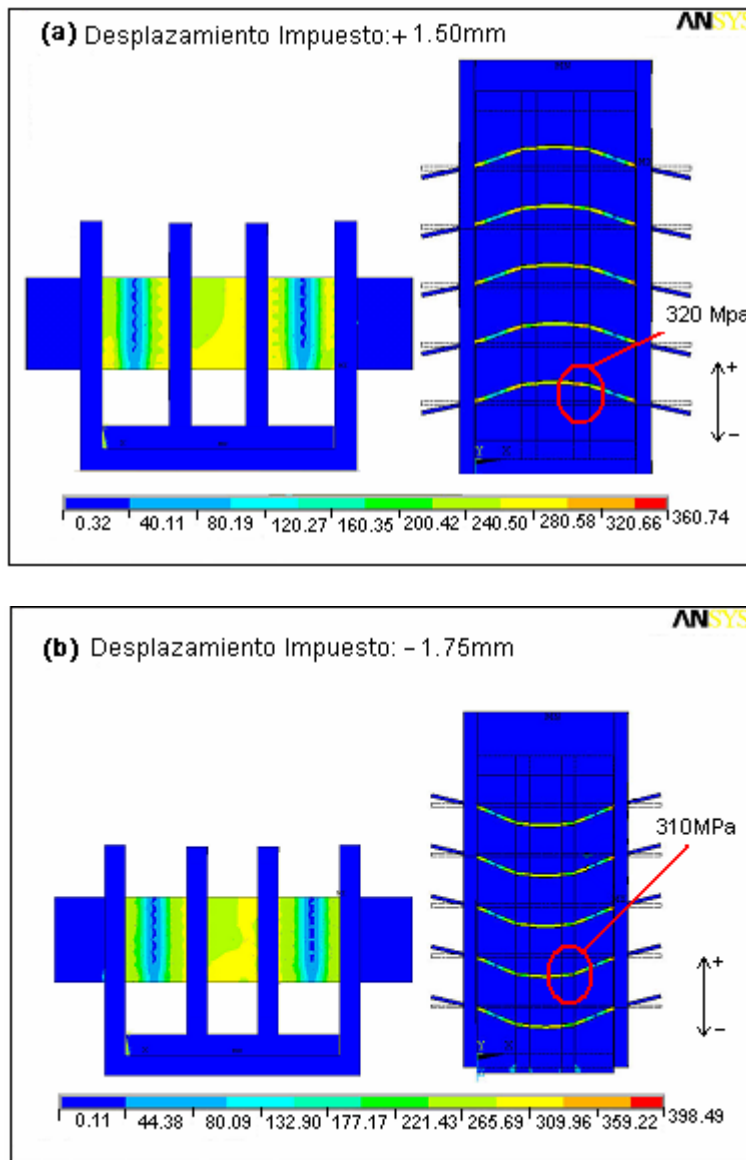


Figura 6.33. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +1.50mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -1.75mm.

Cuando el desplazamiento impuesto es de 2.00mm en sentido positivo, ver Figura 6.34 (a), las láminas exhiben una distribución de tensiones heterogénea, con excepción de los tramos extremos, que al igual que la caja y la pieza interna conservan valores muy bajos y uniformes. Se observa que las tensiones predominantes están limitadas por 260.54MPa (2605.4kgf/cm²) y 297.76MPa (2977.76kgf/cm²), con una leve tendencia a superar éste último valor. Esto muestra que para este estado de carga, el disipador se encuentra aún en el inicio del rango inelástico del material, pero se nota que para un rango mayor de deformaciones las tensiones alcanzadas son menores. La deformación se observa únicamente en las láminas, la caja y la pieza interna permanecen intactas ante el desplazamiento impuesto.

La Figura 6.34 (b), muestra la distribución de tensiones de Von Mises para un desplazamiento impuesto de 2.25mm en sentido negativo. En este caso se observa una mínima concentración de tensiones en la parte frontal de la pieza interna y en los tramos extremos de las láminas, en los que se alcanzan valores entre 40.61MPa (406.1kgf/cm²) y 81.10MPa (811kgf/cm²), mientras que en el resto de la pieza interna y la caja las tensiones se mantienen uniformes, con valores entre 0.12MPa (1.2kgf/cm²) y 40.61MPa (406.1kgf/cm²), conservándose bastante alejadas de la tensión cedente del material (277MPa, 2770 kgf/cm²).

En los tramos internos de las láminas, las tensiones oscilan entre 243.07MPa (2430.7kgf/cm²) y 283.56MPa (2835.6kgf/cm²). Particularmente en el tramo central se muestra una zona en que la tendencia es a superar éste último valor, pero sin sobrepasar los 324.06MPa (3240.6kgf/cm²). Esto indica que en esa área se sigue propagando la cedencia del material.

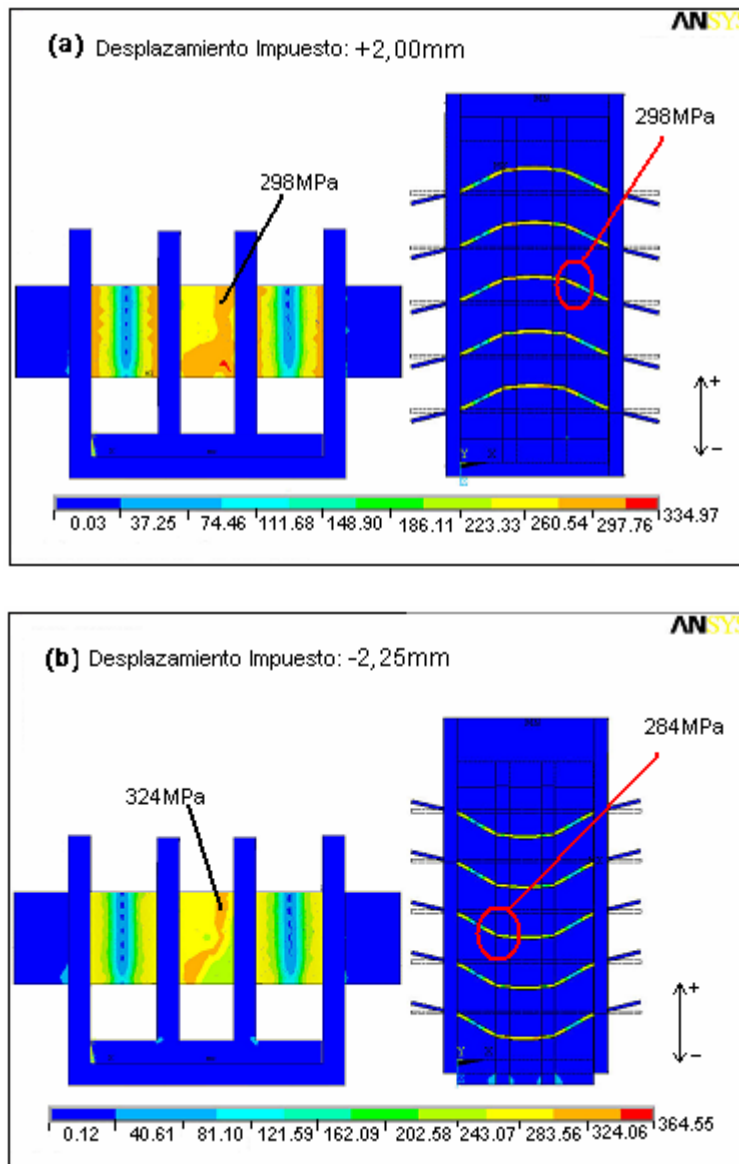


Figura 6.34. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +2.00mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -2.25mm.

En las Figuras 6.35 (a), (b) y 6.36 (a), (b) se muestran distribuciones de tensiones similares a las descritas anteriormente para desplazamientos mayores. Sin embargo, se comienza a observar un muy leve endurecimiento por deformación en el tramo central de las láminas y en sus cercanías a las zonas de contacto a partir de la imposición de un desplazamiento de 2.50mm en sentido negativo (Figura 6.35 b). En este caso se aprecia que las tensiones alcanzadas en la mayor parte de la superficie de las láminas superan sensiblemente a las obtenidas al aplicar un desplazamiento de 2.25mm.

Como comentario final se tiene que el modelo numérico ayuda a predecir las zonas de daño del disipador de energía, se nota congruencia con el diseño conceptual del dispositivo, es decir, la caja y la pieza interna permanecen siempre con tensiones muy por debajo de la tensión cedente del material, lo que indica que se mantiene en el rango elástico para todos los casos de carga y deformaciones impuestos. Las láminas experimentan deformaciones típicas de los elementos a flexión y por la distribución de tensiones observada se infiere que hay transición entre la fase elástica y la inelástica del material, para el estado de cargas impuesto. Este hecho se traduce en el inicio de deformaciones permanentes, daño y disipación de energía, que se acentuarían una vez que se produzca una plastificación generalizada de dichas láminas, consecuencias que se tienen previstas para este componente del disipador.

Como modelo de predicción de la fuerza y deformación de inicio de la plastificación, se observa que la incursión en el rango inelástico comienza en las zonas de contacto de las láminas, para desplazamientos entre 1.00mm y 1.25mm. Sin embargo, al analizar cuidadosamente las distribuciones de tensiones, se advierte que es a partir de un desplazamiento de 1.75mm que parte importante de la superficie en la lámina se encuentra en cedencia, situación que se consolida cuando la deformación alcanza los 2.00mm. En este sentido, el entorno planteado manifiesta una mínima discrepancia entre el modelo numérico y el modelo analítico, pues en este último se predijo una deformación elástica máxima de 1.90mm y una fuerza de 885N (88.5kgf) para una lámina.

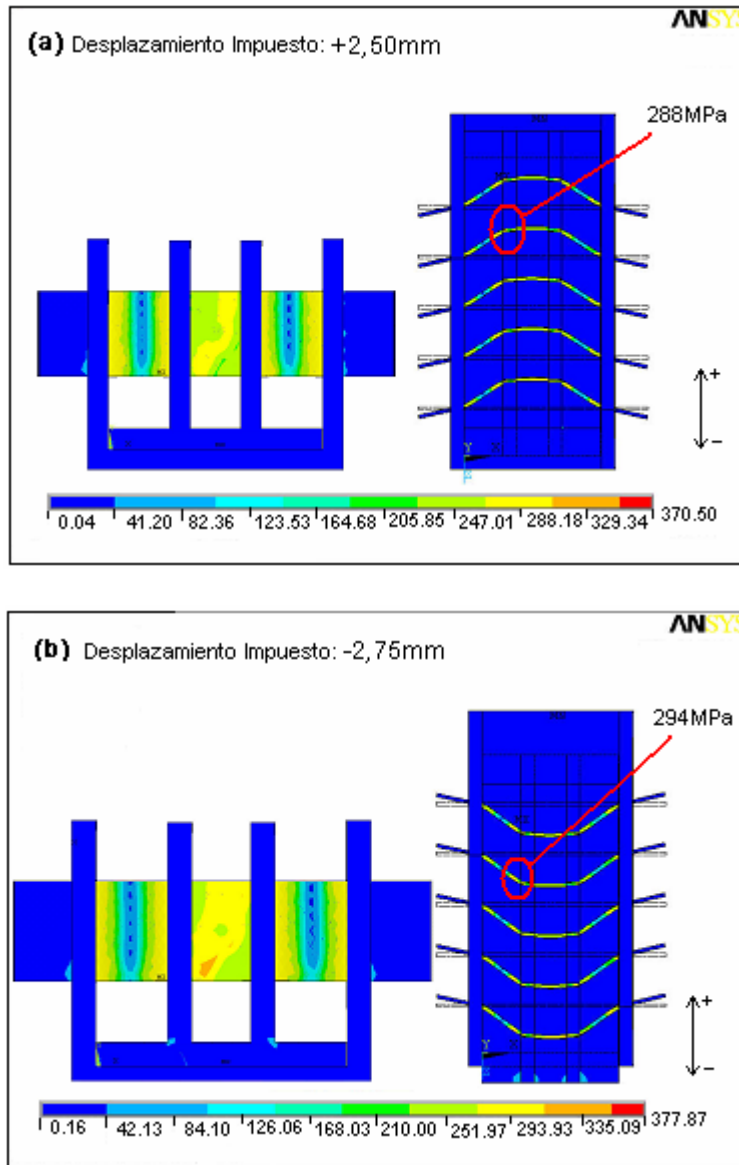


Figura 6.35. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +2.50mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -2.75mm.

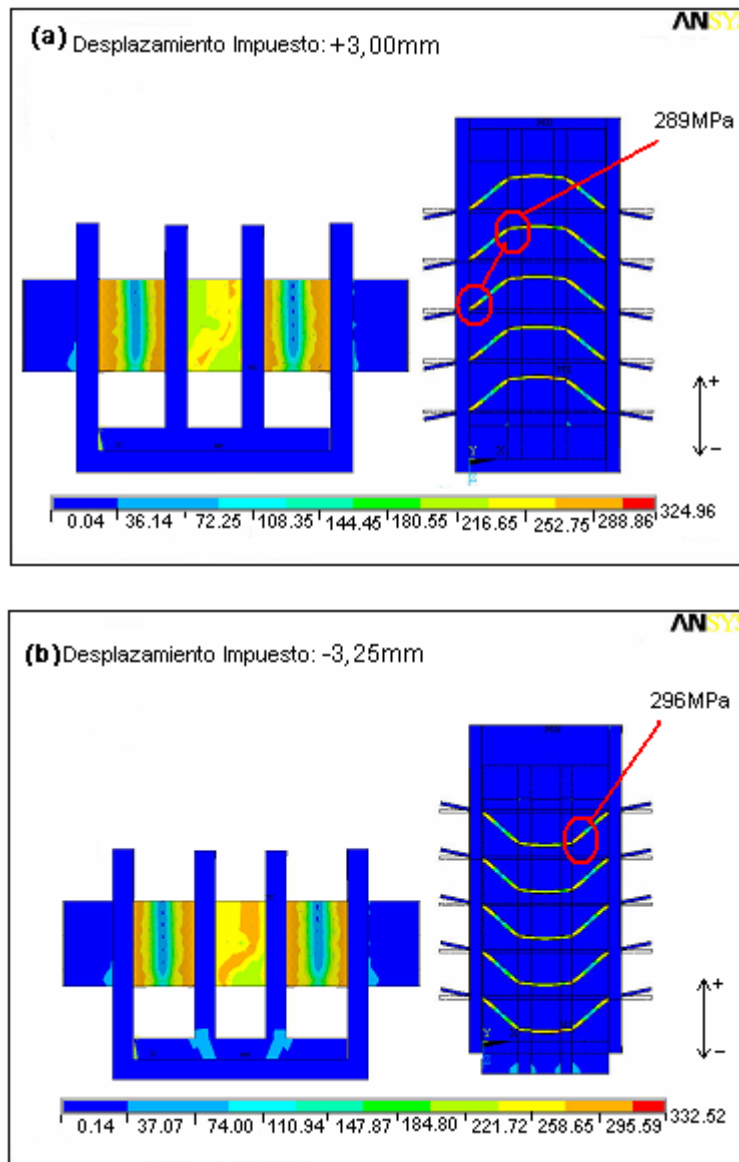


Figura 6.36. Distribución de tensiones de Von Mises (en MPa). (a) Para un desplazamiento impuesto de +3.00mm. (b) Para un desplazamiento impuesto de -3.25mm.

se presenta la curva fuerza-desplazamiento obtenida a través de los resultados del modelo numérico. Las fuerzas y desplazamientos allí mostrados corresponden a una sola lámina, específicamente a un nodo del tramo central. En la gráfica se observan los cambios de pendiente de la curva, que indican la transición entre cada una de las etapas señaladas anteriormente. Se tiene que la incursión en el rango inelástico comienza a partir de 1.75mm de desplazamiento, con una fuerza de 716N (72kgf) para una sola lámina.

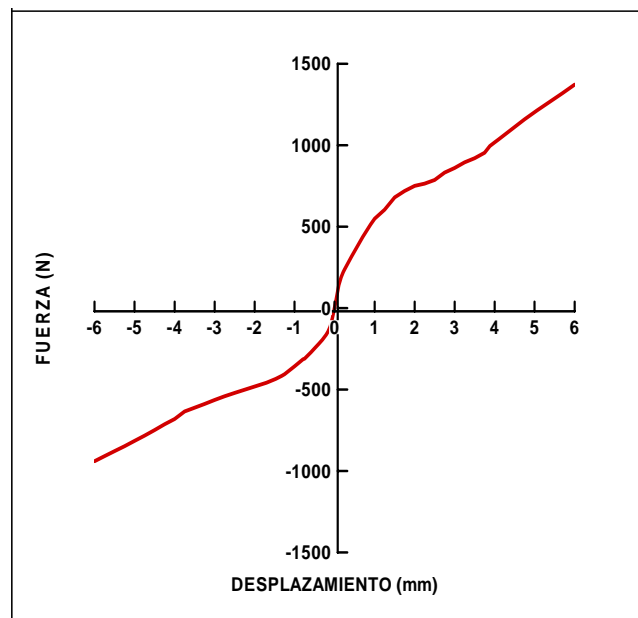


Figura 6.37. Curva fuerza-desplazamiento obtenida a través del modelo numérico.

6.5 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

6.5.1 Descripción del proceso de ensayo

La evaluación experimental del dispositivo se llevó a cabo en la Nave de Ensayos Especiales del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (NEE-IMME-UCV). Este proceso se realizó a través de dos ensayos efectuados en modo cuasi-estático, es decir, con aplicación de carga a velocidad constante y desplazamiento

controlado. Procedimiento que resulta válido para la caracterización de los disipadores de energía dependientes del desplazamiento e independientes de la velocidad.

Se programó un desplazamiento alternante en diente de sierra, con velocidad constante de aproximadamente 0.02mm/seg., e incrementos de amplitud de la función a razón de 2mm por ciclo, ver Figura 6.38. Para llegar a estos valores se tomaron en consideración algunas recomendaciones del trabajo de Cahís (2003), como por ejemplo, que un ensayo realizado con una baja frecuencia de muestreo y poca amplitud de desplazamiento no permite el desarrollo de la plastificación generalizada y resulta poco adecuado para la determinación precisa de los valores de inicio de plastificación. La resolución del transductor de desplazamiento debe ser lo suficientemente pequeña como para registrar con detalle los cambios de relación fuerza-desplazamiento del disipador, lo recomendable es que sea menor que el 10% del valor de desplazamiento de inicio de plastificación. El valor de un incremento de amplitud de 2mm por ciclo se escogió tomando en cuenta los resultados del modelo numérico predictor de comportamiento del disipador.

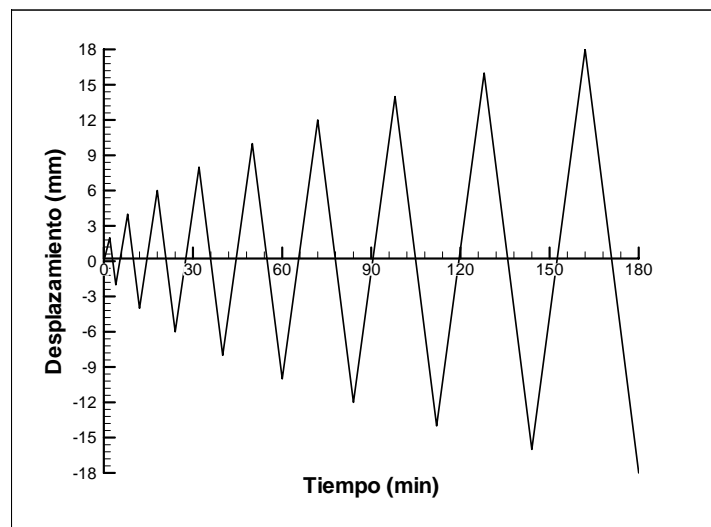


Figura 6.38. Evolución temporal del desplazamiento en el disipador.

El primer ensayo se hizo a modo de calibración, para verificar si los valores seleccionados para la velocidad de desplazamiento y la amplitud de la función eran los adecuados para captar con detalle el inicio del proceso de plastificación y disipación de energía del dispositivo. Por esta razón solo se llegó al desplazamiento máximo impuesto por la geometría del disipador, 18mm.

En el segundo ensayo, una vez comprobado que la velocidad y amplitud del desplazamiento eran adecuadas, se estudió la estabilidad de los ciclos histeréticos, por ello al alcanzar el máximo desplazamiento esperado (18mm) se repitió el ciclo cinco veces, según el mínimo requerido por las normas FEMA 450 (FEMA 450, 2003).

6.5.2 Equipo y procedimiento de ensayo

El equipo utilizado para llevar a cabo los ensayos consta de los siguientes componentes: Dos gatos hidráulicos, de 20 tf de capacidad, dispuestos para aplicar carga horizontal en sentido positivo y negativo, equipados con su correspondiente celda de presión. En la Figura 6.39 se muestran los dispositivos antes mencionados, como se observa, fueron fijados y acoplados mediante uniones atornilladas a un banco de acero.

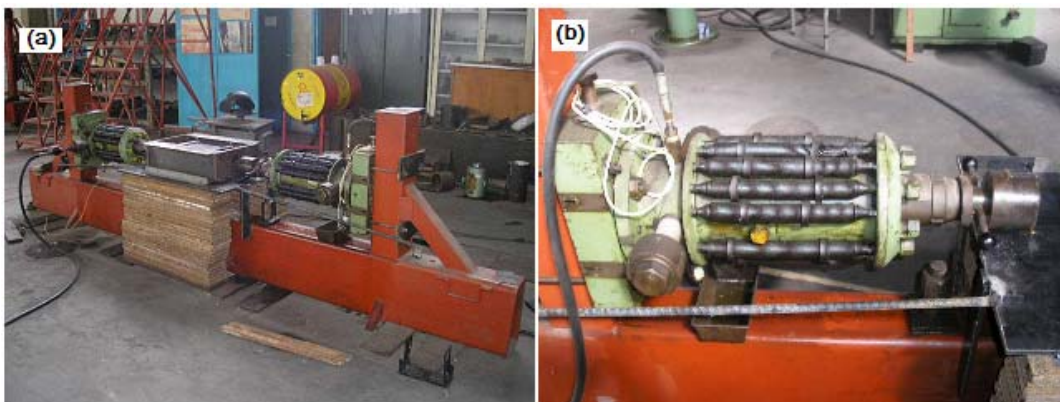


Figura 6.39. Componentes del equipo de ensayo: (a) Gatos hidráulicos acoplados a un banco de acero, (b) Detalle de un gato hidráulico.

Un sistema de alimentación y control de los actuadores en lazo cerrado, que consta de dos computadores, mostrado en la Figura 6.40 (a), y un sistema de realimentación que puede ser observado en la Figura 6.40 (b).



Figura 6.40. Componentes del equipo de ensayo: (a) Sistema de control y alimentación de los actuadores, (b) Sistema de realimentación.

Por último, para activar el mecanismo de acción del disipador se diseñó y construyó un artefacto especial, cuya función es transmitir al disipador las cargas aplicadas por los cabezales de los gatos hidráulicos, lo cual se manifiesta a través del desplazamiento horizontal de la pieza interna del dispositivo y posterior deformación por flexión de las láminas. El artefacto en cuestión se construyó en el Taller Mecánico del IMME, está constituido por una plancha de acero (espesor $\frac{1}{2}$ "") que funciona como una especie de mesa en la cual reposa el disipador, a su vez, a la pieza externa del dispositivo (caja) se le restringe el movimiento lateral con un marco de cabillas cuadradas que la circunda totalmente y que está soldado a la mesa. Para impedir el movimiento vertical del amortiguador se utilizó una traba mecánica conformada por barras roscadas y láminas de acero que lo mantenía fijo a la mesa de apoyo, ver Figura 6.41 (a).

El disipador se ajustó a una altura de forma tal que el cabezal de los gatos aplicara su carga justo en el centro de la tapa frontal, para ello se utilizaron lastres, esto puede ser visto en la Figura 6.41 (b).

Una vez conseguida la altura adecuada se procedió a fijar la mesa al banco de acero que aloja a los gatos hidráulicos, como se muestra en la Figura 6.42 (a).

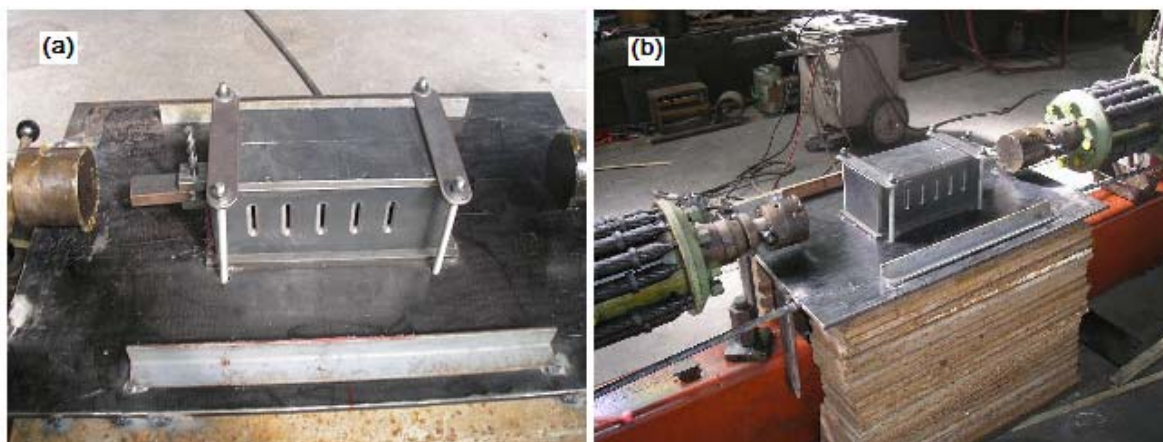


Figura 6.41. (a) Mesa de apoyo y elementos de fijación del disipador, (b) Altura adecuada de la mesa de apoyo.

Por último se fabricó un marco metálico muy robusto, compuesto de láminas de espesor 1" y perfiles H. Este marco tendría como función recibir directamente las cargas de los gatos, transmitir las al disipador y desatar su principio de acción. Para cumplir esta función sin desvirtuar el diseño del disipador, fue concebido como un elemento deslizante, su movimiento fue confinado a una sola dirección a través de unos ángulos soldados a la mesa y su vinculación a la misma se trató como un rodillo simple, para ello se apoya simplemente sobre cabillas de sección circular, lisas y calibradas. El marco fue articulado en una sola dirección a la cara frontal del disipador, única pieza en movimiento de este último, con la finalidad de que se transmitieran solo cargas axiales al disipador y no se produjeran flexiones u otro tipo de fenómenos indeseables. Todo esto se observa en la Figura 6.42 (b).

Para garantizar el deslizamiento natural de las piezas involucradas y disminuir al máximo el coeficiente de roce, se procedió a lubricar con grasa cada una de las superficies es contacto, esto es, parte inferior de pieza interna y caja, cara inferior del marco metálico, cabillas y mesa de apoyo. En las Figuras 6.42(a) y (b) se muestran las perspectivas generales del equipo de ensayo. Con esa disposición física y espacial se aplicó el programa de desplazamientos alternantes que se mencionó anteriormente y se muestra en la Figura 6.38.

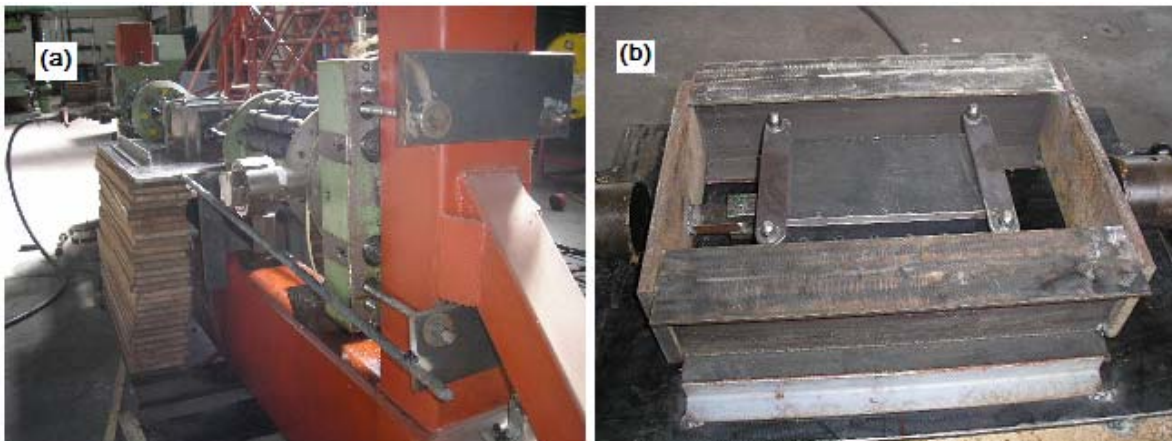


Figura 6.42. (a) Fijación de la mesa de apoyo al banco de acero, (b) Marco metálico robusto y sus conexiones.

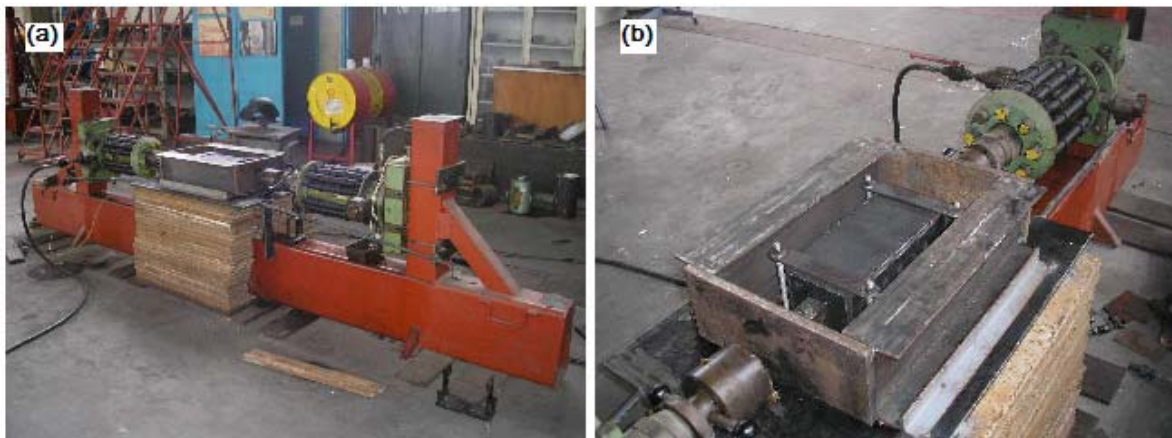


Figura 6.43. (a) Perspectiva general del equipo de ensayo, (b) Detalle del alojamiento del disipador.

6.5.3 Instrumentación

El disipador se instrumentó con un transductor de desplazamiento (LVDT) acoplado al sistema en la parte superior de la caja, tal y como se observa en la Figura 6.44. Se colocó una barra especial en la conexión del marco metálico, de tal forma que el LVDT pudiera medir el desplazamiento relativo entre la caja y el marco, o lo que es lo mismo entre la caja y la pieza interna del disipador. La fuerza horizontal aplicada al marco metálico se midió a partir de dos celdas de presión, el desplazamiento de los cabezales de los gatos se mantuvo controlado a través de las mediciones del LVDT mediante el módulo electrónico de medida y control. La carga neta correspondiente a determinado desplazamiento se determinó por la diferencia de la carga entre los dos gatos, puesto que ambos cabezales se mantuvieron en contacto permanente con el marco metálico.

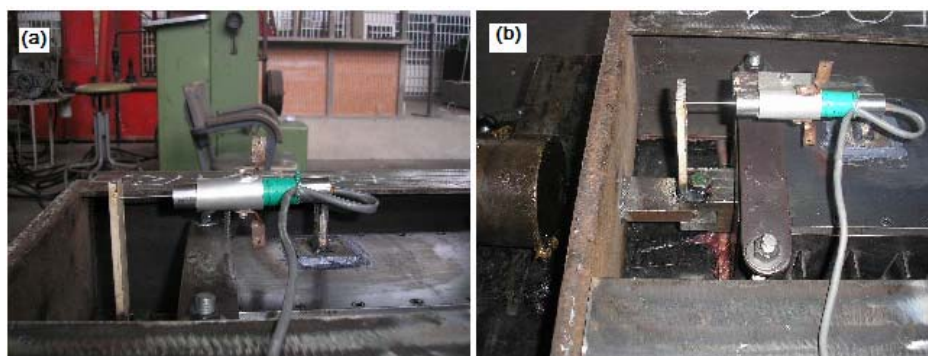


Figura 6.44. Instrumentación: (a) Ubicación del transductor de desplazamiento, (b) Detalle de las conexiones del transductor de desplazamiento.

A continuación se muestra una secuencia de imágenes pertenecientes a la ejecución del primer ensayo. En la Figura 6.45(a), desde arriba se observa la flexión de las láminas como consecuencia de un desplazamiento hacia la derecha del marco metálico. En la Figura 6.45(b) se muestra en detalle dicho desplazamiento, nótese como sobresale de la caja la pieza interna del disipador al igual que el vástago del LVDT, de esta manera realiza las mediciones

correspondientes. La deformación que experimentan las láminas se advierte en detalle en la Figura 6.45(c), se puede distinguir claramente como el eje longitudinal de las mismas ya no permanece recto.

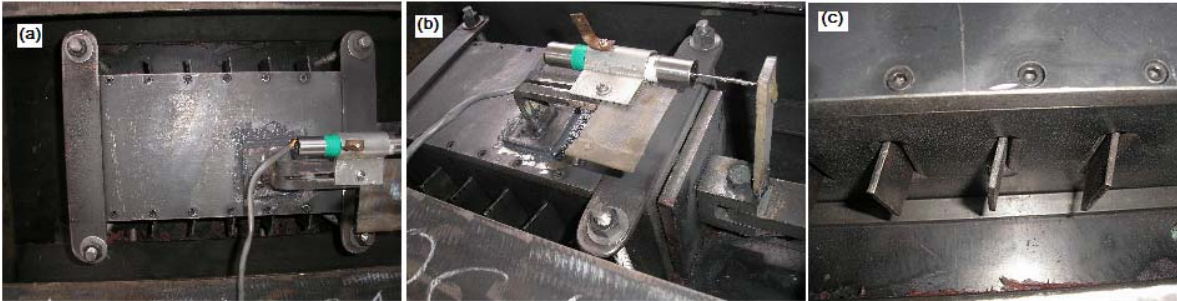


Figura 6.45. Ejecución del ensayo: (a) Vista superior flexión hacia la derecha en las láminas, (b) Detalle del desplazamiento de la pieza interna del disipador, (c) Detalle de la deformación experimentada por las láminas.

En la Figura 6.46(a), se observa la flexión de las láminas como consecuencia de un desplazamiento hacia la izquierda del marco metálico. En la Figura 6.46(b) se muestra en detalle dicho desplazamiento, nótese como se introduce en la caja la pieza interna del disipador y así como el vástago del LVDT. La deformación que sufren las láminas se advierte en detalle en la Figura 6.46(c), se percibe visiblemente como el eje longitudinal de las mismas ya no permanece recto.



Figura 6.46. Ejecución del ensayo: (a) Vista superior flexión hacia la izquierda en las láminas, (b) Detalle del desplazamiento de la pieza interna del disipador, (c) Detalle de la deformación experimentada por las láminas.

6.5.4. Análisis del comportamiento experimental del disipador

6.5.4.1. Comportamiento histerético

En la Figuras 6.47(a) y 6.47(b) se aprecian las curvas histeréticas que resultaron de los ensayos 1 y 2, respectivamente. En primer lugar se observa una similitud entre los comportamientos registrados en los dos ensayos, pues las curvas obtenidas son muy similares. En ambos casos los ciclos presentados tienen una forma bien definida, a medida que aumenta la amplitud del desplazamiento las curvas se van tornando más anchas y los ciclos más robustos, sin embargo, al inicio se nota la presencia de un estrangulamiento. Este efecto es debido al deslizamiento que ocurre entre las láminas y los bordes de las ranuras cuando se hace efectiva la deformación por flexión en dichas láminas. Dentro del comportamiento del disipador esto se considera aceptable, puesto que se observa muy marcado sólo en los primeros ciclos y aunque en los ciclos 5 y 6 aún se nota un muy leve estrangulamiento, luego el efecto desaparece y se comienza a observar mayor amplitud en las curvas, esto se muestra en la Figura 6.48, en la que se han graficado individualmente los ciclos 3, 4, 5 y 6 del primer ensayo.

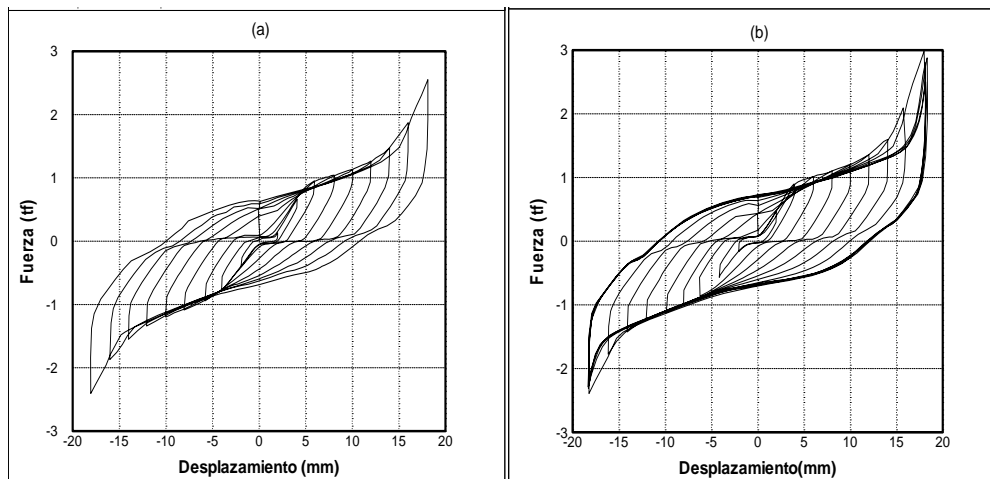


Figura 6.47. Comportamiento experimental del disipador: Ciclos histeréticos, (a) Ensayo 1, (b) Ensayo 2.

También se puede notar que el endurecimiento del acero tiene un efecto importante en el comportamiento del disipador, ya que luego de la cedencia se observa que al aumentar el desplazamiento siempre se incrementa la fuerza. Por otro lado, no se registró caída de la resistencia durante los ensayos para ninguno de los ciclos de histéresis.

Resulta importante destacar la estabilidad que muestran los ciclos de ambos ensayos. Incluso, en el segundo ensayo, en el que se repitió el máximo desplazamiento cinco veces, los ciclos no sufrieron alteraciones importantes, no se observó pérdida de resistencia ni de la capacidad de disipar energía. La pérdida de rigidez registrada fue muy leve.

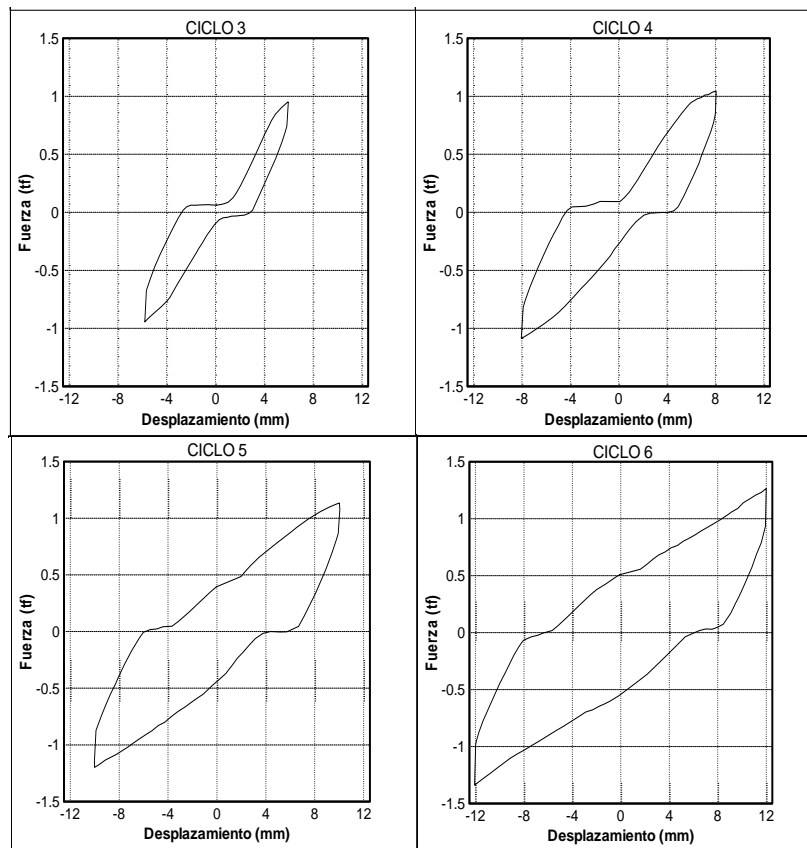


Figura 6.48. Ciclos individuales del ensayo 1.

A partir de desplazamientos superiores a los 14mm se aprecia un aumento de la resistencia en las curvas. Este efecto se produce por la traba mecánica de las láminas. Entre las láminas y las ranuras el contacto es mínimo, gracias a la curvatura que existe en estas últimas, esto permite que las láminas se comporten como vigas simplemente apoyadas. Cuando ocurre la deformación por flexión dicha configuración permite la rotación en los extremos de las láminas, una vez que se superan los 14mm esta rotación se ve impedida porque las láminas se traban en las ranuras, debido a esto se requiere una mayor cantidad de fuerza para deformarlas. El efecto antes descrito se ilustra en la Figura 6.49.

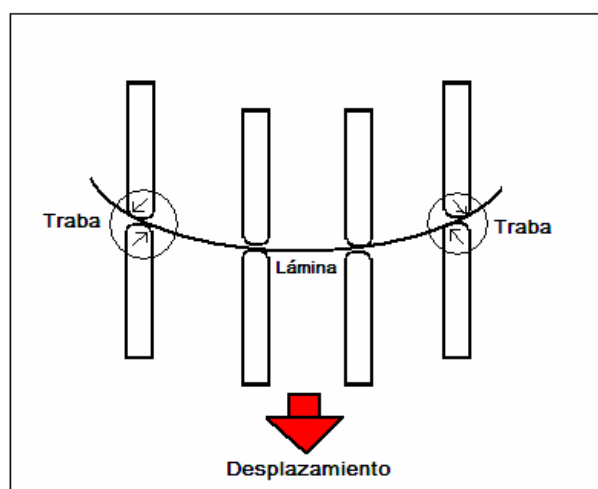


Figura 6.49. Acción de traba mecánica entre lámina y ranuras.

El efecto de traba mecánica podría ser ventajoso en ciertos casos, ya que quizás pudiera contribuir a una mayor reducción en las derivas de entrepiso de la estructura, sin embargo, sería conveniente estudiar este efecto y la influencia de las fuerzas adicionales que se podrían introducir al sistema. Dado que el efecto traba se produce a partir de un rango específico de desplazamientos (14mm), para suprimirlo se podría restringir las deformaciones en el disipador hasta ese valor. Por lo que el disipador podría funcionar sin activarse el efecto de traba mecánica

con un comportamiento histerético como el mostrado en la Figura 6.50, en la que se han suprimido los ciclos donde hace presente dicho efecto.

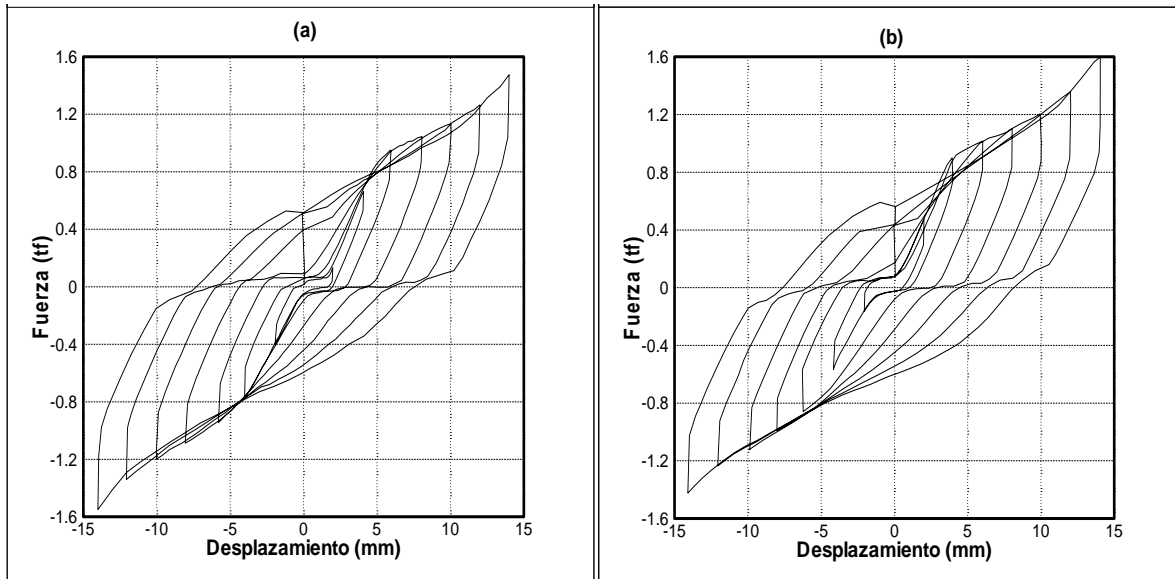


Figura 6.50. Comportamiento histerético hasta 14mm: (a) Ensayo 1, (b) Ensayo 2.

6.5.4.2. Energía disipada

El área encerrada por un ciclo de histéresis representa la energía disipada por el dispositivo para dicho ciclo. La Figura 6.51 muestra la energía disipada acumulada en cada ciclo de histéresis de los dos ensayos realizados.

Al analizar las curvas de la Figura 6.51 puede verse en primer lugar la similitud obtenida entre los dos ensayos. La energía disipada acumulada tiende a incrementarse a medida que aumenta el número de ciclos y por ende la amplitud de los desplazamientos impuestos. Para el total de ciclos desarrollados en cada ensayo no se registró pérdida de la capacidad de disipación de energía. Obsérvese que en el segundo ensayo donde se efectuó un mayor número de ciclos la curva sigue en ascenso, sin apreciarse ningún cambio en la pendiente de la misma.

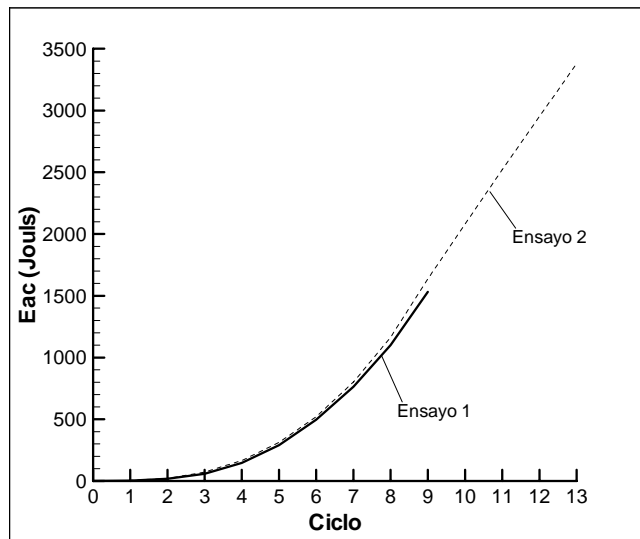


Figura 6.51. Energía disipada acumulada en cada ciclo ensayado.

6.5.4.3. Fuerza y desplazamiento correspondientes al inicio de la plastificación

La Figura 6.52 muestra las envolventes positivas y negativas de los ciclos de histéresis obtenidos en los ensayos realizados.

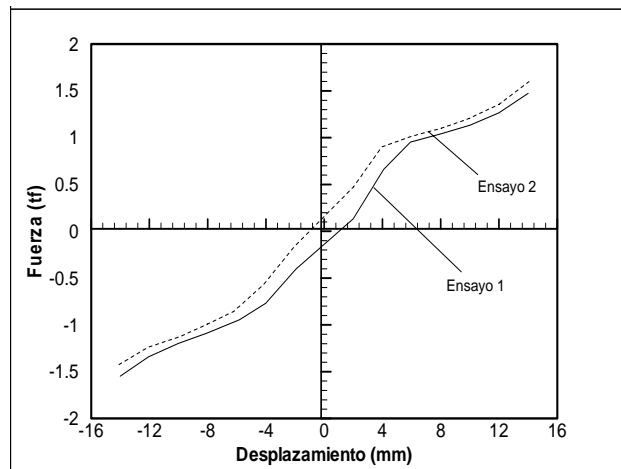


Figura 6.52. Envolventes de los ciclos de histéresis.

Como se observa, ambas curvas son muy similares entre sí, incluso las envolventes positiva y negativa de cada ensayo guardan una estrecha relación. Se nota tal y como se había mencionado al analizar el comportamiento histerético que el fenómeno está gobernado por el endurecimiento del acero. El desplazamiento y la fuerza cedente se pueden determinar fácilmente, pues es claro el cambio de pendiente que ocurre en las curvas pudiéndose establecer claramente la zona lineal elástica y la zona de plastificación-endurecimiento.

Dadas las características de las curvas un modelo bilineal con endurecimiento es el que se ajusta de manera adecuada al patrón de comportamiento. Esto se muestra en la Figura 6.53 donde se aprecia el ajuste realizado a cada de las zonas de las curvas. Para el análisis se seleccionaron las envolventes en las que se logró un mejor ajuste de las rectas y eran más similares entre sí.

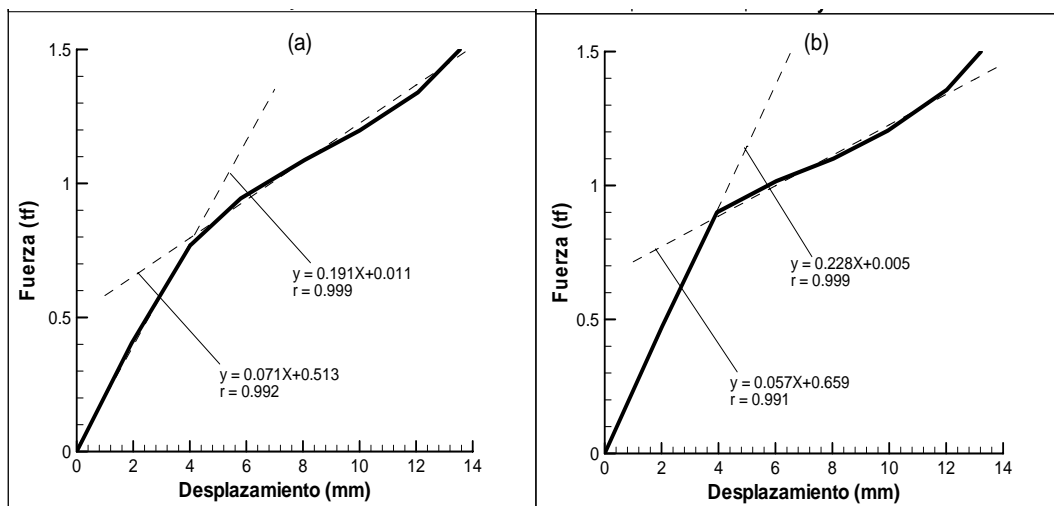


Figura 6.53. Relación fuerza-desplazamiento: (a) Ensayo 1, (b) Ensayo 2.

En la tabla 6.3 se pueden apreciar los valores correspondientes a las fuerzas y desplazamientos de inicio de plastificación para los ensayos realizados, asimismo se muestran los valores máximos y promedios. En resumen se puede decir que en término medio el disipador desarrolló un desplazamiento cedente alrededor de 3.99mm y una fuerza cedente de 0.85tf (8500N).

Tabla 6.3. Valores de fuerza y desplazamientos asociados al comportamiento experimental del disipador.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Valor medio
Desplazamiento Cedente (mm)	4.16	3.81	3.99
Fuerza Cedente (tf)	0.81	0.88	0.85
Fuerza Máxima (tf) (a los 14mm)	1.55	1.36	1.46
Fuerza Máxima (tf) (a los 18mm)	2.41	2.98	2.70

La rigidez del sistema se determinó a partir de la pendiente de la recta que se ajustó a la parte lineal de cada envolvente, la cual en término medio está alrededor de 0.21 tf/mm.

6.5.4.4 Daño

El daño observado en el disipador luego de los ensayos realizados fue tal como se había previsto en el diseño conceptual del mismo. Al analizar el estado de las piezas externa (caja) e interna del disipador, se pudo constatar que no hubo daños ni en el cuerpo de las mismas, ni en las ranuras que hacían contacto con las láminas. Por el contrario al analizar el estado de las láminas se comprobó que estas sufrieron daños importantes en la zona central y en los extremos. Este daño se muestra como la descamación de la capa superficial y deformación permanente en la lámina. Cabe destacar que este deterioro no conduce a la pérdida de resistencia ni de la capacidad de disipar energía en el dispositivo. Dada la configuración del disipador no se pudo observar en que ciclo comenzó el daño en las láminas, sin embargo, al analizar los ciclos de histéresis obtenidos se presume que debe haber comenzado a partir del ciclo 4.

En la Figura 6.54 se muestra el aspecto de las pieza interna y de la caja al finalizar los ensayos, nótese que las ranuras de ambas piezas no muestran evidencia de daño alguno.

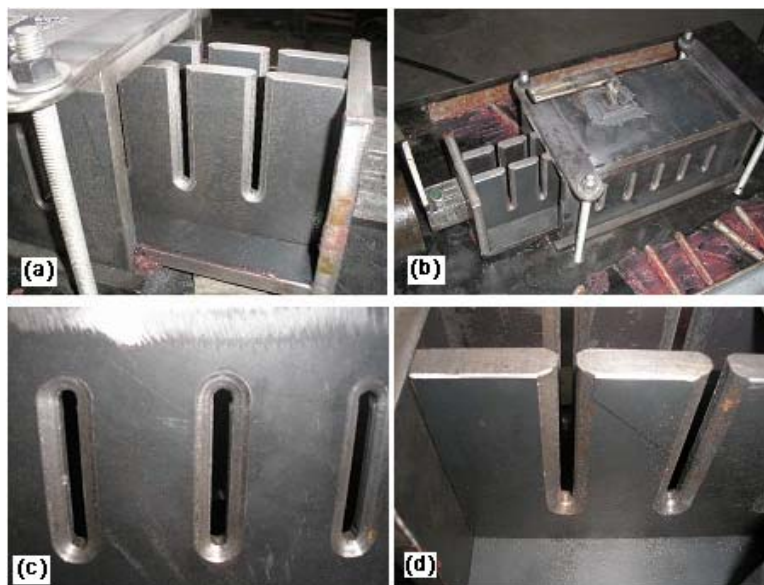


Figura 6.54. Aspecto de las piezas del disipador al terminar los ensayos: (a) Pieza interna, (b) Pieza interna y caja, (c) Ranuras caja, (d) Ranuras pieza interna.

En la Figura 6.55 se aprecia la apariencia final de las láminas luego de realizar los ensayos. Obsérvese que en las láminas el daño ocurre principalmente en la zona central y particularmente en el ensayo 2 se pudieron ver unas marcas que delimitaban la zona, asimismo marcas similares se apreciaron en los extremos de las láminas. Es importante destacar que un patrón de daño análogo fue evidenciado a través de la distribución de esfuerzos en el modelo de elementos finitos realizado.

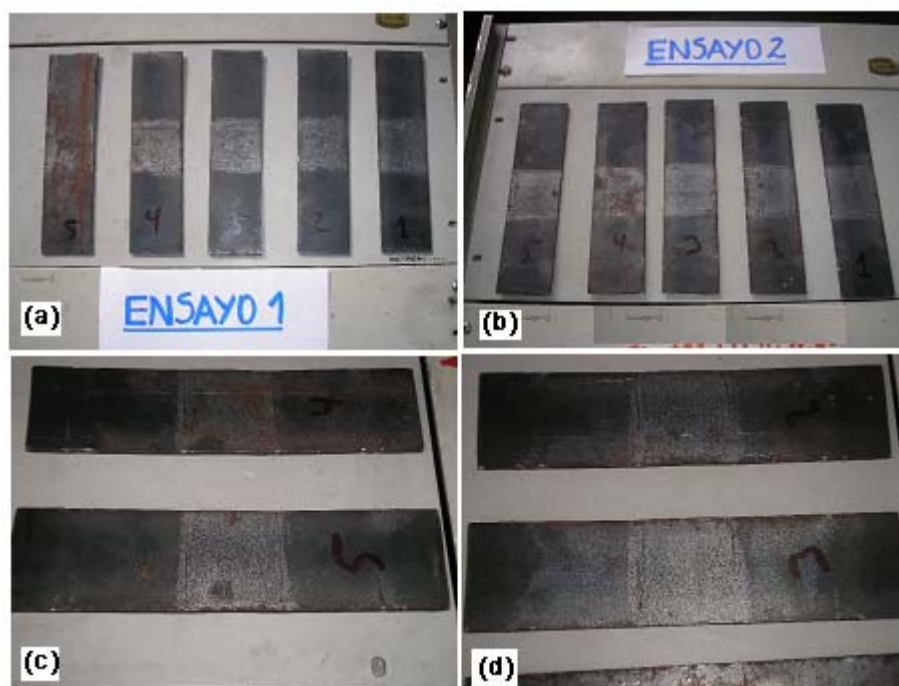


Figura 6.55. Aspecto de las láminas del disipador al finalizar los ensayos: (a) Aspecto general ensayo 1, (b) Aspecto general ensayo 2, (c) Detalle de la lámina 5 del ensayo 2, (d) Detalle de la lámina 3 del ensayo 2.

6.6 APLICACIÓN NUMÉRICA

A continuación se presenta la aplicación del amortiguador propuesto en esta investigación.

6.6.1 Sistema y propiedades

Se analiza la estructura de un edificación escolar de concreto reforzado de configuración típica en Venezuela, denominada tipo “cajetón cerrado”, que forma parte del grupo de edificaciones estudiadas como parte de un Proyecto realizado por el IMME conjuntamente con FEDE y FUNVISIS. Esta edificación está constituida por un módulo con planta en forma de “C”, sin presentar junta de

dilatación alguna. En la Figura 6.56 se puede observar la configuración típica de este tipo de escuelas en un modelo realizado en tres dimensiones.

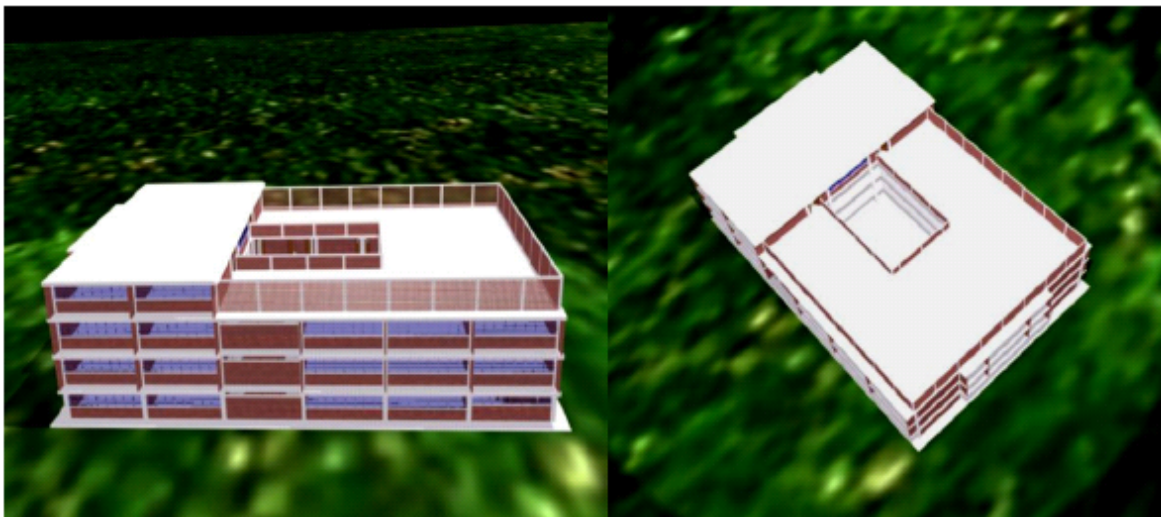


Figura 6.56. Configuración típica de las edificaciones tipo “Cajetón cerrado” (Sosa y Taboada, 2007).

La Figura 6.57 muestra el plano de planta de la edificación y la elevación de uno de los pórticos en dirección longitudinal. La estructura está conformada por siete pórticos en dirección transversal separados a 7.20m y seis pórticos en dirección longitudinal separados a 7.20m y 3.60m. En el sistema resistente todas las columnas son de sección cuadrada de 40cmx40cm, las vigas en dirección longitudinal son altas de sección rectangular de 40cmx60cm y las vigas en dirección transversal son planas de sección rectangular de 50cmx30cm.

Para efectos de esta investigación se tomó uno de los pórticos transversales más cargados de la estructura descrita anteriormente. Se modeló como un pórtico plano de tres pisos, con periodo fundamental (T) de 1.00seg., masas concentradas en el centro de las vigas, tomando la condición de diafragma rígido y considerando un amortiguamiento (ξ) del 5% para cada uno de los modos de vibración.

En la Figura 6.58 se aprecia gráficamente el sistema estudiado y sus propiedades dinámicas se muestran en la tabla 6.4. La rigidez K_f es la rigidez total del piso, se

consideró una resistencia para el concreto ($f'c$) de 210 kgf/cm² y un módulo de elasticidad (E) de 213546 kgf/cm².

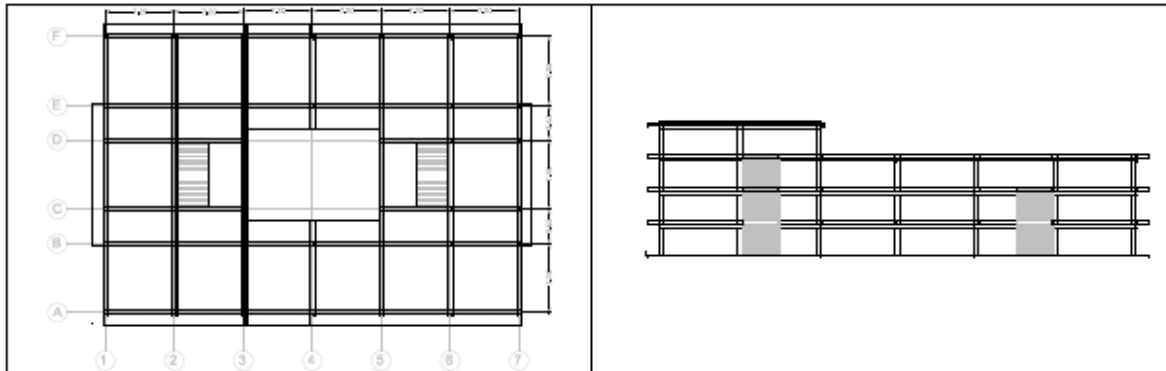


Figura 6.57. Plano de planta (izquierda) y pórtico en dirección longitudinal (derecha) (Sosa y Taboada, 2007).

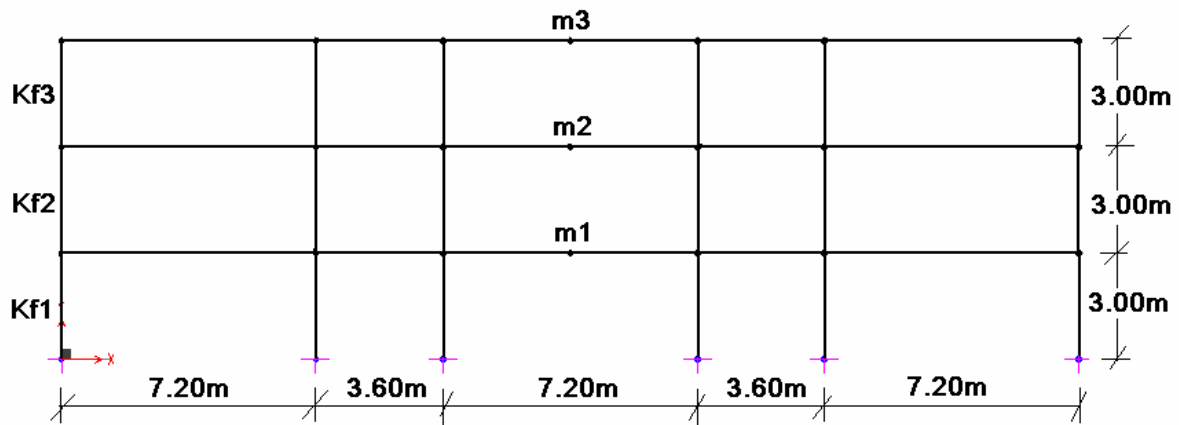


Figura 6.58. Sistema estudiado para la aplicación numérica del amortiguador.

Tabla 6.4. Propiedades dinámicas del sistema estudiado.

Sistema Estructural	Piso	m (kgfseg ² /m)	Kf (kgf/m)
Pórtico	1	61000	23255813.95
	2	61000	23255813.95
	3	55000	11494252.90

6.6.2 Procedimiento de diseño

Para la inclusión de los amortiguadores propuestos en una estructura y evaluar la eficacia de los mismos, es necesario formular un procedimiento de diseño. Con base en la metodología presentada por Tsai *et al.*, (1993) y a las consideraciones de diseño explicadas en Soong y Dargush (1997) se estableció el siguiente procedimiento de adaptación de los amortiguadores a una estructura:

- 1.- El primer paso es analizar el sistema sin amortiguadores y determinar así la rigidez (K_f) de cada piso de la estructura.
- 2.- Decidir la ubicación de los dispositivos en el edificio y considerar que el sistema de amortiguamiento adicional estará conformado por el amortiguador propiamente dicho y los elementos que lo conectarán a la estructura, en este caso brazos rígidos de acero constituidos por perfiles tubulares de sección cuadrada, que en conjunto aportarán una rigidez adicional al sistema (K_a).
- 3.- Utilizando las propiedades obtenidas del ensayo del amortiguador a ser usado, obtener un amortiguador viscoso equivalente. Tomando en cuenta la rigidez elástica obtenida del ensayo (K_d) y determinando su constante de amortiguamiento equivalente (C_e), según el procedimiento descrito por Hanson y Soong (2001).
- 4.- Establecer una relación entre la rigidez de cada piso (K_f) y la rigidez del conjunto amortiguador (K_a), esta relación se denota como SR.

$$SR = \frac{K_a}{K_f} \quad 6.4$$

En este trabajo, según lo recomendado por Tsai *et al.*, (1993) y tomando en consideración el período de la estructura seleccionada para el análisis, se adoptó un valor de SR cercano a 2.

- 5.- Adaptar los valores de K_d y K_a según el valor de SR seleccionado y determinar los valores de rigidez de piso de la estructura ahora con los amortiguadores incorporados.
- 6.- Analizar la estructura con amortiguadores y repetir los pasos 3 y 4 hasta obtener los resultados deseados para el sistema.
- 7.- Rediseñar los amortiguadores tomando en cuenta sus propiedades elásticas.

El proceso de rediseño de los amortiguadores implica la formulación de una expresión matemática que, considerando las propiedades geométricas del dispositivo, permita estimar la rigidez elástica obtenida en el ensayo. Esto permitiría, de ser necesario, determinar unas nuevas dimensiones para el dispositivo.

En esta investigación se propone la siguiente expresión, considerando el modelo de la Figura 6.21 y con base a la ecuación 6.3:

$$K_d = N \cdot \frac{E \cdot b \cdot h^3}{0.42 \cdot L^3} \quad 6.5$$

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

Para la obtención de las respuestas de las estructuras con y sin amortiguadores se utilizó el programa SAP 2000 v. 11.0. Los amortiguadores se modelaron como "links" tipo "Damper". Se realizó un análisis lineal con los acelerogramas de El Centro, Taft y Miyagi-Oki, cuyas propiedades fueron mostradas en el capítulo 4, tabla 4.2. Los acelerogramas fueron normalizados para una aceleración máxima de 0.30g. Para ver el efecto de los amortiguadores las estructuras se comparan en términos de sus derivas de entrepiso, cortantes por piso, periodos de vibración y amortiguamiento modal. La Figura 6.59 muestra la disposición adoptada para los amortiguadores. Para esta distribución se consideraron los resultados obtenidos en los capítulos 4 y 5, en cuanto a la cantidad y posición de los amortiguadores.

De esta manera, se optó por una disposición uniforme y simétrica de los dispositivos tomando en cuenta que la estructura tiene período largo y es aporricada, para lo cual esta distribución resulta ser la más conveniente.

Queda claro que el procedimiento aquí señalado es un procedimiento de diseño preliminar y que para un estudio más profundo de la eficacia de los dispositivos, se recomienda realizar un análisis no lineal de la estructura para verificar el comportamiento de los elementos resistentes del sistema y la disipación de la energía.

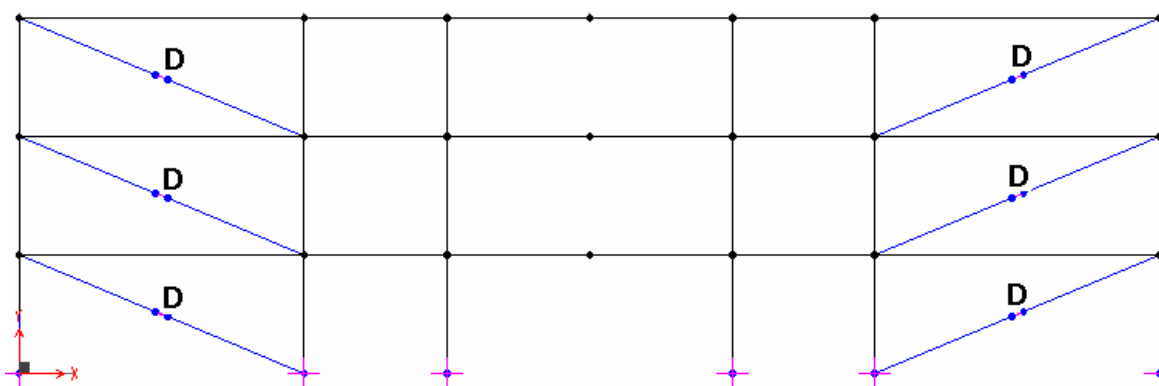


Figura 6.59. Disposición adoptada para los amortiguadores.

6.6.3 Resultados y análisis

El procedimiento descrito anteriormente se aplicó de forma iterativa hasta obtener niveles importantes de reducción en la respuesta de la estructura, considerados en este trabajo alrededor de un 50% para dicha reducción. Se comenzó utilizando el amortiguador con sus propiedades originales, esto es, una rigidez elástica (K_d) obtenida del ensayo de 194100kgf/m y una constante de amortiguamiento equivalente (C_e) de 4975.9kgf-s/m. En la tabla 6.5 se muestran los valores finales adoptados para la rigidez por piso incluyendo los amortiguadores (K_a), la rigidez elástica del amortiguador (K_d) y la correspondiente constante de amortiguamiento equivalente (C_e). Si se comparan los valores de K_a con los de K_f mostrados en la

tabla 6.4, se puede notar que la relación entre ellos está alrededor de 2, asimismo obsérvese como se deben magnificar las propiedades originales del amortiguador. Esto implica un cambio de dimensiones en el mismo para poder generar el efecto deseado.

Tabla 6.5. Valores adoptados para la rigidez del piso con amortiguadores (K_a), la rigidez del amortiguador (K_d) y su constante de amortiguamiento equivalente (C_e).

Piso	K_a (kgf/m)	K_d (kgf/m)	C_e (kgf-s/m)
1	45454545.5	11484000	298553.4
2	45454545.5	3828000	99517.8
3	22727272.7	11484000	298553.4

En la tabla 6.6 se aprecian los valores obtenidos para los periodos (T_n) y amortiguamientos en cada modo de la estructura (ξ_n). Se ha denotado como “Caso s/a” a la estructura sin amortiguadores y como “Caso c/a” a la estructura con amortiguadores. Nótese que los periodos de vibración disminuyen en un 30% en término medio en todos los modos. Por otro lado, los amortiguamientos modales aumentan un porcentaje importante, así se observa que en el primer modo el amortiguamiento prácticamente se duplica y en los modos subsiguientes prácticamente se triplica y cuadruplica, respectivamente.

Tabla 6.6. Valores obtenidos para el periodo (T_n) y el amortiguamiento en cada modo (ξ_n).

Modo	T_n (seg)		ξ_n (%)	
	Caso s/a	Caso c/a	Caso s/a	Caso c/a
1	1.00	0.72	5.00	9.36
2	0.36	0.25	5.00	18.13
3	0.25	0.19	5.00	20.56

Las derivas de entrepiso se aprecian en la tabla 6.7 y su correspondiente porcentaje de reducción al incluir los dispositivos en el sistema. La estructura sin amortiguadores exhibe derivas de entrepiso que oscilan entre 7 por mil y 22 por mil, situándose gran parte de ellas fuera del límite permitido por la norma. Se observa que al incluir los dispositivos las derivas experimentan una reducción importante. En el primer entrepiso se reduce entre un 44.36% y un 69.46% al analizar la respuesta para los tres sismos investigados, y en los otros casos entre un 18% y un 50%. Ya en este escenario todos los valores quedan por debajo de los límites permitidos.

Tabla 6.7. Valores obtenidos para las derivas de entrepiso (m).

Sismo	Piso	Caso s/a	Caso c/a	%r
EL Centro	1	0.0653	0.0221	66.16
	2	0.051	0.0325	36.27
	3	0.027	0.0146	45.93
Miyagi-Oki	1	0.0406	0.0124	69.46
	2	0.0327	0.0164	49.85
	3	0.0218	0.0076	65.14
Taft	1	0.055	0.0306	44.36
	2	0.0495	0.0401	18.99
	3	0.0359	0.0169	52.92

Situación similar se observa en los cortantes de piso, cuyos valores igualmente se reducen en porcentajes análogos a los anteriormente mencionados al incluir los amortiguadores dentro de la estructura.

Tabla 6.8. Valores obtenidos para los cortantes de piso (kgf).

Sismo	Piso	Caso s/a	Caso c/a	%r
EL Centro	1	125240	42335	66.20
	2	97758	62364	36.21
	3	51794	27956	46.02
Miyagi-Oki	1	77788	23866	69.32
	2	62783	31549	49.75
	3	41753	14585	65.07
Taft	1	105530	58655	44.42
	2	94905	76829	19.05
	3	68820	32520	52.75

Estos resultados permiten inferir que la inclusión de los amortiguadores en la estructura investigada conlleva a un beneficio importante en la misma al reducir notablemente su respuesta, conviene entonces considerar esta propuesta como una opción de futura readecuación para este tipo de sistemas.

Posteriormente, cabe preguntarse ¿De qué tamaño deben ser los amortiguadores para producir estos efectos? En respuesta a ello, se hace uso de la ecuación 6.5, para lo cual se decide mantener en sus valores originales algunos de los parámetro involucrados, tales como: la base, la longitud de las láminas, el ancho y alto de la pieza externa o caja, quedando como variables el número de láminas (N) empleado y el espesor (h) de las mismas. De esta manera se llega a los resultados mostrados en la tabla 6.9, que se pueden interpretar como sigue: para un valor de K_d igual a 11484 kgf/mm, que sería el requerido para el primer y último piso del pórtico, se propone un número de láminas igual a 15 y un espesor de 6.35mm (1/4"), originalmente se tienen 5 láminas de 3.1mm (1/8") de espesor, quiere decir esto que podría alargarse la caja hasta albergar estas quince láminas (se triplicaría su profundidad), o se colocan tres amortiguadores con la pieza externa original pero con el espesor de lámina requerido. Asimismo para el valor de K_d igual a 3828 kgf/mm que se requiere en el segundo piso, convendría colocar un dispositivo con una caja que tenga el doble de la profundidad original (albergando 10 láminas) o dos amortiguadores con cinco láminas de espesor 1/4".

Tabla 6.9. Dimensiones para los amortiguadores.

Kd (Kgf/mm)	N	b(mm)	h(mm)	L (mm)
3828.00	10	50	6.35	126
11484.00	15	50	6.35	126

Para culminar también surge la pregunta: ¿Cómo debe ser la estructura en la cual tengan efecto los amortiguadores originales? Para responderla, se llevó a cabo un proceso iterativo del cual resulta que la estructura debe ser más flexible que la estudiada en un principio. Se presenta como alternativa un pórtico idealizado con las mismas dimensiones y configuración del que se muestra en la Figura 6.58, pero con la particularidad de que sus elementos resistentes están todos conformados por perfiles I de 300mm de alto por 127mm de ancho y espesores de ala y alma de 9mm y 6mm respectivamente.

En este caso se quiso mantener el mismo valor de periodo fundamental por lo que hubo que ajustar las masas, y se mantuvo un 5% de amortiguamiento modal. Los amortiguadores se colocaron como se muestra en la Figura 6.59, ubicándose un solo dispositivo por piso con sus dimensiones y propiedades originales.

Los resultados que se obtienen al aplicar el procedimiento de diseño para la estructura con amortiguadores fueron similares a los obtenidos en el análisis del pórtico del “Cajetón” y se muestran en las tablas subsiguientes.

Tabla 6.10. Propiedades dinámicas del sistema idealizado.

Sistema Estructural	Piso	m (kgfseg ² /m)	Kf (kgf/m)
Pórtico	1	1220	357015.35
	2	1220	357015.35
	3	320	178507.7

Tabla 6.11. Valores adoptados para la rigidez del piso con amortiguadores (K_a), la rigidez del amortiguador (K_d) y su constante de amortiguamiento equivalente (C_e) en la estructura idealizada.

Piso	K_a (kgf/m)	K_d (kgf/m)	C_e (kgf-s/m)
1	994035.78	194100	4975.89
2	994035.78	194100	4975.89
3	497017.90	194100	4975.89

Tabla 6.12. Valores obtenidos para el periodo (T_n) y el amortiguamiento en cada modo (ξ_n) de la estructura idealizada.

Modo	T_n (seg)		ξ_n (%)	
	Caso s/a	Caso c/a	Caso s/a	Caso c/a
1	1.00	0.63	5.00	13.07
2	0.36	0.23	5.00	27.04
3	0.25	0.16	5.00	36.71

Tabla 6.13. Valores obtenidos de derivas de entrepiso (m) para la estructura idealizada.

Sismo	Piso	Caso s/a	Caso c/a	%r
EL Centro	1	0.0775	0.0328	57.68
	2	0.0544	0.0241	55.70
	3	0.0151	0.0062	58.94
Miyagi-Oki	1	0.0467	0.0176	62.31
	2	0.0372	0.0127	65.86
	3	0.0116	0.0033	71.55
Taft	1	0.0653	0.0314	51.91
	2	0.0555	0.0221	60.18
	3	0.0184	0.0056	69.57

Tabla 6.14. Valores obtenidos para los cortantes de piso (kgf) para la estructura idealizada.

Sismo	Piso	Caso s/a	Caso c/a	%r
EL Centro	1	2305.3	975.9	57.67
	2	1617.3	717.5	55.64
	3	449.4	183.3	59.21
Miyagi-Oki	1	1388.4	524.4	62.23
	2	1107.4	378.3	65.84
	3	344.9	96.8	71.93
Taft	1	1941.9	934.3	51.89
	2	1649.8	657.9	60.12
	3	547.5	165.7	69.74

Al analizar los resultados anteriores, resulta claro que para esa estructura los amortiguadores, conservando sus dimensiones originales, tienen influencia directa sobre la respuesta de la misma. Obsérvese que los porcentajes de reducción son similares a los obtenidos para el caso anteriormente estudiado.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

7.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado en forma analítica el efecto de la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta de edificios de comportamiento elásticos-lineal de cinco pisos, para dos tipos de sistemas estructurales, sometidos a una familia de sismos, considerando amortiguamiento no-clásico. Asimismo, se ha investigado el error que se comete en el cálculo de la respuesta sísmica de una estructura con amortiguadores al utilizar el método de superposición modal tradicional (Método Simplificado). Se ha desarrollado una nueva propuesta de disipador de energía metálico para estructuras existentes de baja altura, a través del diseño y construcción de un prototipo en acero estructural y su posterior evaluación numérica y experimental.

A continuación, se presentan con mayor detalle las conclusiones a las que conduce la investigación realizada.

7.1.1 Efecto de la posición, número y distribución de los amortiguadores en la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de estructuras de baja altura

- ∞ La posición, número y distribución de los amortiguadores tiene gran influencia en la respuesta estructural. Pero este efecto es sensible al valor del período fundamental y al tipo de sistema estructural del edificio.

- ∞ Cuando se utiliza un solo amortiguador en la estructura, el mayor valor de amortiguamiento del modo fundamental se obtiene cuando el dispositivo se ubica en el primer entrepiso. La utilización de un mayor número de amortiguadores, colocando un dispositivo por entrepiso y manteniendo constante la suma de las constantes “C” de amortiguamiento viscoso, incrementa notablemente el amortiguamiento del modo fundamental en las estructuras aporticadas, principalmente cuando la distribución adoptada es aquella donde los amortiguadores se concentran en los tres primeros entrepisos. Para las estructuras de muros el usar más de un amortiguador introduce muy poca variación en el amortiguamiento del modo fundamental, siendo éste comparable al obtenido al utilizar un solo amortiguador.
- ∞ La variación del amortiguamiento en el modo fundamental con relación a la posición del amortiguador se vincula estrechamente con la reducción obtenida en la respuesta para cada caso, es decir, a mayor valor de amortiguamiento se obtiene mayor reducción en término medio para la respuesta. Esto se cumple para todos los sistemas estudiados.
- ∞ En las estructuras aporticadas el valor de amortiguamiento del segundo modo de vibración es más susceptible al número de amortiguadores que el del modo fundamental.
- ∞ El período fundamental de las estructuras se ve influenciado por la posición y distribución de los amortiguadores, pero en una proporción bastante menor que la observada para los amortiguamientos modales. La mayor reducción se obtiene cuando gran parte de los amortiguadores se concentran en el primer entrepiso. Si los dispositivos ocupan los entrepisos superiores, ésta propiedad prácticamente no se ve afectada.
- ∞ Si se incorpora un solo amortiguador a la estructura la mejor ubicación es en el primer entrepiso, ya que se obtiene la mayor reducción en término medio de la respuesta. Esta reducción promedio de derivas oscila entre 18% y 40% para todos los sistemas estudiados.

- ∞ Si el número de amortiguadores es menor al número de entrepisos, la mejor distribución resulta ser un amortiguador por entrepiso, comenzando desde el primero. Esto se cumple para todas las estructuras aporticadas estudiadas.
- ∞ Cuando el número de amortiguadores iguala al número de entrepisos, lo mejor es concentrar el amortiguamiento en los primeros tres entrepisos, especialmente en el primero. Esto se cumple para todas las estructuras de período corto estudiadas. Para las estructuras aporticadas de período largo conviene distribuir el amortiguamiento uniformemente en todos los entrepisos, mientras que para las estructuras de muros se obtiene mayor beneficio si el amortiguamiento se concentra en el primer entrepiso.
- ∞ La excitación sísmica tiene una marcada influencia en la respuesta de las estructuras con amortiguadores. Si los amortiguadores son del tipo viscoso, el espectro de velocidades del sismo repercute notablemente en el efecto que puedan tener los dispositivos en la respuesta de la estructura, en concordancia con el período de vibración de la misma. Cuando existe predominio de velocidades relativamente bajas, las reducciones logradas en la respuesta son muy pequeñas, es decir, los amortiguadores tienen poco efecto sobre la estructura y su actividad es prácticamente nula. Por el contrario, si hay predominio de velocidades relativamente altas el efecto de los amortiguadores se ve magnificado y por lo tanto se obtienen grandes reducciones en la respuesta sísmica. Esto ocurre independientemente de la distribución o número de amortiguadores adoptado.

7.1.2 Error en el cálculo de la respuesta sísmica de una estructura con amortiguadores al utilizar el método de superposición modal tradicional.

- ∞ La cantidad y distribución de los amortiguadores en la estructura influyen notablemente en los resultados obtenidos al aplicar el método simplificado en sistemas con amortiguamiento no-clásico.

- ∞ Cuanto más uniforme sea la distribución del amortiguamiento en el sistema, mayor validez adquiere el método simplificado como método de cálculo para estructuras con amortiguadores, ya que el error cometido es mínimo. Por el contrario, al concentrarse todo el amortiguamiento en un solo piso se magnifica el grado de amortiguamiento no clásico en el sistema y por ende se pierde precisión al calcular la respuesta con el método simplificado.
- ∞ El período de la estructura y la excitación sísmica juegan un papel destacado en el error cometido al calcular la respuesta de la estructura con el método simplificado, ya que repercuten en la magnitud del mismo, sin embargo, estas circunstancias se ven sometidas a la influencia de la cantidad y distribución de los amortiguadores que representan el factor decisivo en la medida del error.

7.1.3 Desarrollo de una nueva propuesta de disipador de energía metálico para estructuras existentes de baja altura.

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

- ∞ El modelo numérico, aplicando el método de los elementos finitos, del disipador de energía contribuye a predecir las zonas de daño del dispositivo, mostrando congruencia con el diseño conceptual del mismo. En este sentido, se obtienen deformaciones permanentes, daño y disipación de energía en las zonas previstas, por lo que el modelo analizado bajo las cargas y condiciones estudiadas se comporta satisfactoriamente.
- ∞ En cuanto a la estimación de la fuerza y deformación de inicio de la plastificación, se manifiesta una mínima discrepancia entre el modelo numérico y el modelo analítico propuesto.
- ∞ La evaluación experimental del dispositivo mostró que el comportamiento histerético del disipador es estable. Incluso, en el ensayo en el que se repitió el máximo desplazamiento cinco veces, los ciclos no sufrieron alteraciones importantes.
- ∞ El deslizamiento que ocurre entre las láminas y las ranuras cuando se hace efectiva la deformación por flexión tiene una influencia importante en el comportamiento del disipador, esto se nota en el estrangulamiento que presentan los primeros ciclos de histéresis.
- ∞ El endurecimiento del acero tiene un efecto muy marcado en el comportamiento del dispositivo, se registró aumento de la resistencia durante los ensayos a medida que avanzaban los ciclos de histéresis.
- ∞ Para desplazamientos superiores a 14mm el comportamiento del disipador se notó gobernado por el efecto de traba mecánica de las láminas, esto se manifiesta en el aumento significativo de la resistencia en el dispositivo.
- ∞ La energía disipada acumulada tiende a incrementarse a medida que aumenta el número de ciclos y por ende la amplitud de los desplazamientos impuestos. Para el total de ciclos desarrollados en cada ensayo no se registró pérdida de la capacidad de disipación de energía.
- ∞ El desplazamiento y la fuerza cedente se pueden determinar fácilmente, pues es claro el cambio de pendiente que ocurre en las curvas de relación

fuerza-deformación del disipador pudiéndose establecer claramente la zona lineal elástica y la zona de plastificación-endurecimiento.

- ∞ El modelo bilineal con endurecimiento es el que se ajusta cómodamente al patrón de comportamiento del dispositivo.
- ∞ El daño observado en el disipador luego de los ensayos realizados fue tal como se había previsto en el diseño conceptual del mismo.
- ∞ Se propone un procedimiento de diseño preliminar para la inclusión del dispositivo aquí formulado en una estructura real, sin embargo, se sugiere realizar un análisis no lineal completo de la estructura y de los amortiguadores para verificar el comportamiento efectivo de los elementos resistentes y la eficacia de los dispositivos.
- ∞ Se formula una expresión matemática en función de las dimensiones del amortiguador y otros parámetros, capaz de estimar la rigidez elástica del dispositivo, llegando a estar alrededor de la obtenida en la evaluación experimental, demostrando que mediante ecuaciones sencillas se puede predecir el comportamiento del dispositivo.
- ∞ Al aplicar el procedimiento de diseño señalado en las estructuras y configuraciones investigadas el dispositivo propuesto produce reducciones importantes en la respuesta del sistema.

7.2 RECOMENDACIONES

- ∞ Al analizar estructuras con amortiguadores conviene estudiar su respuesta bajo una amplia gama de posibles acelerogramas o excitaciones que puedan ocurrir en el sitio, tomando en consideración los espectros de velocidades si se trabaja con amortiguadores viscosos. De esta manera podrá preverse si los dispositivos tendrán o no el efecto esperado en el sistema estudiado.
- ∞ Para seleccionar el número de amortiguadores a utilizar y su distribución en la estructura, resulta pertinente estudiar el sistema resistente de la misma y sus propiedades dinámicas, ya que el efecto de los dispositivos estará controlado en gran medida por estas variables.
- ∞ Conviene emplear el método simplificado como método de análisis de estructuras con amortiguadores viscosos, cuando se dispone de distribuciones totalmente uniformes, por ejemplo, igual cantidad de dispositivos en todos los pisos de la estructura. Por el contrario, cuanto más desigual sea la colocación de los amortiguadores en la estructura, es recomendable utilizar el método de integración directa para calcular la respuesta del sistema.
- ∞ Para estudiar la eficacia de dispositivos como el propuesto en esta investigación, o similares, en una determinada estructura, se recomienda realizar un análisis no lineal para verificar resistencias y ductilidades en el sistema.

7.3 INVESTIGACIONES FUTURAS

- ∞ Investigar el efecto de la posición, número y distribución de los amortiguadores en estructuras con irregularidades, por ejemplo, sistemas con entrepiso blando.

-
- ∞ Estudiar el efecto del sismo con una gama más amplia de excitaciones y frecuencias.
 - ∞ Estudio paramétrico del disipador de energía propuesto para la optimización de sus dimensiones de acuerdo a diversos niveles de exigencia de fuerza y desplazamiento.
 - ∞ Aplicación del disipador de energía propuesto a edificaciones existentes realizando análisis en el rango no lineal.

Bibliografía y Referencias

Aguirre M. and Sánchez R. (1992), "Structural seismic damper", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. **118**, No. 5, pp. 1158-1171.

Aiken, I., and Kelly, J. (1990), "Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy-absorbing systems for multistory structures," *Report UCB/EERC-90/03*, Earthquake Eng. Res. Ctr, Univ. of California, Berkeley.

Aiken I., Kelly J. and Mahmoodi P. (1990), "The Application of Viscoelastic Dampers to Seismically Resistant Structures". *Proc. 4th U. S. Nat. Conf. on Earthquake Engrg.*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, Calif., 3, 459-468.

ANSI/AISC 360-05 (2005). "*Specification for Structural Steel Buildings*". American Institute of Steel Construction, Inc. Chicago, U.S.A.

ANSYS v.10.0, Copyright 2005 SAS IP, Inc.

Arima F., Miyazaki M., Tanaka H. and Yamazaki Y. (1988), "A study on buildings with large damping using viscous damping walls". *Ninth World Conference on Earthquake Eng. V.* 821-826. Tokio.

Ashour S. and Hanson R. (1987), "Elastic Response of buildings with supplemental damping". *Report UMCE 87-1*, Dept. of Civ. Engrg. University of Michigan, Ann. Arbor, Mich.

Barbat A. and Canet J. (1994), "*Estructuras sometidas a acciones sísmicas*", Segunda edición, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Barcelona.

Benavent-Climent A. (2006), "Influence of hysteretic dampers on the seismic response of reinforced concrete wide beam-column connection". *Engineering Structures*, vol. **28**:580-592.

Bozzo L. y Barbat A. (2000), "*Diseño sismorresistente de edificios. Técnicas convencionales y avanzadas*", Editorial Reverté S.A, Barcelona-España.

Butterworth J. (2000), "Ductile concentrically braced frames using slotted bolted joints". *Journal of structural engineering society New Zealand*, vol. **13**(1): 39-48.

Chopra A. (2002), "*Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*". Prentice Hall, U. S. A, 727 pp.

Clark P., Aiken I., Tajirian F., Kasai K., Ko E. and Kimura I. (1999), "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices". *Proc. Int. Post-Smirt Conf. Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of Vibrations of Structures*. Cheju. South Korea.

Clough R. and Mojtahedi S. (1976), "Earthquake response analysis considering non-proportional damping", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. **4**, 489-496.

Comerio M., Tobriner S., and Fehrenkamp A. (2006). "*Bracing Berkeley. A Guide to Seismic Safety on the UC Berkeley Campus*". PEER 2006/01. Pacific Earthquake Engineering Research Center. College of Engineering. University of California. Berkeley.

Constantinou M., Soong T., and Dargush G. (1998), "Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), *MCEER-Monograph n° 1*.

COVENIN 299-89 (1989). "*Ensayo de Tracción para Materiales Metálicos*". Comisión Venezolana de Normas Industriales, Caracas.

COVENIN MINDUR 1756-2001 (2001). "*Edificaciones Sismorresistentes*". Comisión Venezolana de Normas Industriales, Caracas.

Curadelli R., and Riera J. (2007), "Design and testing of a lead damper for seismic applications". *Proc. IMechE. Part C: J. Mechanical Engineering Science*, vol. **221**:159-165.

De La Cruz S. (2003), "*Contribution to assessment of the efficiency of friction dissipators for seismic protection of buildings*". PhD Thesis. Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geociencias. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona-España.

Escobar J., Sánchez-Ramírez A. and Dyer J. (2002), "Study of the bending hysteretic behaviour of ductile steel plates for seismic energy dissipation", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. **29**, pp. 853-862.

FEMA 450 (2003). *The NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures*. Building Seismic Safety Council-National Institute of Building Sciences, Washington D.C.

Fitzgerald T., Anagnos T., Goodson M., and Zsutty T. (1989), "Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections", *Earthquake Spectra*, vol. **5**(2): 383-391.

Gehling R. (1987), "Large space structure damping treatment performance: Analytic and test results", *Role of damping in vibration and noise control*; ASME, NY, 93-100.

Goel R. (2001), "Simplified analysis of asymmetric structures with supplemental damping", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*; vol. **30**:1399-1416.

Goncalves R. (2002), "*Introducción al análisis de esfuerzos*", Segunda edición, Editado por R. Goncalves. Universidad Simón Bolívar, Caracas-Venezuela.

Greco A. and Santini R. (2002), "Comparative study on dynamic analyses of non-classically damped linear system". *Structural Engineering and Mechanics*, vol. **14**(6), 679-698.

Hanson R.D. and Soong T. S. (2001), "Seismic Design with Supplemental Energy Dissipation Devices". *Monograph n° 8*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland.

Iemura H. (1994), "Active and hybrid control development in Japan: Experiments and implementation", in *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, pp: 187-197, Springer-Verlag, Italy.

Kelly J., Skinner R., and Heine A. (1972), "Mechanism of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bull. N. Z. Natl. Soc. Earthquake Eng.* Vol. **5**(3), 63-88.

Kelly J. (1983), "The economic feasibility of seismic rehabilitation of buildings by base isolation", Earthquake Engineering Research Center, *EERC-83/01*, University of California, Berkeley.

Koetaka Y., Chusilp P., Zhang Z., Ando M., Suita K., Inoue K., and Uno N. (2005), "Mechanical property of beam-to-column moment connection with hysteretic damper for column weak axis". *Engineering Structures*, vol. **27**: 109-117.

Kunde M., and Jangid R. (2003), "Seismic behaviour of isolated bridges: A state of the art review", *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. **3**: 140-170.

Kwok K., and McDonald P. (1987), "Wind induced response of Sydney Tower", *Proc. First National Struct. Eng. Conf.*, 19-24.

Li H-N., and Li G. (2007), "Experimental study of structure with dual function metallic damper". *Engineering Structures*, vol. **19**(8): 1917-1928.

López García D. (2001), "A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures". *Earthquake Spectra*, vol. **17**(3):387-398.

MATLAB v. 7.0.0, Copyright 1984-2004. The MathWorks, Inc.

Martínez Rueda J. (2002), "On the evolution of energy dissipation devices for seismic design", *Earthquake Spectra*, vol. **18**:2, 309-346.

Morón J. y Gaschteff L. (2003), "Experiencia en la instalación de disipadores pasivos de energía en una edificación para reducción de daños ante acciones sísmicas". *Memorias del VII Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Barquisimeto-Venezuela.

Mualla I., and Belev B. (2002), "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation". *Engineering Structures*, vol. **24**: 365-371.

Pall A., Marsh C. and Fazio P. (1980), "Friction joints for seismic control of large panel structures". *J. Prestressed Concrete Inst.* Vol. **25**(6): 38-61.

Pérez Hernández R. (2000), "*Disipación sísmica en viaductos ferroviarios*". Trabajo de ascenso a Profesor asistente. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Popov E. (1999), "*Mecánica de materiales*", Editorial LIMUSA S.A., México.

Prater G. and Singh R. (1986), "Quantification of the extent of non-proportional viscous damping in discrete vibratory systems", *J. Sound Vib.*, vol. **104**: 109-125.

Ramirez O., Constantinou M., Gómez J., Whittaker A. and Chrysostomou C. (2002), "Evaluation of simplified methods of analysis of yielding structures with damping systems", *Earthquake Spectra*, vol. **18**(3), 501-530.

SAP 2000 Advanced 11.0.0, Structural Analysis Program, Copyright 1976-2007, Computer and Structure, Inc.

Sholl R. (1993) "Design criteria for yielding and friction energy dissipators". *Proc. ATC-17-1 on Seismic Isolation, Energy Dissipation, and Active Control*. Vol. **2**:485-495. San Francisco, CA.

Shukla A. K. and Datta T.K (1999), "Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force", *Journal of structural engineering*, vol. **125**(4), 401-409.

Skinner R., Kelly J., and Heine A. (1975), "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* Vol. **3**(3), 287-296.

Soong T.T and Dargush G. F. (1997), "*Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering*", John Wiley and Sons. Ltd., London (UK) and New York (USA).

Sosa M. y Taboada A. (2007), "*Evaluación del riesgo sísmico en edificaciones escolares tipo cajetón cerrado*", Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

SPSS 13.0 for windows, Copyright © SPSS inc. 1989-2004.

Steel R. y Torrie J. (1988), "*Bioestadística: Principios y procedimientos*", segunda edición, Mc Graw Hill, México D.F.

Takewaki I. (1997), "Optimal Damper Placement for Minimum Transfer functions", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* Vol. **26**(2), 1113-1124.

Tanaka T., Yamamoto M., Katayama T., Nakahira K., Yamane K., Shimano Y., and Hirayama K. (2003), "Recent applications of structural control systems to high-rise buildings". *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, vol. **4**(1):75-93.

Tena A. (2003), "Disipación de energía pasiva en México, un estado del arte". *Memorias del VII Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Barquisimeto-Venezuela.

Tovar C., López O. A., y Tovar A.G. (2003), "Efecto de la posición y número de amortiguadores en la respuesta sísmica de estructuras aporticadas". *Memorias del VII Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Barquisimeto-Venezuela.

Tovar C., López O. A., y Tovar A.G. (2004), "Error en el cálculo de la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de estructuras aporticadas con amortiguamiento adicional". *Memorias del VII Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas*. San Cristóbal- Venezuela.

Tovar C., and López O. A. (2004), "Effect of the position and number of dampers on the Seismic response of frame structures", *Memories of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver-Canada.

Tovar C., and López O.A. (2006), "Effect of dampers arrangement on the seismic response of low rise structures", *Proceeding of The 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, U.S.A. Paper nº 736.

Tovar C., y López O. A. (2007), "Influencia de la posición, número y distribución de amortiguadores sobre la respuesta sísmica en edificaciones de baja altura", *Revista de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Central de Venezuela, vol. **22**(2): 111-126.

Tsai, K-C, H-W Chen, C-P Hong and Y-F Su (1993), "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", *Earthquake Spectra*, vol. **9**(3), 505-528.

Tyler, R. (1985), "Further notes on a steel energy-absorbing element for braced frameworks", *Bull. N. Z. Natl. Soc. Earthquake Eng.* Vol. **18**(3), 270-279.

Veletsos A. and Ventura C. (1986), "Modal analysis of non-classically damped linear systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. **14**, 217-243.

Wada A., Huang Y. and Iwata M. (1999). "Passive damping technology for buildings in Japan". *Progress in Struct. Eng. and Mat.* Vol. **2**(3), 282-294.

Warburton G. and Soni R. (1977), "Errors in response calculations for non-classically damped structures", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*; vol. **5**: 365-376.

Whittaker A., Bertero V., Thompson C. and Alonso L. (1991), "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices", *Earthquake Spectra*, vol. **7**(4), 563-604.

Zhang R. and Soong T. (1992), "Seismic Design of viscoelastics dampers for structural applications". *Journal of Structural Engineering*. Vol. **118**(5):1375-1392.

Páginas Web:

[http:// pollux.tu.chiba-u.ac.jp/.../jpac/control_02.htm](http://pollux.tu.chiba-u.ac.jp/.../jpac/control_02.htm)

[http://: www.oiles.co.jp/en/menshin](http://www.oiles.co.jp/en/menshin)

[http://: www.ideers.bris.ac.uk/resistant/](http://www.ideers.bris.ac.uk/resistant/)