



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

---

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO  
DE MARCOS DE CONCRETO DOTADOS DE  
DISIPADORES DE ENERGÍA TIPOS TADAS, U  
Y VISCOELÁSTICOS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS CON  
ESPECIALIDAD EN ESTRUCTURAS**

P R E S E N T A:

**FABIÁN RENÉ RUVALCABA AYALA**

DIRECTOR: DR. HECTOR A. SÁNCHEZ SÁNCHEZ



MEXICO D.F.

2005



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

CGPI-14

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 18:00 horas del día 17 del mes de febrero del 2005 Se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.- U.Z.

para examinar la tesis de grado titulada: "EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE MARCOS DE CONCRETO DOTADOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA TIPOS TADAS, U Y VISCOELÁSTICOS "

Presentada por el alumno:

**RUVALCABA**

**AYALA**

**FABIÁN RENÉ**

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro: 

B9	7	1	2	5	7
----	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN ESTRUCTURAS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**  
Director de Tesis

DR. HÉCTOR A. SÁNCHEZ SÁNCHEZ

DR. JORGE LUIS ALAMILLA LÓPEZ

DR. FRANCISCO CASANOVA DEL ÁNGEL

DR. JOEL GARCÍA VARGAS

DR. ANDRÉS FRANCO PEÑA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO



M. EN I. FELIPE LÓPEZ SÁNCHEZ  
 SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

**A MI DIOS**, a quién amo con todo mi corazón,  
con toda mi alma y con toda mi mente.  
Por su amor Él me ha hecho renacer  
y me ha enseñado, mediante su Espíritu Santo,  
a vivir dependiendo totalmente de Él.  
¡A Él sea la honra y la gloria para siempre!  
¡Gracias, Señor, por darme la vida eterna!

“Maestro, ¿Cuál es el mandamiento más importante de la ley ? Jesús le dijo: “Ama al Señor tu Dios con todo tu corazón, con todo tu ser y con toda tu mente. Este es el primero y el más importante de los mandamientos. El segundo se parece a este: Ama a tu prójimo como a ti mismo.”

*Mateo 22:36-39*

*A MI FAMILIA*, por su amor incondicional, porque tanto en momentos difíciles como felices, siempre han estado conmigo, Gracias !

“Pues si ustedes, aún siendo malos, saben dar cosas buenas a sus hijos, ¡Cuánto mas su Padre que está en el cielo dará cosas buenas a los que lo pidan”

*Mateo 7.11*

*A MIS AMIGOS*, gracias por estar conmigo en momentos de soledad, de apoyo, gracias por sus palabras de aliento, por su espiritualidad: Rocío Huerta, Joel Mendoza, Isaías Villaseñor, Marco Valderrama, Juan Carlos Saucedo, Luis Alberto Salcedo, Jorge Alba.

“En todo tiempo ama el amigo, Y es como un hermano en tiempos de angustia”

*Proverbios 17.17*

**A**

**DANTE CAMPOS**

Durante el instante que comencé a recibir asesoría para este trabajo de tesis por parte de Dante Campos, me di cuenta que los objetivos planteados serían cubiertos satisfactoriamente con su apoyo, su capacidad, su experiencia e inteligencia, si hubo un momento en el que dude que esta tesis fallaría jamás lo asocie al apoyo técnico de Dante; mil veces que acudí a él, mil veces me respondió con gran solvencia y convicción, pero sobretodo con paciencia y con una sonrisa.

Recuerdo perfectamente el día que lo conocí y honestamente puedo decir que me sorprendió todo lo que me ofreció para desarrollar todas las actividades que debían realizarse, entre ellas mencionó: artículos, manuales, software inaccesible para mí, asesoría, etc. Poco antes de conocerlo, me entreviste con otra persona de conocido prestigio para que me dirigiera en este proyecto, que en ningún momento tuvo esa disposición, interés ni ese ofrecimiento.

Estas breves palabras que dedico a Dante Campos son insuficientes pero necesarias para agradecer todo el esfuerzo que él dedico para apoyarme, jamás me exigió nada a cambio, solo dar mi mayor esfuerzo y entrega, en ésta época tan compleja y difícil, agradezco sinceramente su valioso tiempo. No encuentro una palabra suficiente para justificar porque su nombre no aparece como director de este trabajo.

Algunos factores que no estuvieron en nuestras fuerzas solucionar, ocasionaron que su nombre no este escrito aquí como el director externo, sin embargo, Doc (como cariñosamente lo llamo) sabes que habemos gente que reconocemos tu capacidad, tu inteligencia, tu sencillez y tu humanidad, este reconocimiento no es menor al de este documento, porque se queda en los corazones de quienes te apreciamos, de quienes te conocemos, y de quienes te admiramos, con esa misma sinceridad y honestidad que te caracteriza, me atrevo a tomarla para decirte: gracias, de todo corazón Gracias!!.

AGRADEZCO A LOS SIGUIENTES, EL APOYO PARA HACER POSIBLE CUMPLIR CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS EN ESTE TRABAJO:

- INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO, por todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de esta tesis.
- INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, SEPI-ESIA, ACADEMIA DE ESTRUCTURAS, por proporcionarme conocimientos útiles y otorgarme facilidades.
- M. en I. GERMAN ÁLVAREZ, gracias por su apoyo en la redacción de este trabajo de tesis, sus consejos, gracias por su amistad.
- ING. ENRIQUE MORALES R., gracias por su apoyo incondicional y su amistad.
- A MIS COMPAÑEROS DEL DEPARTAMENTO DE DISEÑO, ESPECIFICACIÓN Y ANÁLISIS MECÁNICO-ESTRUCTURAL DE EQUIPO ESTÁTICO DEL IMP, por sus consejos, su apoyo y su amistad.
- AL COMITÉ EVALUADOR, por sus enseñanzas, sus invaluable conocimientos, por sus valiosos comentarios.

**G R A C I A S**

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE MARCOS DE CONCRETO DOTADOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA TIPOS TADAS, U Y VISCOELÁSTICOS

## CONTENIDO GENERAL

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>ii</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>iii</b>
<b>I. GENERALIDADES</b>	
I.1    Antecedentes	1
I.2    Justificación	2
I.3    Objetivos	2
I.4    Alcances	2
I.5    Estado del arte sobre el empleo de disipadores de energía en edificios	2
I.5.1    Estudios experimentales de los disipadores	3
I.5.2    Uso y empleo de los disipadores	10
I.5.3    Reglamentación sobre los disipadores	11
I.5.4    Tendencias sobre los disipadores	13
<b>II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE MARCOS CON DISIPADORES</b>	
II.1    Metodología de diseño	15
II.2    Determinación de la relación de rigidez para paquete disipador	16
II.3    Análisis y diseño de disipadores tipo TADAS	22
II.4    Análisis y diseño de disipadores tipo U	24
II.5    Análisis y diseño de disipadores tipo VISCOELÁSTICOS	26
II.6    Análisis y diseño de los marcos estructurales	27
II.6.1    Descripción de la estructura	28
II.6.2    Información general de los marcos estructurales	29
II.6.3    Diseño de los contraventeos	34
<b>III. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE UN SISMO FUERTE</b>	
III.1    Introducción	38

III.2	Comportamiento sísmico de marco de concreto con TADAS	42
III.3	Comportamiento sísmico de marco de concreto con U	45
III.4	Comportamiento sísmico de marco de concreto con viscoelásticos	48
<b>IV.</b>	<b>ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE HISTORIAS DE SISMOS</b>	
IV.1	Introducción	54
IV.2	Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 1	59
IV.3	Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 2	62
IV.4	Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 3	65
IV.5	Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 4	68
IV.6	Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 5	70
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	76
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	79
<b>APÉNDICE A</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO: TADAS, U Y VISCOELÁSTICOS</b>	
A.1	Clasificación de los disipadores de energía	88
A.1.1	Dispositivos de control activo	88
A.1.2	Dispositivos de control semi-activo	89
A.1.3	Dispositivos de control pasivo	89
A.2	Disipadores de energía tipo TADAS	92
A.3	Disipadores de energía tipo U	96
A.4	Disipadores de energía tipo VISCOELÁSTICOS	100
<b>APÉNDICE B</b>	<b>PARÁMETROS DE DISEÑO</b>	105
<b>APÉNDICE C</b>	<b>MODELOS PARA DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES</b>	
C.1	Modelos para las dimensiones de los elementos estructurales	110
C.2	Modelos para las resistencias	111
C.3	Modelos para las cargas	112

## LISTA DE FIGURAS

Figura I.5.1	Dispositivos en forma de U empleado en [Aguirre y Sánchez. 1992].	4
Figura I.5.2	Dimensiones del marco experimental con disipadores tipo U [González Alcorta . 1998].	4
Figura I.5.3	Detalle final del dispositivo U [Aguirre y Sánchez. 1989].	5
Figura I.5.4	Detalle del dispositivo TADAS [Tsai <i>et al.</i> 1993].	6
Figura I.5.5	Vista lateral del dispositivo TADAS [Tsai y Hong. 1992].	7
Figura I.5.6	Primer dispositivo viscoelástico empleado experimentalmente [Chang <i>et al.</i> 1993].	7
Figura I.5.7	Detalle del dispositivo viscoelástico [Aiken <i>et al.</i> 1992].	8
Figura I.5.8	Detalle de la conexión barra columna con disipadores viscoelásticos [Hsu y Fafitis. 1992].	9
Figura I.5.9	Dispositivo Viscoelástico [Aiken <i>et al.</i> 1992].	9
Figura II.1	Desplazamiento de marco con paquete disipador.	17
Figura II.2	Características de los elementos que componen el paquete disipador.	18
Figura II.3	Proporción de rigidez del disipador.	21
Figura II.4	Diagrama de flujo de la metodología de análisis y diseño usada.	21
Figura II.5	Configuración de TADAS para el SAP2000.	24
Figura II.6	Características de los marcos.	28
Figura II.7	Fuerzas sísmicas de los marcos.	33
Figura II.8	Desplazamientos relativos de los marcos.	33
Figura III.1	Conjunto de acelerogramas.	41
Figura III.2	Ciclos histeréticos en entresijos de marco con TADAS.	43
Figura III.3	Demanda de ductilidad para el marco con TADAS.	44
Figura III.4	Índice de daño para el marco con TADAS.	44
Figura III.5	Ciclos histeréticos en entresijos de marco con U.	46
Figura III.6	Demanda de ductilidad para el marco con U.	47
Figura III.7	Índice de daño para el marco con U.	47
Figura III.8	Ciclos histeréticos en entresijos de marco con VE.	49
Figura III.9	Demanda de ductilidad para el marco con VE.	50
Figura III.10	Índice de daño para el marco con VE.	50
Figura III.11	Índice de confiabilidad y probabilidad de falla de marcos con diferentes tipos de disipadores de energía.	53
Figura IV.1	Historia de sismos núm. 1.	55
Figura IV.2	Historia de sismos núm. 2.	56
Figura IV.3	Historia de sismos núm. 3.	57
Figura IV.4	Historia de sismos núm. 4.	58
Figura IV.5	Historia de sismos núm. 5.	58
Figura IV.6	Índice de daño en marcos sometidos a la historia de sismos núm.1.	60
Figura IV.7	Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm. 1.	62
Figura IV.8	Índice de daño en marcos sometidos a la historia de sismos núm.2.	63
Figura IV.9	Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm. 2.	65
Figura IV.10	Índice de daño de marcos sometidos a la historia de sismos núm.3.	66
Figura IV.11	Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm. 3.	67



## LISTA DE FIGURAS

---

Figura IV.12	Índice de daño de marcos sometidos a la historia de sismos núm.4.	69
Figura IV.13	Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm.4.	70
Figura IV.14	Índice de daño de marcos sometidos a la historia de sismos núm. 5.	71
Figura IV.15	Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm.5.	72
Figura IV.16	Índice de confiabilidad y probabilidad de falla de marcos con diferentes tipos de disipadores de energía sometidos a historias de sismos.	74
Figura A.1	Comportamiento histerético.	90
Figura A.2	Dispositivos en forma de U [González Alcorta. 1998].	91
Figura A.3	Comportamiento básico de la placa triangular sometida a carga y mecanismo de disipación de energía.	93
Figura A.4	Prueba pseudodinámica de un marco TADAS de 2 niveles.	95
Figura A.5	Formas convencionales de montar dispositivos disipadores de energía en estructuras.	96
Figura A.6	Anillo histerético para diferentes amplitudes del movimiento del ciclo aplicado para dispositivos tipo U.	97
Figura A.7	Dispositivo para prueba de elementos en forma de U.	98
Figura A.8	Curva de fatiga de dispositivos tipo U.	100
Figura A.9	Amortiguador viscoelástico típico.	100
Figura A.10	Relación esfuerzo - deformación, ciclo histerético de dispositivo viscoelástico.	103
Figura A.11	Efecto de la temperatura ambiente sobre la frecuencia natural y relación de amortiguamiento de dispositivos viscoelásticos.	104
Figura B.1	Espectros de diseño.	106

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla I.5.1	Edificios construidos con disipadores de energía sísmica	11
Tabla II.1	Relación de rigidez de los elementos del paquete disipador.	20
Tabla II.2	Valores de rigidez del paquete disipador.	21
Tabla II.3	Esfuerzos y desplazamientos de fluencia finales de los TADAS.	22
Tabla II.4	Esfuerzos y desplazamientos de fluencia finales de los U.	24
Tabla II.5	Propiedades geométricas finales de los VE.	26
Tabla II.6	Propiedades mecánicas del concreto.	29
Tabla II.7	Propiedades mecánicas del acero.	29
Tabla II.8	Tabla de análisis de carga de sistemas de entrepiso y azotea.	30
Tabla II.9	Tabla de pesos y masas.	30
Tabla II.10	Cargas muertas, vivas instantáneas y vivas máximas en edificio de 14 niveles.	31
Tabla II.11	Secciones finales de trabes.	32
Tabla II.12	Secciones finales de columna.	32
Tabla II.13	Diseño de contraventeos en marco con TADAS.	35
Tabla II.14	Diseño de contraventeos en marco con U.	36
Tabla II.15	Diseño de contraventeos en marco con viscoelásticos.	37
Tabla III.1	Tabla de daños globales $D_k$ .	51
Tabla IV.1	Tabla de historias de sismos	59
Tabla IV.2	Tabla de daños globales ante historias de sismos.	73
Tabla A.1	Dimensiones de las placas TADAS usadas por Tsai en marcos de prueba.	94
Tabla A.2	Propiedades típicas de un dispositivo viscoelástico.	103

## R E S U M E N

Buscando siempre la máxima seguridad, el hombre se ha preocupado por diseñar sistemas estructurales que le permitan vivir con sus semejantes de forma cómoda, segura y económica. Esta constante evolución lo ha conducido a construir edificios estéticos, funcionales, seguros y económicos, que hoy en día se pueden observar en cualquiera de nuestras ciudades; y a buscar mejores criterios, métodos, sistemas y materiales para diseñar y construir estructuras capaces de resistir sismos de intensidad variable.

La aplicación en años recientes de los elementos disipadores de energía como componentes estructurales en edificios, ha sido una solución efectiva para reducir costos de reparación, porque disminuyen la propagación de daños en el marco convencional y facilitan el reemplazo de los dispositivos, una vez utilizados y dañados.

En el presente trabajo se estudian modelos analíticos de edificios de 14 niveles con características aleatorias, considerados como representativos de los construidos en la zona de suelo blando de la ciudad de México, estructurados con marcos de concreto reforzado y dotados de disipadores de energía sísmica de tres tipos: TADAS, U y viscoelásticos.

Se evalúa la influencia en la respuesta estructural del sistema de cada tipo de disipador, para tal efecto se han considerado excitaciones con dos criterios, ante un temblor fuerte y ante una historia sísmica correspondiente a 100 años, con temblores simulados de acuerdo a la sismicidad de la zona.

Las condiciones de diseño de las estructuras son las mismas. Se emplea el método de ductilidades tolerables para el diseño del marco y parámetros básicos de cada disipador, y se incluye el diseño de cada disipador propiamente. El comportamiento histerético de los elementos de concreto reforzado es modelado mediante el modelo de Campos y Esteva [1997a], y la fatiga de los disipadores mediante el modelo de Miner [1945].

Se determinó el tipo de dispositivo con mejor desempeño, mediante la comparación de la respuesta estructural aleatoria, para que sea aplicado a las características de la zona de suelo blando de la ciudad de México.

## A B S T R A C T

Searching the maximum security, the man has worried about designing some constructive systems to allow living with his similars in a comfortable, safe, and economical way. This constant evolution has led him to build aesthetics, functional, safe, and economical buildings, that today we can see anywhere in our cities; and to look for better criterions, methods, systems and materials to design and build structures able to support some earthquakes with variable intensity.

Recently, the energy dissipation devices application as a structural component in buildings has been an effective solution to reduce the repair costs, because they mitigate the damage accumulated of the conventional frames. Besides, the replacement of such devices is a simple action to carry out.

Analytical models from 14 story buildings were studied in this thesis; they are considered as typical from built ones in the soft soil zone of the Mexico City. They are made of reinforced concrete frames with three different types of energy dissipation devices: TADAS, U and viscoelastic. It has considered two excitement groups with two criteria: for a strong earthquake and for some seismic histories into a range of 100 years, by means of earthquakes simulated according to the seismicity of the zone.

The design conditions of frames are the same. The tolerable ductilities method is used to design the frame and basic parameters of each device. The design of each one of them is included. The behavior hysteretic of reinforced concrete elements is modeled considering the degradation of stiffness and strength by Campos and Esteva model [1997a], and the fatigue device is into account with Miner rule [1945].

We hope to define the device type with best performance by means of a comparison of the structural responses and of probabilistic results of the different frames analyzed for the conditions of the soft soil zone of the Mexico City.

# CAPÍTULO I

# GENERALIDADES

## I.1 Antecedentes

En la posición geográfica de México ocurren diversos fenómenos naturales que por su peligro pueden derivar, en algunos casos, en desastres. Entre los fenómenos que ocurren con mayor frecuencia y de carácter más destructivos se encuentran los sismos de origen tectónico, que a través de la historia han adquirido una importancia especial en el ámbito de la ingeniería. Las fallas geológicas y el movimiento de las placas tectónicas están asociadas a deformaciones a gran escala de la corteza terrestre, grandes cantidades de energía liberada y extensas áreas afectadas.

Con respecto a la ciudad de México, las características del subsuelo y la gran densidad de población, la convierten en una zona de alto riesgo sísmico. Por tal motivo, resulta importante considerar los daños y efectos que causa dicha actividad sísmica en el comportamiento de los diversos sistemas estructurales.

Como una opción para incrementar tanto la resistencia como la capacidad de deformación y disipación de energía en estructuras sujetas a fuerzas sísmicas, se ha desarrollado en los últimos años el concepto y empleo de los disipadores de energía. La incorporación de estos dispositivos en estructuras nuevas representa un costo más bajo a largo plazo, comparado con los sistemas convencionales [Campos. 2005].

En la actualidad, existe en el mundo un número importante de edificios, en los que se han empleado estos dispositivos para controlar la respuesta causada por la acción del viento o el sismo, evitando que se generen mecanismos de falla no deseables.

## **I.2 Justificación**

Durante la ocurrencia de un sismo fuerte, las estructuras de concreto reforzado pueden llegar a presentar un comportamiento inelástico, ello significa la disminución en algunas de sus propiedades mecánicas como rigidez y resistencia, debido a la aparición de grietas y fisuras. Por ello se introducen los dispositivos disipadores de energía para disminuir los daños en los marcos convencionales de concreto reforzado y que el deterioro ocurra en dichos dispositivos. En la literatura actual existente sobre disipadores de energía se ha centrado en mostrar comparativas de análisis de estructuras con y sin disipadores, mostrando que las primeras tuvieron un mejor comportamiento, se justifica el desarrollo de este trabajo por no existir hasta este momento un estudio que compare respuestas de estructuras con dispositivos que tienen un funcionamiento diferente.

## **I.3 Objetivos**

A través de un estudio comparativo basado en un análisis de confiabilidad estructural de tres edificios de concreto reforzado de dos crujías y 14 niveles, dotados con elementos disipadores de energía tipo TADAS, U y viscoelásticos. Determinar cuál de éstos sistemas proporciona el nivel de seguridad más alto atendiendo las mismas condiciones de suelo de la ciudad de México y su correspondiente peligro sísmico.

## **I.4 Alcances**

- Analizar y diseñar conjuntos de marcos estructurales reforzados con elementos disipadores de energía, se considera que dichos marcos están desplazados en la zona de la ciudad de México.
- Someter los marcos estructurales con disipadores a dos condiciones: a) para una excitación fuerte, equivalente al sismo ocurrido el 19 de Septiembre de 1985 en la estación SCT, b) para historias sísmicas correspondientes a la misma zona y que comprende un período de 100 años.
- En el proceso de simulación para la etapa de análisis ante un sismo fuerte, se construyen diez realizaciones a partir del marco estructural reforzado con disipadores e igual número de realizaciones de sismos, de manera que a cada realización de marco le corresponda una realización del sismo.

- Para la etapa de análisis ante historias de sismos, se emplean cinco realizaciones de cada tipo de marco e igual número de historias de manera que a cada realización de marco le corresponde una historia de sismos simulados.
- Con base en una comparación probabilística, mediante índices de confiabilidad asociados a respuestas estructurales, se define cuál de estos tipos de sistemas marco-disipadores conviene a ser usado en la zona de la ciudad de México.

## **I.5 Estado de arte sobre el empleo de disipadores de energía en edificios**

### **I.5.1 Estudios experimentales de los disipadores**

Hasta la fecha existe una gran cantidad de artículos publicados sobre el estudio del comportamiento de algunos tipos de disipadores de energía sísmica, sin embargo, este trabajo empleará la información disponible sobre los resultados experimentales de los dispositivos de control pasivo, específicamente sobre 3 tipos de ellos: U, TADAS y viscoelásticos.

#### **a) Disipadores tipo U**

Kelly y su grupo [1972] publicaron por primera vez la idea de cómo utilizar unas soleras de acero en forma de U como elementos disipadores de energía sísmica.

Tomando esta idea, en la década de 1970 se inició un proyecto enfocado para desarrollar dispositivos controladores de hundimientos para cimentaciones en la ciudad de México, los cuales fueron empleados junto con pilotes de fricción [Aguirre y Chicurel. 1975], posteriormente se progresó hasta aplicarse a disipadores de energía sísmica.

Otros investigadores basaron sus estudios sobre los dispositivos mostrados en la figura A.2 [Skinner *et al.* 1973], los cuáles operan bajo el concepto de *rolado por flexión*, estos dispositivos disipan energía sísmica al realizar movimientos en forma semejante a las orugas de un tractor.

Las primeras pruebas experimentales sobre estos dispositivos en México fueron realizadas por Aguirre y su equipo [1975 y 1989] con dispositivos hechos en acero y aluminio, tal como lo muestran las figuras I.5.1 y I.5.3. Con dichas pruebas se obtuvieron gráficas que relacionan números de ciclos de carga que soporta el dispositivo contra amplitud del movimiento.

A principios de la década de 1990 se probaron estos dispositivos con distintos parámetros geométricos [Aguirre y Sánchez. 1992], y se demostró que estos dispositivos son estables cuando se someten a una gran cantidad de cargas alternadas (como las que produciría un sismo) y con una capacidad de disipación de energía aceptable.

Jara y colaboradores [1992] investigaron las respuestas analíticas de una estructura de acero de 10 niveles y otra de concreto de nueve niveles con el empleo de este dispositivo, sometidas a sismos con las características de los que ocurren con mayor frecuencia en la ciudad de México.

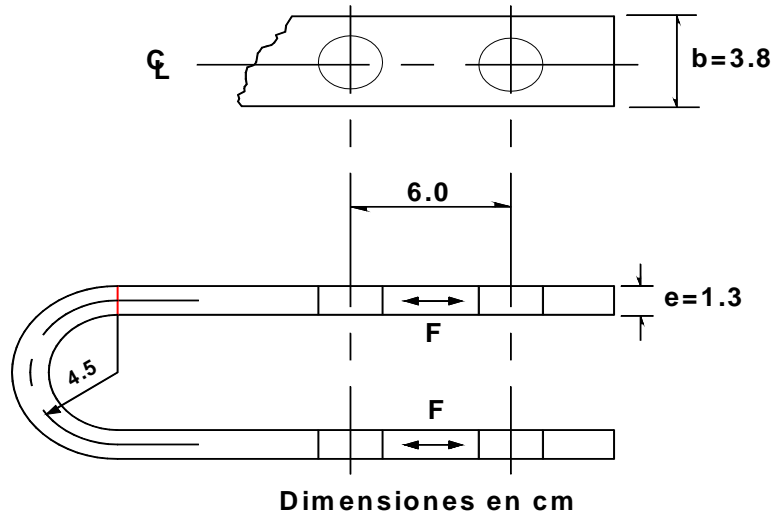


Figura I.5.1. Dispositivo en forma de U empleado en [Aguirre y Sánchez. 1992].

Estudios posteriores, sobre un sistema de un grado de libertad con disipadores de energía y demandas de ductilidad de 2 y 4, señalaron que el espacio de aplicación de estos sistemas, se restringe a períodos de las estructuras inferiores a 1.6 s. [Gómez *et al.* 1993].

Para aprovechar al máximo el espacio entre los dispositivos tipo U, se usó una forma distinta para colocar, en un solo conjunto, varios de ellos al mismo tiempo [Aguirre. 1993]. Este arreglo se empleó en un marco de acero excitado mediante una carga lateral empleando un sistema de muro de reacción y actuador [Echavarría *et al.* 1996].

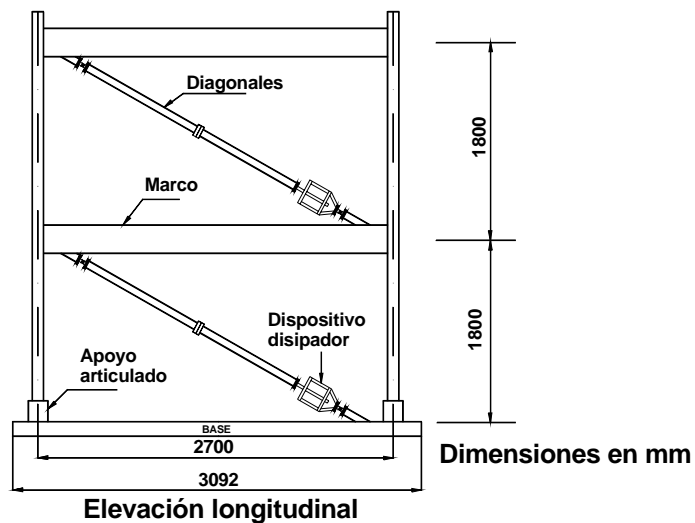


Figura I.5.2. Dimensiones del marco experimental con disipadores tipo U [González Alcorta. 1998].



González Alcorta [1998] y colaboradores [1994] estudiaron una estructura de acero de 2 niveles (figura I.5.2) empleando diagonales y este tipo de disipadores sobre una mesa vibradora. Estas pruebas permitieron afinar detalles constructivos relacionados con la vibración de los elementos diagonales.

Los trabajos descritos en los párrafos precedentes, desarrollados en su mayoría en México, contribuyeron significativamente al desarrollo experimental y analítico de este tipo de dispositivo disipador de energía.

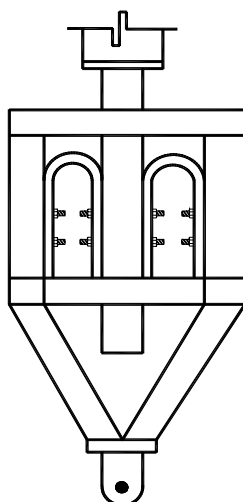


Figura I.5.3. Detalle final del dispositivo U [Aguirre y Sánchez. 1989].

### b) Disipadores tipo TADAS

El primer sistema TADAS (Triangular-plate Added Damping And Stiffness) fue empleado exitosamente para absorber la energía atrapada en los sistemas de tuberías en plantas nucleares por Kelly y Skinner [1980].

Algunas investigaciones mostraron que el empleo de estos dispositivos, formados con placas de acero en forma triangular, adicionaban rigidez, resistencia y amortiguamiento adecuados, sin embargo, la ductilidad y la capacidad de disipación de energía, no fue la adecuada para soportar sismos severos [Su. 1990].

En la Universidad Nacional de Taiwan se desarrolló un trabajo experimental y analítico [Tsai y Hong. 1992], [Tsai y Chen. 1992], [Tsai y Li. 1993], para investigar la efectividad de la soldadura entre las placas de acero triangular de los dispositivos, con amortiguamiento y rigidez adicional empleados en estructuras sismo-resistentes.

A partir del trabajo desarrollado por Tsai y colaboradores [1993] se resumen importantes resultados obtenidos de pruebas con cargas cíclicas en dispositivos TADAS, empleados como sistemas de disipación de energía primario. Estas pruebas con cargas cíclicas, confirmaron que un dispositivo TADAS, fabricado adecuadamente, puede mantener un número extremadamente grande de ciclos de carga. La predicción de las respuestas de los

marcos estudiados en laboratorio pudieron realizarse con precisión usando un programa de cómputo de análisis de respuesta no lineal.

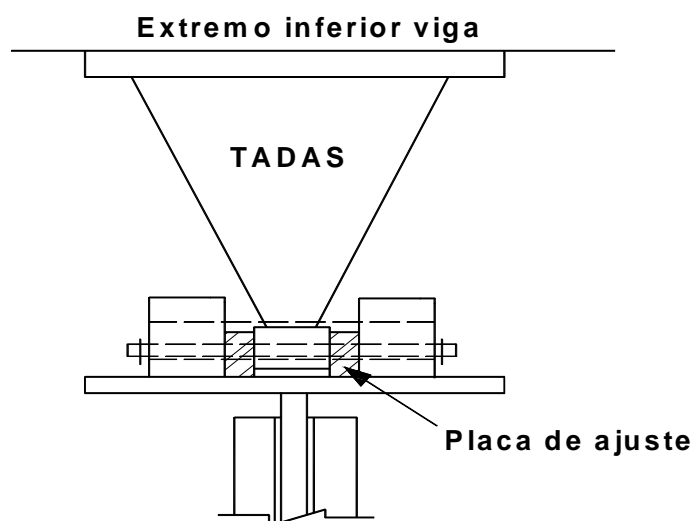


Figura I.5.4. Detalle del dispositivo TADAS [Tsai *et al.* 1993].

El equipo de Tsai [1993] analizó una placa triangular (parecida a una mitad de la placa tipo ADAS), estas placas se fijan en su base a otra placa, la cuál es unida al nivel superior del entrepiso, enseguida, se colocan pernos en el vértice del triángulo, los cuáles lo unen al sistema de contraventeos que salen desde el nivel inferior del entrepiso. Al realizar este tipo de unión, se comprobó que las placas sufren una deformación en curvatura simple (figura. A.3 y figura A.4).

Al aplicar un dispositivo TADAS a un marco de acero a escala natural, se demostró que las reducciones en la respuesta son parecidas a las obtenidas en los dispositivos tipo ADAS, pero en opinión de los autores, la solución de los modelos analíticos del marco se aproxima al modelo experimental con este tipo de dispositivo, ya que con el método de conexión, se manifiesta más efectivamente la rigidez lateral de las placas que con los dispositivos ADAS, en donde la rigidez depende en gran medida de la unión con las placas de apoyo [Whittaker *et al.* 1989].

En [Ruiz *et al.* 1996] se menciona una comparativa entre la respuesta sísmica, de un marco de concreto reforzado con y sin disipadores tipo TADAS, empleando acelerogramas simulados correspondientes al acelerograma registrado de la componente este-oeste del sismo ocurrido el 19 de Septiembre de 1985 en la ciudad de México. Los resultados obtenidos indicaron que cuando el marco examinado tuvo un período similar al período fundamental del sismo no fue posible mantener a los elementos estructurales en el intervalo elástico.

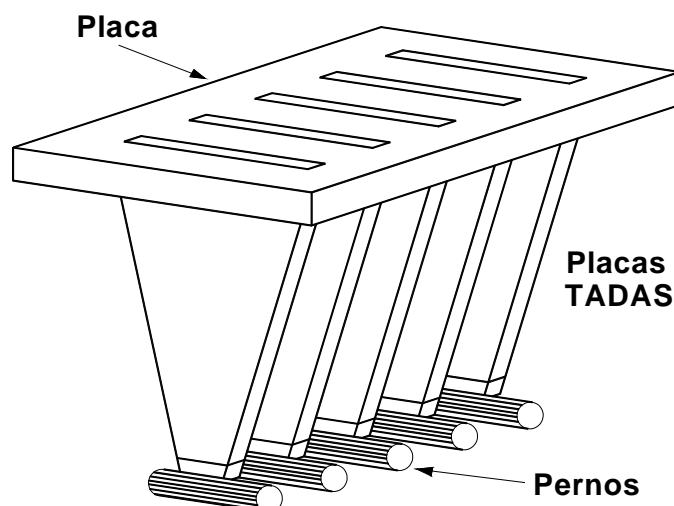


Figura I.5.5. Vista lateral del dispositivo TADAS [Tsai y Hong. 1992].

### c) Disipadores tipo viscoelásticos

Los primeros experimentos que se llevaron a cabo sobre este tipo de dispositivos mostraron un fuerte aumento del amortiguamiento en el marco y disminuciones importantes en la respuesta [Lin *et al.* 1988].

Este mismo comportamiento se observó en otros estudios [Aiken *et al.* 1990], donde los incrementos de temperatura, generados en el material viscoelástico durante la prueba fueron despreciables (figura I.5.6 y figura I.5.7).

Una gran cantidad de pruebas en marcos de acero a gran escala fueron llevados a cabo por Ashour y Hanson [1987], Lin y su equipo [1991], Fujita y su grupo [1991], el equipo de Aiken [1992 y 1994] y Chang con su grupo [1993 y 1995]. Otros trabajos con aplicaciones para el refuerzo en marcos de concreto también fueron realizados por Foutch y colaboradores [1993 y 1994].

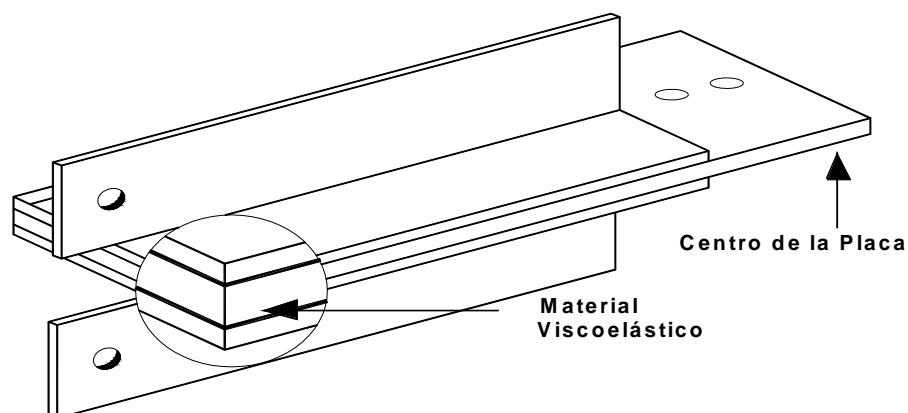


Figura I.5.6. Primer dispositivo viscoelástico empleado experimentalmente [Chang *et al.* 1993].

Usando el concepto de control de daño, Shen y Soong [1995], presentaron un método diferente para el diseño de dispositivos disipadores de energía. El método está basado en un índice para reforzar estructuras de concreto [Park y Ang. 1985].

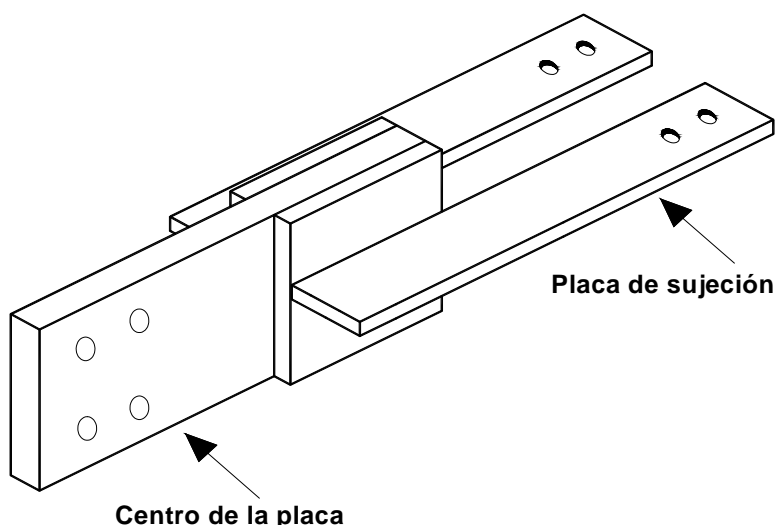


Figura I.5.7. Detalle del dispositivo viscoelástico [Aiken *et al.* 1992].

Soong y Mahmoodi [1990] analizaron el comportamiento de estos dispositivos al modificar la temperatura de 22 a 35°C, obteniendo una fuerte dependencia del amortiguamiento como función de este parámetro.

Kirekawa y Asano [1992] estudiaron un marco de acero de un nivel con un disipador viscoelástico de acrílico, las curvas histeréticas obtenidas de estas pruebas, mostraron buena capacidad de disipación y estabilidad, pero siguieron mostrando una dependencia del amortiguador respecto a la temperatura ambiente con la que se llevó a cabo el experimento.

El Grupo Lorant, fue de los primeros grupos en usar los dispositivos con material viscoelásticos para las conexiones trabe - columna en marcos contraventados [Hsu y Fafitis. 1992]. El sistema consiste de 2 "dientes" aislados, que trabajan únicamente a carga axial, y colocados simétricamente en los patines de la trabe (figura I.5.8), la fuerza cortante es transferida a través de un perno a la columna.

Las conexiones con dispositivos viscoelásticos mostraron reducciones en los desplazamientos laterales entre un 30 y 60% [Hsu y Fafitis. 1992].

El equipo de Chang [1993] describió una metodología para el análisis y diseño de estructuras con disipadores viscoelásticos, las fórmulas se obtuvieron de soluciones analíticas y experimentales a un modelo de 5 niveles de acero, escala 2/5 (figura I.5.9).

Otros procedimientos de diseño enfocados a estructuras con disipadores viscoelásticos fueron propuestos por Zhang y Soong [1992] y el equipo de Chang [1993].

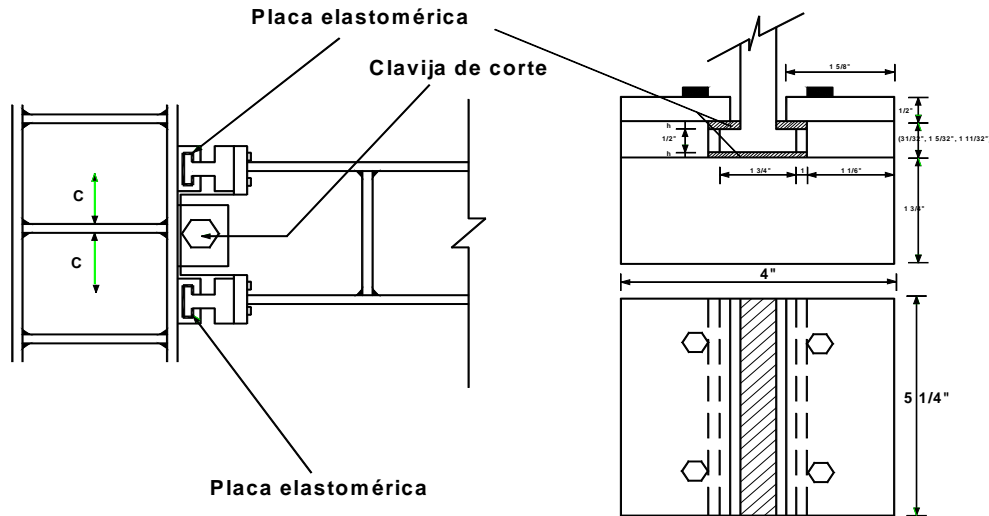


Figura I.5.8. Detalle de la conexión barra columna con disipadores viscoelásticos [Hsu y Fafitis. 1992].

El equipo de Constantinou [1993] mostró el desarrollo de un dispositivo que consta de un pistón de acero que contiene en su interior material fluido con comportamiento viscoelástico. Al aplicarle un sistema de fuerzas se hace pasar dicho material a través de un orificio, este mecanismo reduce los desplazamientos laterales y los momentos flexionantes sin introducir fuerzas axiales importantes.

Con el objetivo de evaluar la efectividad de la utilización de dispositivos viscosos y viscoelásticos se analizó la respuesta analítica de una estructura de 10 niveles en la que se incorporan dispositivos con ambos tipos de comportamiento [Fu. 1996].

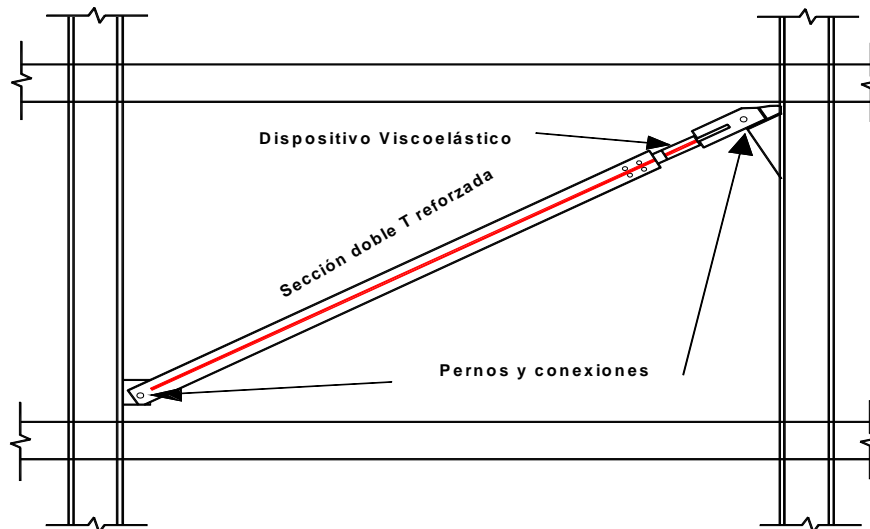


Figura I.5.9. Dispositivo viscoelástico [Aiken et al. 1992].

## I.5.2 Uso y empleo de los disipadores

Las grandes pérdidas humanas, materiales y económicas asociadas a los sismos intensos, han contribuido, de manera importante, al estudio e investigación de los disipadores de energía.

Actualmente se ha desarrollado una gran variedad de dispositivos, elaborados con diferentes materiales y con un comportamiento mecánico muy semejante, los más comúnmente empleados están fabricados de acero o plomo y tienen un comportamiento elastoplástico. Uno de los principales requisitos de los disipadores es que deben soportar una gran cantidad de ciclos de carga, sin experimentar una degradación en sus propiedades, antes de fallar.

En nuestro país se han propuesto algunos disipadores como son los disipadores imantados presentados por Echegaray [1997], el de tipo panel [Vera y Ramírez de Alba. 1996] y el desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la elaboración de pruebas de tracción en estructuras [Sánchez R. 1991], cuya fabricación, además de sencilla, resulta de bajo costo.

Aunque en los últimos años se ha dado un gran impulso al desarrollo de dispositivos disipadores de energía sísmica aplicados principalmente sobre edificios, también han sido desarrollados otros tipos de disipadores que actúan con un comportamiento semejante a los dispositivos usados en este trabajo para diversas estructuras, como los propuestos para obras hidráulicas por Cruickshank [1962], puentes por García K. [1998], así como aquellos enfocados a estructuras que deben proteger equipos muy sensibles y costosos como plantas nucleares, hospitales, centrales telefónicas y otros tipos de estructuras sismo - resistentes.

La situación económica actual de nuestro país impide que se destinen mayores recursos tanto a la divulgación, investigación y desarrollo de tecnología con estos dispositivos disipadores de energía sísmica, aún así los esfuerzos que se han realizado son grandes, pruebas de ello son los edificios que se han reforzado y construido con estos sistemas.

La tabla I.5.1 muestra algunos edificios nuevos y reforzados con diferentes tipos de dispositivos disipadores de energía que se han realizado en México, y algunas estructuras nuevas en países que son capaces de aplicar esta tecnología para solventar grandes demandas sísmicas en sus edificios.

En México, se construyó un edificio de acero con disipadores tipo viscoelástico [Miranda *et al.* 1998] al poniente de la ciudad de México, este edificio consta de 8 niveles, tiene un período de vibración cercano a 1 s., el terreno es duro, En este edificio se alberga la empresa estadounidense 3M, la cual fabricó los dispositivos usados en ese edificio.

Tabla I.5.1. Edificios construidos con disipadores de energía sísmica.

Nombre y tipo de la estructura	Ciudad	Tipo y no. de dispositivos	Fecha	Carga	Información adicional
Edificio 3M, 8 niveles (3 para estacionamiento y 5 oficinas)	México D.F.	Dispositivos Viscoelásticos		sismo	Construcción Nueva
Hospital de Cardiología del IMSS	México D.F.	Dispositivos ADAS			Construcción Reforzada
Edificio Parque España	México D.F.	Dispositivos U			Proyecto de Reparación
Edificio Izazaga 38, 12 niveles	México D.F.	Dispositivos ADAS			Construcción Reforzada
Hospital de oficinas centrales del IMSS, 11 niveles	México D.F.	Dispositivos ADAS			Construcción Reforzada
Edificio AE2, 10 niveles	México D.F.	162 Dispositivos ADAS		sismo	Construcción Reforzada
Edificio de almacén de autos nuevos, 5 niveles	Acapulco, Gro.	Dispositivos ADAS		sismo	Construcción Nueva
Conjunto La Jolla, 3 torres de 28 niveles	Acapulco, Gro.	128 Dispositivos ADAS		sismo	Construcción Nueva
Torre Mayor, 55 niveles	México D.F.	Amortiguadores viscosos tipo Taylor	2002	sismo	Construcción Nueva
Edificio Santa Clara Country, edificio de acero con núcleo de concreto, 14 pisos (1976)	San José, California, USA	96 Dispositivos viscoelásticos 3M	1993	sismo	
Edificio escolar de acero, 2 niveles	Phoenix, Arizona, USA	conector de barra-columna con dispositivos viscoelásticos	1992	sismo	Construcción Nueva

### I.5.3 Reglamentación sobre los disipadores

Aunque en la actualidad existe una gran cantidad de edificios y otros tipos de estructuras (puentes, obras hidráulicas etc. ) construidos con dispositivos disipadores de energía, los códigos, normas y reglamentos que rigen el diseño y construcción de estos nuevos sistemas son prácticamente nulos en nuestro país, sin embargo, en la sección 10 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo [NTCS-95. 1995] del Reglamento vigente [RCDF-93. 1993] establece referente al análisis y diseño de otras construcciones nuevas que: *“Las presentes normas complementarias sólo son aplicables en su integridad a edificios, tratándose de otras estructuras se aplicarán métodos de análisis apropiados al tipo de estructura en cuestión, siempre que tales métodos respeten las disposiciones de la presente sección, sean congruentes con este cuerpo normativo y reciban la aprobación del Departamento”*.

Ruiz y Alvarez [1995] revisaron la norma oficial de 37 países, todos ellos miembros de la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica, analizando principalmente los aspectos relacionados al diseño, construcción y refuerzo de edificios con elementos reductores de la respuesta sísmica (aisladores de base y disipadores de energía sísmica), encontrando que en la mayoría de las normas revisadas se permiten utilizar estos dispositivos con la condición de que los diseños sean aprobados por las autoridades correspondientes, así como el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.

Así pues, en México, los mayores esfuerzos por crear un reglamento que permita satisfacer ciertos lineamientos de construcción con dispositivos disipadores de energía, han sido realizados por el Comité de Normatividad y Criterios de Diseño Sísmico de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica [Ruiz. 1998].

Algunas recomendaciones a la normatividad sobre el diseño sísmico de edificios con disipadores, propuestas por autores mexicanos, se resumen a continuación:

En [Silva y Ruiz. 1993] se presenta un planteamiento iterativo para el diseño de estructuras nuevas con disipadores de energía de tipo histerético, analizadas por marcos planos, sugiriéndose que el marco con disipadores tenga un período de vibración igual al marco convencional del cuál se parte (condición que no debe imponerse en general). Las condiciones de diseño que se establecen son las siguientes: 1) que la rigidez de los disipadores varíe de manera proporcional a la rigidez de los entrepisos, 2) que éstos tengan suficiente capacidad de deformación para que los disipadores trabajen adecuadamente, 3) que la ductilidad desarrollada por los disipadores sea la adecuada, 4) que el marco que contiene a los disipadores tenga un comportamiento casi lineal, y 5) que las distorsiones de entrepiso no sean mayores a las recomendadas por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Este procedimiento implica realizar varios análisis no lineales paso a paso en el tiempo.

Sánchez Martínez [1993] plantea diferentes alternativas para instalar disipadores en marcos estructurales y algunas bases muy generales para el diseño de estructuras con estos dispositivos, además, se propone un criterio para evaluar en forma empírica el grado de daño acumulado en los disipadores durante su vida útil.

Campos y Esteva [1997b, 1998] proponen un criterio para el diseño sísmico de edificios nuevos y para el refuerzo de edificios con disipadores de energía, las condiciones de diseño se expresan en término de las ductilidades y del desplazamiento relativo de los entrepisos. El temblor de diseño se expresa en términos de espectros no lineales de aceleraciones para distintas ductilidades demandadas, para llegar al diseño final, es necesario realizar iteraciones para lograr que todas las condiciones de diseño se satisfagan.

En el panorama internacional, la situación es muy similar a la de nuestro país, son pocas las naciones que llevan un avance significativamente mayor al nuestro.



En [Aiken *et al.* 1993], se muestran pruebas experimentales realizadas sobre sistemas de disipación de energía pasiva, sus marcos de prueba con estos dispositivos fueron diseñados con las normas UBC edición 1979 y con el Código Sísmico Japonés.

El equipo de Cherry [1993] hizo una revisión importante del Código Nacional de Construcción de Canadá (NBCC) y de la Asociación de Ingenieros Estructuristas de California (SEAOC) sobre el empleo de estos dispositivos, destacando lo siguiente:

1) sismos de menor intensidad no deben causar daño estructural, 2) sismos moderados deben ser la base para el diseño, los edificios deben de ser proporcionados, para resistir momentos moderados, los cuales deben esperarse durante el tiempo de vida del edificio, sin daño significativo en la base, y 3) sismos intensos pueden causar daño estructural significativo, sin embargo, el colapso de la estructura y la pérdida de vidas humanas se deben evitar.

La Asociación de Ingenieros Estructurales del Norte de California, elaboraron un documento titulado: "Tentativas de requerimientos generales para el diseño y construcción de estructuras, incorporando dispositivos de disipación de energía pasivas" [SEAONC. 1993], siendo éste, un suplemento del Código de Construcción Uniforme con requerimientos desarrollados especialmente para edificios con dispositivos de amortiguación suplementarios [Scholl. 1993].

La Asociación de Ingenieros Estructuristas de California [SEOAC. 1998] estipula que para dispositivos disipadores de energía sísmica, se permite que los marcos deban ser diseñados sólo por esfuerzos, pudiendo suministrar un funcionamiento seguro como se define en el FEMA 273 [Miyamoto. 2000].

Los últimos trabajos que han sido desarrollados, se han realizado con procedimientos recomendados por las guías NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) para la rehabilitación de edificios por sismo (FEMA 273) [Sadek *et al.* 2000], [Bucle. 2000].

### **I.5.4 Tendencias sobre los disipadores**

Los sistemas disipadores de energía desarrollados en la actualidad, son aplicados principalmente para reforzar estructuras dañadas o para diseñar nuevas estructuras, incrementando su rigidez, resistencia y agregando amortiguamiento importante. Existen dispositivos que trabajan para diversos efectos: compresión, flexión, fricción etc. y una gran gama de ellos, los hay con equipos de control, sin ellos, aplicados sobre la cimentación, sobre la super-estructura, etc.

Debido a que el desarrollo de estos dispositivos ha abarcado prácticamente casi todos los efectos que pueden afectar a una estructura, las nuevas tendencias sobre estos dispositivos establecen que el desarrollo de ellos, se dirige hacia la combinación entre algunos de ellos. Por esta razón, en este trabajo, se menciona en la clasificación general de estos dispositivos, los dispositivos semi-activos, los cuáles trabajan empleando algunas características de los

sistemas de control activo y pasivo, también se menciona en algunas referencias bibliográficas sobre dispositivos híbridos, sistemas con amortiguamiento con masa híbridos, semi-activos con rigidez variable y semi-activos con amortiguamiento, sólo por citar algunos nuevos sistemas.

Por último, respecto al futuro de estos dispositivos, una gran cantidad de artículos publicados en diversos congresos nacionales e internacionales, han otorgado elementos para integrar estos sistemas a algunos software existentes, y que son comúnmente empleados en análisis de estructuras tales como SAP2000 y Drain 2D, sin que hasta la fecha se haya logrado un programa que permita llevar a cabo este trabajo satisfactoriamente.

# ANÁLISIS Y DISEÑO DE MARCOS CON DISIPADORES

### II.1 Metodología de diseño

En este capítulo se describe la metodología que será usada para el diseño de edificios dotados de dispositivos disipadores de energía desarrollado por Campos y Esteva [1997b y 1998]. Dicha metodología incorpora un grupo de variables que intervienen en la respuesta dinámica de edificios de concreto reforzado dotados de disipadores histeréticos. Dada la importancia de dicho método de diseño, se incorpora como apéndice B.

Se sabe que en los criterios para establecer metodologías de diseño estructural sismo resistente, se deben considerar aspectos tales como: respuesta estructural ante temblores específicos, historia de temblores, sismicidad del lugar, estimación de las propiedades de la estructura y finalmente aspectos económicos [Campos y Esteva. 2002].

Las variables de control más importantes dentro del método de diseño propuesto, que afectan el comportamiento de los edificios dotados con disipadores de energía, son:

- a) La relación  $r_k$ , cociente entre la rigidez lateral del elemento disipador de energía ( $k_d$ ) y la rigidez total ( $k$ ), de cada entrepiso del edificio. Además  $r_k$  puede variar dependiendo de la altura del edificio.

$$r_k = \frac{r_k}{1 - r_k} = \frac{k_d}{k} \quad (2.1)$$

- b) La relación ( $\psi$ ), es el cociente entre el desplazamiento de fluencia del disipador ( $\delta_{yd}$ ) y el desplazamiento de fluencia del marco convencional ( $\delta_{yc}$ ) de cada entrepiso, también ésta puede ser variable en la altura del edificio.

$$\psi = \frac{\delta_{yd}}{\delta_{yc}} \quad (2.2)$$

- c) El factor de ductilidad ( $\mu$ ), correspondiente al espectro de pseudo-aceleraciones inelástico del temblor de diseño empleado.

A partir de la discusión hecha por D. Campos y L. Esteva, [1997b y 1998] sobre los criterios de diseño de marcos de concreto con disipadores de energía, se emplean los siguientes valores de los parámetros:  $r_k = 0.5$ ,  $\psi = 0.5$  y  $\mu = 4$  los cuáles fueron posteriormente corroborados mediante un estudio de optimización [Campos y Esteva. 2002].

### II.2 Determinación de la relación de rigidez para el paquete disipador

Se presenta un estudio que permite estimar la rigidez de los componentes del paquete disipador (disipador de energía + contraventeos) a partir de las variables de control.

Al deformarse el marco de la figura II.1.a, se presenta la configuración mostrada en la figura II.1.b, el desplazamiento del paquete disipador  $\delta_d$ , estará compuesto del desplazamiento de las barras  $\delta_b$  y el desplazamiento del disipador  $\delta_D$ :

$$\delta_d = \delta_b + \delta_D \quad (2.3)$$

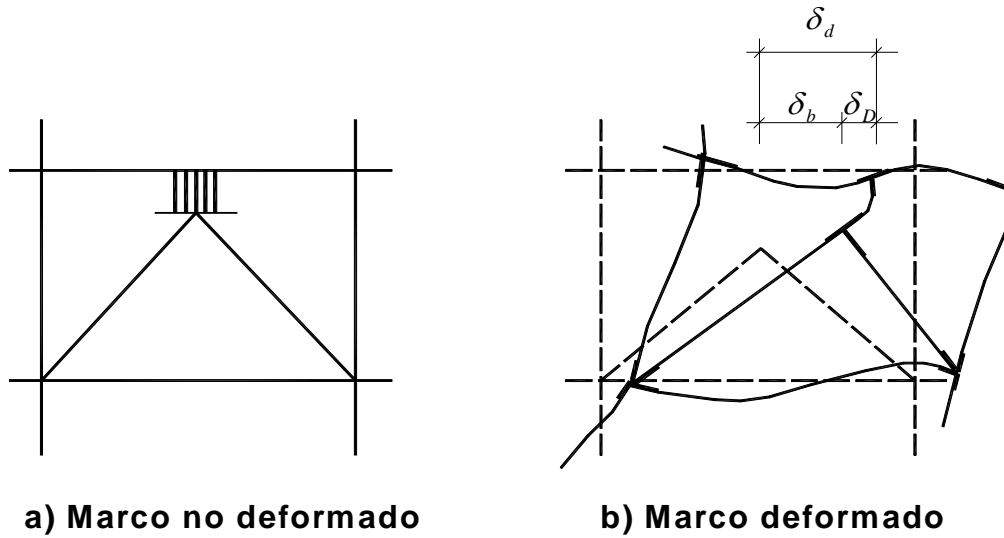


Figura II.1. Desplazamiento de marco con paquete disipador.

El desplazamiento lateral del sistema con el elemento disipador de la figura II.1 es equivalente al desplazamiento de una barra con 2 secciones diferentes como en la figura II.2, en donde es válido aplicar la ecuación (2.3). En la figura II.2 se sabe que:  $F_b = F_D = F_d$  y como:

$$\delta_d = \frac{F_d}{K_d} \quad (2.4)$$

$$\delta_D = \frac{F_D}{K_D} \quad (2.5)$$

$$\delta_b = \frac{F_b}{K_b} \quad (2.6)$$

La ecuación (2.3) se escribe como:

$$\frac{F_d}{K_d} = \frac{F_b}{K_b} + \frac{F_D}{K_D} \quad (2.7)$$

y se encuentra que:

$$\frac{1}{K_d} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_D} \quad (2.8)$$

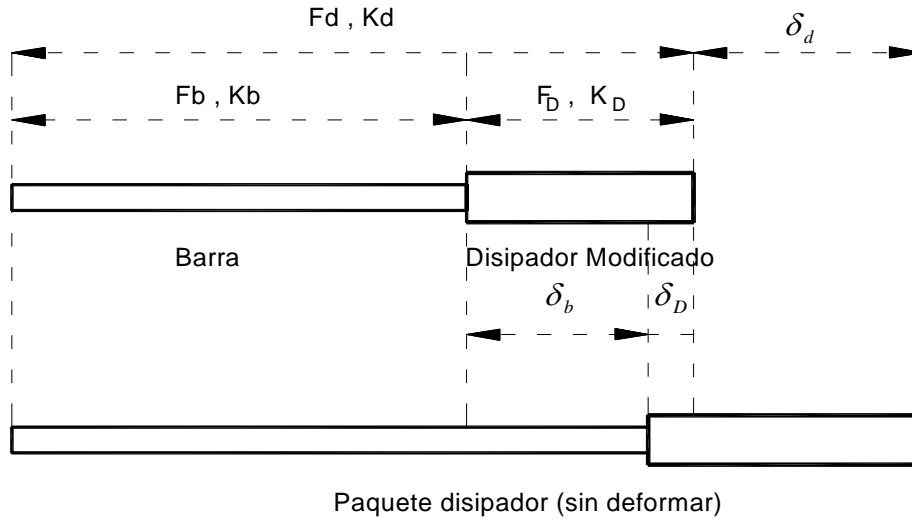


Figura II.2. Características de los elementos que componen el paquete disipador.

De la fórmula anterior, para un sistema en serie, y de forma similar:

$$K_d = \frac{K_b K_D}{K_b + K_D} \quad (2.9)$$

$$K_d = \frac{K_D}{1 + \left(\frac{K_D}{K_b}\right)} \quad (2.10)$$

y también puede escribirse como:

$$K_d = \left[1 / \left(1 + \left(1 / \left(K_b / K_D\right)\right)\right)\right] K_D = \frac{K_D}{r_D} \quad (2.11)$$

El denominador del coeficiente  $K_D$  se define como:

## II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS CON DISIPADORES

$$r_D = 1 + \frac{1}{\left(\frac{K_b}{K_D}\right)} \quad (2.12)$$

La ecuación (2.11) se puede escribir como:

$$K_D = r_D K_d \quad (2.13)$$

Por otra parte, reemplazando la ecuación (2.13) en la (2.8):

$$\frac{1}{K_d} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{r_D K_d} \quad (2.14)$$

$$K_b = \left(\frac{r_D}{r_D - 1}\right) K_d \quad (2.15)$$

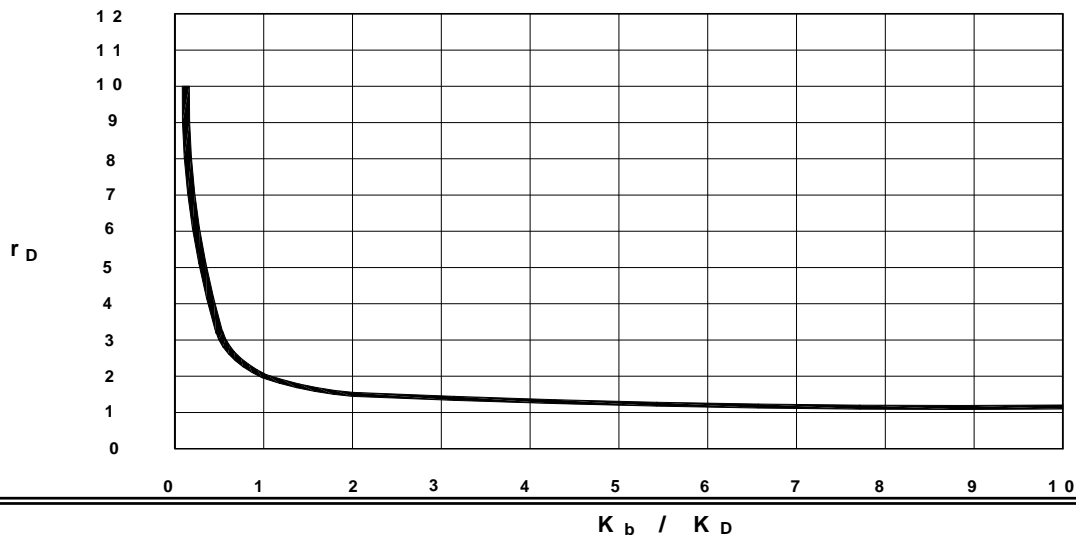
y la relación entre  $K_b$  y  $K_D$  será, reemplazando la ecuación (2.13) en la (2.15):

$$K_b = \left(\frac{r_D}{r_D - 1}\right) \frac{K_D}{r_D} \quad (2.16)$$

$$K_b = \left(\frac{1}{r_D - 1}\right) K_D \quad (2.17)$$

$$K_D = (r_D - 1) K_b \quad (2.18)$$

De la gráfica II.3, la cual relaciona los parámetros  $r_D$  y  $K_b/K_D$  se puede ver que el sistema es estable cuando la relación de  $r_D$  está entre 1.5 y 2.5, la relación  $K_b/K_D$  tienen valores de 0.75 ó de 1.



**Figura II.3. Proporción de rigidez del disipador.**

Aplicando estos valores en las ecuaciones (2.13) y (2.16) se obtienen las relaciones mostradas en la tabla II.1.

**Tabla II.1. Relación de rigidez de los elementos del paquete disipador.**

$r_D$	$K_b$	$K_D$
1.5	$3 K_d$	$1.5 K_d$
2.0	$2 K_d$	$2.0 K_d$

Para este trabajo se utilizará la relación de  $r_D$  igual a 1.5.

En el caso de los disipadores TADAS, se espera que la carga de fluencia este controlada por el disipador y los contraventeos deberán permanecer sin demanda importante de carga. La rigidez axial para una barra está dada por la siguiente expresión:

$$K_b = \left( \frac{EA}{L} \right) \cos^2 \alpha \quad (2.19)$$

En el apéndice B se muestra el complemento a este capítulo sobre el concepto teórico de las variables de control que influyen en la respuesta dinámica de edificios de concreto reforzados con disipadores sísmicos. Adicionalmente en la figura II.4 se presenta un diagrama de flujo que explica de manera general los pasos que deben cumplirse de acuerdo a ésta metodología de análisis y diseño.

Los programas que fueron empleados en esta tesis, y que contienen la metodología empleada, están contenidos en un disco al final de este trabajo.



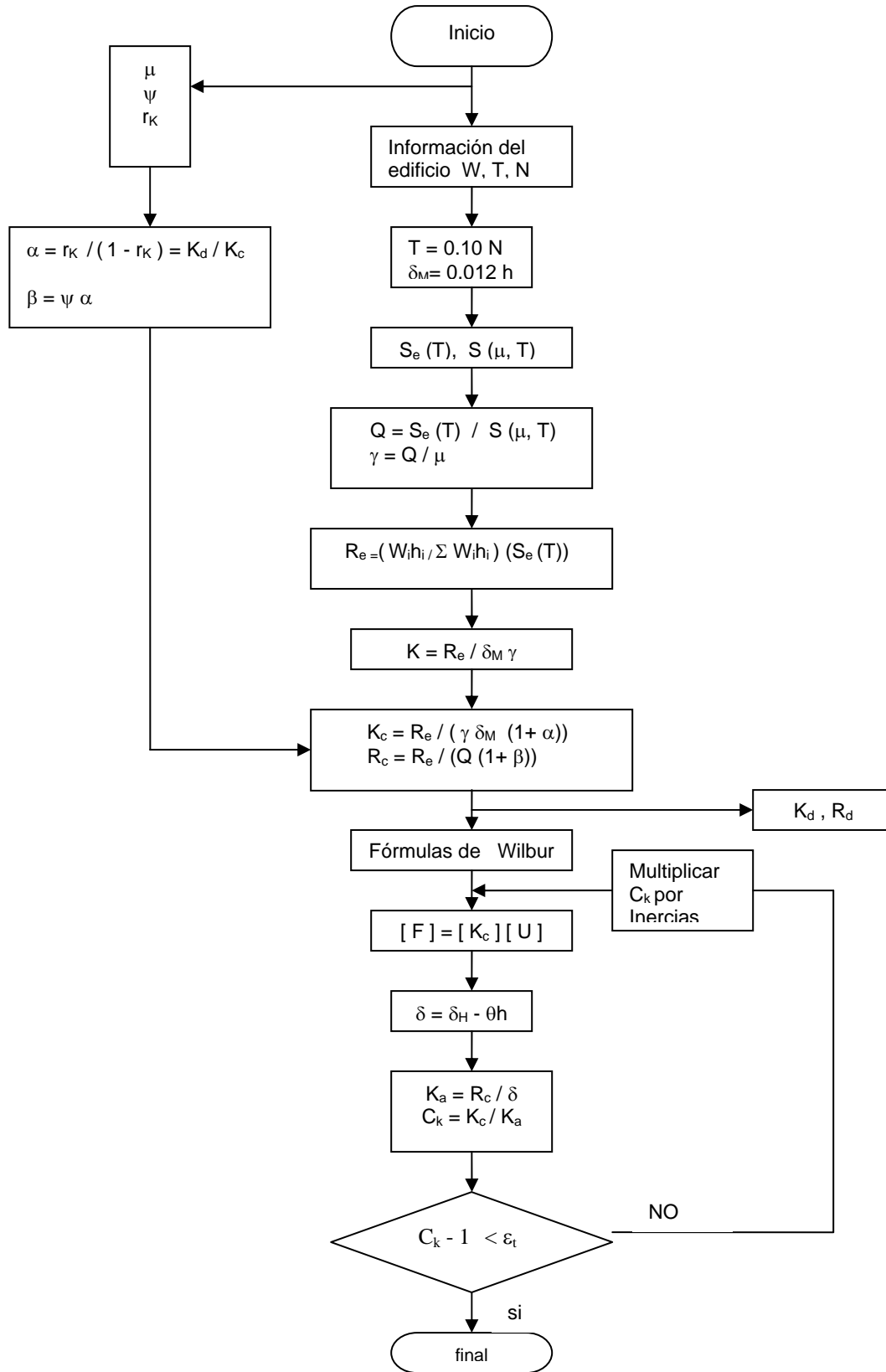


Figura II.4. Diagrama de flujo de la metodología de análisis y diseño usada.

**II.3 Análisis y diseño de disipadores tipo TADAS**

La tabla II.2 presenta los valores de rigidez obtenidos de programas que contienen la metodología antes descrita en este capítulo, estos valores corresponden a la rigidez del paquete disipador (dispositivo + contraventeos), y relaciona rigideces de cada entrepiso, los datos están dados en kg/cm.

**Tabla II.2. Valores de rigidez del paquete disipador.**

nivel	kd (kg/cm)	r <sub>D</sub>	k <sub>D</sub> (kg/cm)	k <sub>b</sub> (kg/cm)
1	75 679	1.5	113 519	227 038
2	55 945	1.5	83 917	167 834
3	50 070	1.5	75 104	150 209
4	47 195	1.5	70 792	141 584
5	44 396	1.5	66 594	133 187
6	42 255	1.5	63 383	126 765
7	38 811	1.5	58 217	116 434
8	35 759	1.5	53 639	107 278
9	31 496	1.5	47 245	94 489
10	27 783	1.5	41 675	83 349
11	23 058	1.5	34 587	69 174
12	19 761	1.5	29 641	59 283
13	17 721	1.5	26 581	53 162
14	15 349	1.5	23 024	46 048

Recurriendo a la ecuación (A.1) del apéndice A que se refiere a la rigidez lateral, despejando de ella a  $t$ , además usando los valores de  $b = 35 \text{ cm}$ ,  $h = 40 \text{ cm}$ . y  $n = 1$ , en la tabla II.3 se presenta el diseño de los disipadores TADAS, las características ahí mostradas representan las propiedades de una sola crujía, de cada entrepiso. Además en esa tabla están incluidas de la ecuación (A.2) y (A.4) del mismo apéndice, el esfuerzo y desplazamiento de fluencia respectivamente.

Las propiedades mecánicas del material de los disipadores TADAS son:  $E = 2\ 100\ 000 \text{ kg/cm}^2$ ,  $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_u = 4200 \text{ kg/cm}^2$ .

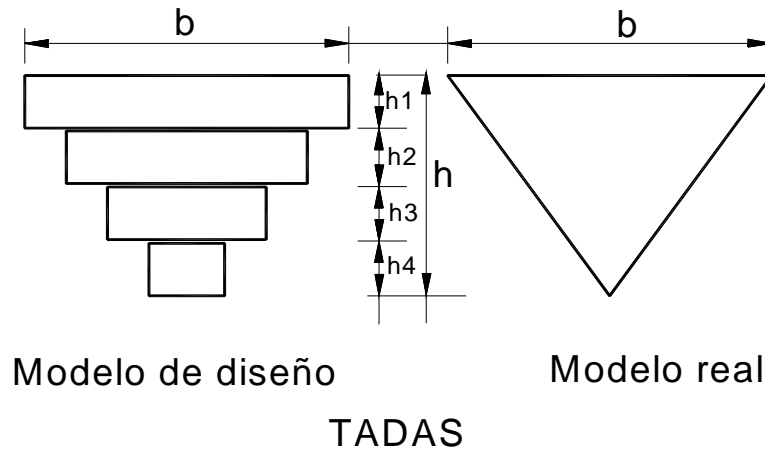
**Tabla II.3. Esfuerzos y desplazamientos de fluencia finales de los TADAS.**

nivel	b (cm)	h (cm)	t (cm)	Py (kg/cm <sup>2</sup> )	Δ <sub>y</sub> (cm)
1	35	40	8.40	26 137	0.23
2	35	40	7.60	21 395	0.25
3	35	40	7.32	19 848	0.26
4	35	40	7.18	19 096	0.27
5	35	40	7.03	18 306	0.27
6	35	40	6.92	17 738	0.28
7	35	40	6.73	16 777	0.29
8	35	40	6.54	15 843	0.29
9	35	40	6.27	14 562	0.31
10	35	40	6.02	13 424	0.32
11	35	40	5.65	11 825	0.34
12	35	40	5.37	10 682	0.36
13	35	40	5.18	9 939	0.37
14	35	40	4.94	9 040	0.39

Al modelar estos elementos en los marcos estructurales, durante el proceso de análisis dinámico y no lineal, se observó lo siguiente:

- a) usando varias placas para su configuración, se observó que el 1er. modo de vibración del marco estructural era muy bajo respecto al esperado
- b) dado que ya se había obtenido previamente la rigidez ( $K_d$ ) del paquete disipador, se intentó combinar las fórmulas con las cuales se determinan las propiedades del dispositivo, pero se encontró con un sistema de ecuaciones con demasiadas incógnitas, por ello se optó por utilizar casi las mismas propiedades de un disipador usado en pruebas experimentales
- c) para la configuración final del dispositivo TADAS en el programa de análisis SAP2000 para el análisis dinámico, se modeló tal como se aprecia en la figura II.5, en todos los entrepisos se usaron las mismas propiedades geométricas, con excepción del espesor, los nodos de conectividad se consideraron libres

- d) El resto de las propiedades del disipador como área, inercia, coeficiente de Poisson entre otras, fueron obtenidas para alimentar el archivo de datos para el DRAIN-2D en el análisis no lineal.



**Figura II.5. Configuración de TADAS para el SAP2000.**

Respecto a las propiedades del dispositivo, el desplazamiento de fluencia resultante en cada entrepiso es muy inferior a los valores obtenidos en marcos de prueba en laboratorio, los cuales oscilan entre 3.1 y 5.6 mm. [Tsai *et al.* 1993].

#### II.4 Análisis y diseño de disipadores tipo U

Los valores de rigidez del paquete disipador que se presentan en la tabla II.3 se utilizarán también para el diseño de los dispositivos tipo U, incluyendo las mismas proporciones de rigidez para las barras y para el elemento disipador.

Aplicando la ecuación (A.7) que corresponde a la rigidez elástica inicial del dispositivo U, al despejar  $n$  la nueva ecuación sería:

$$n = \frac{K_D}{0.297b\sigma_u} \quad (2.20)$$

Siendo  $n$  la cantidad de placas U del disipador, además  $b$  se toma como 3.81 cm y  $e$ , el espesor de cada solera es 1.27 cm.

## II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS CON DISIPADORES

Las propiedades mecánicas del material de las placas del dispositivo son:  $\sigma_u = 4200 \text{ kg/cm}^2$  y  $E = 2\ 100\ 000 \text{ kg/cm}^2$ .

Algunas de las propiedades geométricas de este tipo de dispositivo fueron encontradas en [Aguirre M y Sánchez A R. 1992] y el resto de las propiedades de las fórmulas del apéndice A, la tabla II.4 muestra las características finales de este disipador.

**Tabla II.4. Esfuerzos y desplazamientos de fluencia finales de los U.**

nivel	b (cm)	e (cm)	n	Py (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Delta_y$ (cm)
1	3.81	1.27	22	22 976	0.226
2	3.81	1.27	16	17 454	0.226
3	3.81	1.27	14	15 621	0.226
4	3.81	1.27	14	14 724	0.226
5	3.81	1.27	14	13 851	0.226
6	3.81	1.27	12	13 183	0.226
7	3.81	1.27	12	12 109	0.226
8	3.81	1.27	10	11 157	0.226
9	3.81	1.27	10	9 827	0.226
10	3.81	1.27	8	8 668	0.226
11	3.81	1.27	8	7 194	0.226
12	3.81	1.27	6	6 165	0.226
13	3.81	1.27	6	5 529	0.226
14	3.81	1.27	4	4 789	0.226

Durante la configuración de estos dispositivos, se apreciaron los siguientes puntos:

- incluyendo las propiedades geométricas descritas en el cuadro anterior y durante el análisis dinámico del marco estructural, se encontró el modo de vibración esperado
- respecto a la cantidad de placas del dispositivo, se puede ver que los números son pares, para facilitar su colocación, debido a que es más fácil montar las placas en números pares.

### **II.5 Análisis y diseño de disipadores tipo VISCOELÁSTICOS**

Para el diseño de los dispositivos viscoelásticos, los valores de rigidez del conjunto disipador, son los mismos de la tabla II.2.

El espesor de las capas del material viscoelástico  $h$  puede determinarse con la deformación amortiguada máxima permisible, para garantizar que el esfuerzo máximo del material viscoelástico sea más pequeño que el valor permisible máximo, para que esto se logre, debe permitirse el 60% del esfuerzo amortiguado [Chang *et al.* 1993].

Siguiendo las correspondientes propiedades de amortiguamiento del sistema de la tabla A.2 de 25°C, 20% de deformación y 3.5 Hz. La relación de amortiguamiento de la estructura viscoelásticamente amortiguada es alrededor del 15 %, la cual es la meta para la mayoría de las estructuras, si en esta etapa, la relación de amortiguamiento calculada es más baja que la requerida, tendrán que utilizarse más capas viscoelásticas o más amortiguadores [Chang *et al.* 1993].

La tabla II.5 muestra el diseño de los disipadores con material viscoelástico:

**Tabla II.5. Propiedades geométricas finales de los VE.**

nivel	$K_D$ (kg/cm)	$K_D$ (ton/m)	Carga axial en barras (ton)	Deformación máxima permisible (cm)	espesor $h$ (cm)	$K'$ (ton/m)	Área (cm <sup>2</sup> )	Dimensiones finales (cm)
1	113 519	11 315	26.00	0.229	0.38	5 676	770.41	2 pl 35 x 22.5 x 3/16
2	83 917	8 392	18.15	0.216	0.36	4 196	537.81	2 pl 25 x 22.5 x 3/16
3	75 104	7 510	17.55	0.234	0.39	3 755	520.03	2 pl 25 x 20 x 3/16
4	70 792	7 079	16.98	0.240	0.40	3 540	503.14	2 pl 25 x 20 x 3/16
5	66 594	6 659	16.25	0.244	0.41	3 330	481.51	2 pl 25 x 20 x 3/16
6	63 383	6 338	15.48	0.244	0.41	3 169	458.69	2 pl 22.5 x 20 x 3/16
7	58 217	5 822	14.47	0.249	0.41	2 911	428.77	2 pl 22.5 x 20 x 3/16
8	53 639	5 364	13.39	0.249	0.42	2 682	396.76	2 pl 20 x 20 x 3/16
9	47 245	4 725	12.03	0.255	0.42	2 362	356.46	2 pl 20 x 17.5 x 3/16
10	41 675	4 168	10.65	0.256	0.43	2 084	315.57	2 pl 17.5 x 17.5 x 3/16
11	34 587	3 459	8.99	0.260	0.43	1 729	266.39	2 pl 17.5 x 15 x 3/16
12	29 641	2 964	7.10	0.240	0.40	1 482	210.38	2 pl 15 x 15 x 3/16
13	26 581	2 658	4.92	0.185	0.31	1 329	145.79	2 pl 15 x 10 x 3/16
14	23 024	2 302	2.55	0.111	0.18	1 151	75.56	2 pl 10 x 10 x 3/16

De las propiedades antes descritas, la carga axial se obtuvo del análisis dinámico del marco estructural con la adición de los disipadores viscoelásticos, sometido a la acción del espectro de diseño.

Para determinar el valor de  $K'$  es necesario definir la cantidad de dispositivos en cada entrepiso del marco estructural, así como tamaño y sitio donde se ubicarán.

El área se estima recurriendo a la ecuación (A.14) del apéndice A, despejando la variable  $A$ , algunas propiedades adicionales que se usan para el diseño de los disipadores con material viscoelástico, son:  $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $G' = 200 \text{ psi} = 140.617 \text{ ton/m}^2$ , el cual fue obtenido experimentalmente a las condiciones que se señalan en la tabla A.2 del citado apéndice.

Adicionar estos dispositivos en los análisis de los marcos estructurales, permitió observar los siguientes puntos:

- a) considerando las propiedades geométricas del dispositivo descritas en la tabla II.6 se obtuvo el modo de vibración esperado
- b) como no existen disipadores viscoelásticos estándar, algunas de las propiedades geométricas obtenidas en este trabajo se proponen, pero en el caso de los espesores de las láminas, dado que fueron muy finos, se tomó un espesor uniforme, el espesor mínimo utilizado en algunas pruebas experimentales fue de 1/16", y en este trabajo 3/16".

### II.6 Análisis y diseño de los marcos estructurales

En esta parte se presentan algunas propiedades del marco convencional, importantes en el diseño del mismo, pero que no serán mostradas en forma detallada, por considerarse no trascendentes en el objetivo de este trabajo.

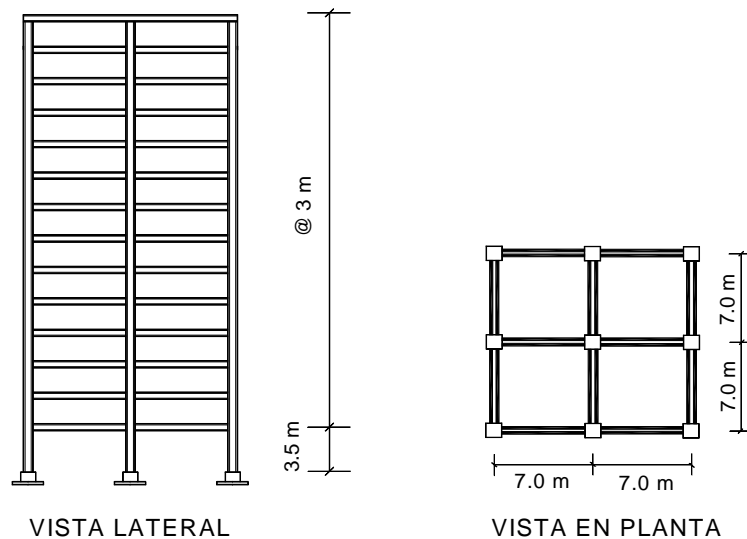
Los programas de cómputo empleados fueron para la etapa preliminar (definición de secciones, rigidez del paquete disipador, rigidez de entrepiso etc.) y para la etapa de diseño (momento curvatura, acero de refuerzo, rigidez y resistencia de elementos, etc.) los programas contenidos en [Campos. 2005].

Para el análisis dinámico se empleó el programa SAP2000 versión No lineal, con el cuál se determinaron las fuerzas sísmicas para cada nivel de cada marco estructural, así como el período fundamental de los edificios objeto de este estudio. Este programa iba a ser usado para realizar los análisis inelásticos de los marcos estructurales, pero no reunía los requisitos necesarios para llevarlos a cabo.

El análisis inelástico para la obtención de los ciclos histeréticos fue realizado con el programa DRAIN-2D.

### II.6.1 Descripción de la estructura

Las estructuras que serán analizadas para este trabajo, están destinadas a servir como oficinas, están soportadas en marcos de concreto formados por traveses y columnas, los cuales están constituidos por 2 crujeías y 3 columnas, distribuidas simétricamente en planta, estos tienen una separación de 7 m, los edificios son de 14 niveles, el primer nivel tiene una altura de 3.5 m de nivel de piso terminado a nivel de piso terminado, mientras que los restantes niveles tienen una altura de 3.0 m (figura II.6), están estructurados a base de concreto reforzado.



**Figura II.6. Características de los marcos.**

En ambas direcciones se cuenta con aberturas para ventanas, el sistema de piso es de losa maciza de 12 cm de espesor, en la losa de azotea y de 12 cm en las losas de entrepiso, debido a que no se cuentan con planos originales, para efectos de análisis sólo será utilizado un marco, cuyas propiedades ya han sido descritas anteriormente.

La estructura tiene un periodo fundamental de 1.4 s con lo cual se evitará que la estructura se acerque al periodo dominante del sismo a cada instante, y con ello se impidan grandes amplificaciones del movimiento del terreno.

Se supondrá que la estructura está ubicada en la zona III comprendida en la ciudad de México, dicha zona está formada por sedimentos de arenas y arcillas de origen volcánico altamente compresible y de baja capacidad de carga, además en dicha zona los niveles freáticos se localizan a profundidades variables entre 1.50 m y 2.0 m, siendo este otro problema de dicha zona.



### **II.6.2 Información general de los marcos estructurales**

El análisis estructural, permite a través del cumplimiento de normas, determinar las fuerzas que representan la acción sísmica sobre el edificio y qué elementos mecánicos (fuerzas normales, cortantes y momentos flexionantes) producen dichas fuerzas en cada miembro estructural de un edificio.

Algunas de las propiedades de los materiales para los elementos barra y columna, definidos para el análisis de los marcos se muestran en las tablas II.6 y II.7.

**Tabla II.6. Propiedades mecánicas del concreto.**

<b>PROPIEDADES DEL CONCRETO</b>	
Peso Volumétrico del Concreto (kg/m <sup>3</sup> )	2400
Resistencia del concreto a compresión (f' <sub>c</sub> ) (kg/cm <sup>2</sup> )	250
Módulo de elasticidad del concreto	$E = 8000\sqrt{f'_c}$
Tipo de concreto	clase II

**Tabla II.7. Propiedades mecánicas del acero.**

<b>PROPIEDADES DEL ACERO</b>	
Coefficiente de Poisson	0.3
Módulo de elasticidad del acero (kg/cm <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^6$
Esfuerzo de fluencia del acero (kg/cm <sup>2</sup> )	4200

Las anteriores, representan las propiedades más importantes de los materiales que componen la estructura principal, acero y concreto, empleadas para la obtención de los pesos volumétricos de todos los elementos que conforman los marcos estructurales, para definir a través de un análisis los pesos que actúan sobre el marco.

Adicionalmente, se realizó un análisis de cargas sobre los componentes y sus correspondientes pesos de los elementos que integran las losas de entrepiso y azotea, el cuál cubre los requerimientos del *REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL D.F.*, en la tabla II.8 se muestra este análisis.

**Tabla II.8. Tabla de análisis de carga de sistemas de entrepiso y azotea.**

<b>ANÁLISIS DE CARGAS</b>		
<b>CONCEPTO</b>	<b>PESO EN ENTREPISO (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>PESO EN AZOTEA (kg/m<sup>2</sup>)</b>
acabado	30	30
firme para piso	85	---
instalaciones	40	40
losa de concreto (12 cm)	288	288
loseta	---	23
mortero	42	42
mosaico	1	---
muros divisorios	110	---
relleno e impermeabilizantes	---	100
otros*	40	40
<b>total carga muerta (W.M.)</b>	<b>636</b>	<b>563</b>

\* Artículo 197 del Reglamento de Construcciones del D.F.

En la tabla II.9 se presenta el peso de los miembros estructurales de cada uno de los niveles, para cada uno de los conjuntos de marcos de este trabajo, así como su equivalente en masa:

**Tabla II.9. Tabla de pesos y masas.**

<b>EDIFICIO 14 NIVELES</b>		
<b>NIVEL</b>	<b>PESO (ton)</b>	<b>MASA (ton*m/s<sup>2</sup>)</b>
1	89.280	9.10
2	84.523	8.62
3	84.474	8.61
4	82.908	8.45
5	82.656	8.43
6	82.656	8.43
7	82.572	8.42
8	82.572	8.42
9	80.778	8.23
10	80.778	8.23
11	79.092	8.06
12	79.092	8.06
13	77.514	7.90
14	73.167	7.46

Es importante mencionar, que los valores de peso y masa de la tabla anterior, se obtuvieron de las fórmulas para la distribución de la carga de las losas sobre sus apoyos, contenidas en el Manual de Normas Técnicas Complementarias, [1995].

## II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS CON DISIPADORES

La seguridad de una estructura debe ser analizada en todas las combinaciones de cargas que puedan incidir sobre ella y que tengan una cierta posibilidad de ocurrencia, por ello, el Reglamento de Construcciones del DF recomienda en sus artículos 188 y 194, la verificación de tales combinaciones, por esta razón, establece los siguientes factores de carga para el análisis estructural con tales combinaciones:

- a)  $1.4(C.M. + C.V._{max})$
- b)  $1.1(C.M. + C.V._{ins}) + 1.1SISMO$
- c)  $1.1(C.M. + C.V._{ins}) - 1.1SISMO$

Los valores que propone el Reglamento de Construcciones acerca de la utilidad que tendrán estas estructuras, para los casos de Carga Viva Instantánea ( $W_a$ ) en entepiso de 180 kg/m<sup>2</sup> y en azotea 70 kg/m<sup>2</sup> y la Carga Viva Máxima ( $W_m$ ) de 250 kg/m<sup>2</sup> y 100 kg/m<sup>2</sup> en entepiso y azotea respectivamente.

Los pesos concentrados mostrados en la tabla II.10, representan la acción de las cargas antes mencionadas sobre el área tributaria de cada uno de los elementos que componen la estructura principal, también fueron obtenidas de la misma forma como lo indican las fórmulas para la distribución de cargas, del Reglamento antes citado.

**Tabla II.10. Cargas muertas, vivas instantáneas y vivas máximas en edificio de 14 niveles.**

NIVEL	CARGA MUERTA			CARGA VIVA INSTANTÁNEA			CARGA VIVA MAXIMA		
	Carga sobre columnas		Carga sobre trabes	Carga sobre columnas		Carga sobre trabes	Carga sobre columnas		Carga sobre trabes
	Columna central (ton)	Columnas laterales (ton)		Columna central (ton)	Columnas laterales (ton)		Columna central (ton)	Columnas laterales (ton)	
1	27.08	16.04	2.858	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
2	27.08	16.04	2.858	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
3	26.70	15.65	2.858	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
4	26.24	15.35	2.828	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
5	26.10	15.21	2.828	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
6	25.65	14.92	2.786	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
7	25.19	14.62	2.750	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
8	24.62	14.20	2.714	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
9	24.10	13.79	2.678	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
10	23.17	13.23	2.606	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
11	22.07	12.44	2.534	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
12	21.64	12.01	2.534	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
13	21.43	11.81	2.534	3.31	1.65	0.472	4.596	2.298	0.656
14	18.99	10.04	2.342	1.29	0.64	0.184	1.841	0.921	0.262

## II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS CON DISIPADORES

Las tablas II.11 y II.12 muestran las secciones finales que deberán contener los marcos, tales secciones se obtuvieron de forma iterativa atendiendo las variables de control y de diseño:

Tabla II.11. Secciones finales de trabes.

TRABES (cm)			
NIVEL	TADAS	U	VISCOELÁSTICOS
1	30 x 82.5	30 X 82.5	30 X 82.5
2	30 x 82.5	30 X 82.5	30 X 82.5
3	30 x 82.5	30 X 82.5	30 X 82.5
4	30 x 80	30 X 80	30 X 80
5	30 x 80	30 X 80	30 X 80
6	30 x 77.5	30 X 77.5	30 X 77.5
7	30 x 75	30 X 75	30 X 75
8	30 x 72.5	30 X 72.5	30 X 72.5
9	30 x 70	30 X 70	30 X 70
10	30 x 65	30 X 65	30 X 65
11	30 x 60	30 X 60	30 X 60
12	30 x 60	30 X 60	30 X 60
13	30 x 60	30 X 60	30 X 60
14	30 x 60	30 X 60	30 X 60
CIMENTACIÓN	32.5 X 300		

Tabla II.12. Secciones finales de columnas.

COLUMNAS (cm)			
NIVEL	TADAS	U	VISCOELÁSTICOS
1	87.5 x 87.5	87.5 X 87.5	87.5 X 87.5
2	85 x 85	85 X 85	85 X 85
3	82.5 x 82.5	82.5 X 82.5	82.5 X 82.5
4	80 x 80	80 X 80	80 X 80
5	77.5 x 77.5	77.5 X 77.5	77.5 X 77.5
6	77.5 x 77.5	77.5 X 77.5	77.5 X 77.5
7	75 x 75	75 X 75	75 X 75
8	75 x 75	75 X 75	75 X 75
9	70 x 70	70 X 70	70 X 70
10	70 x 70	70 X 70	70 X 70
11	65 x 65	65 X 65	65 X 65
12	60 x 60	60 X 60	60 X 60
13	55 x 55	55 X 55	55 X 55
14	55 x 55	55 X 55	55 X 55

## II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS CON DISIPADORES

Respecto a las condiciones a cumplir por el marco con los disipadores, las fuerzas estáticas sísmicas y los desplazamientos relativos se muestran en las siguientes gráficas, se sabe que las fuerzas sísmicas que actúan sobre cada marco y sobre cada nivel del mismo, representan la acción del sismo por fuerzas horizontales, las cuales actúan en los centros de masa de los pisos.

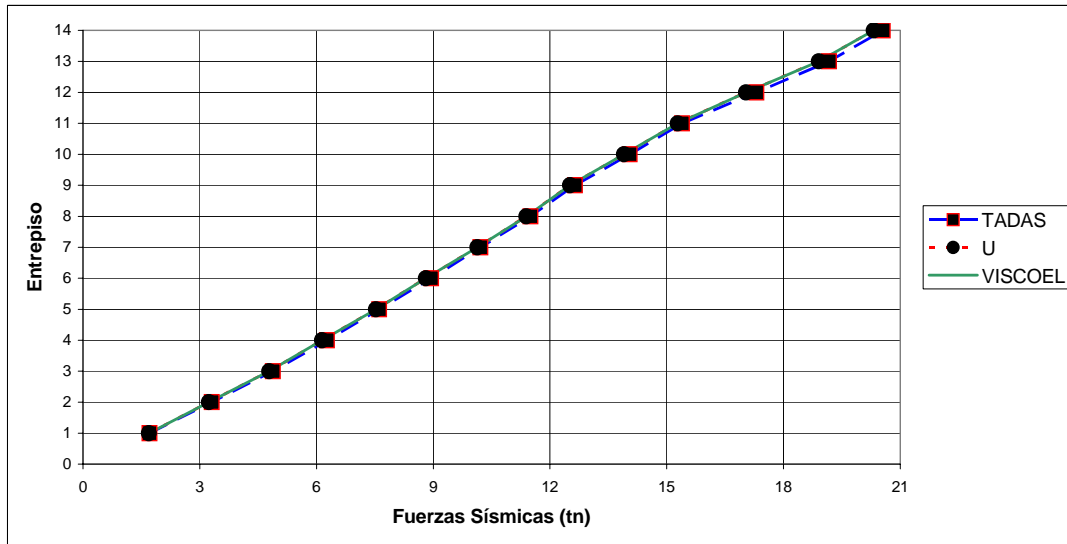


Figura II.7. Fuerzas sísmicas de los marcos.

Los desplazamientos relativos obtenidos, satisfacen la ecuación (2.13) de este capítulo, como se puede ver en la figura II.8.

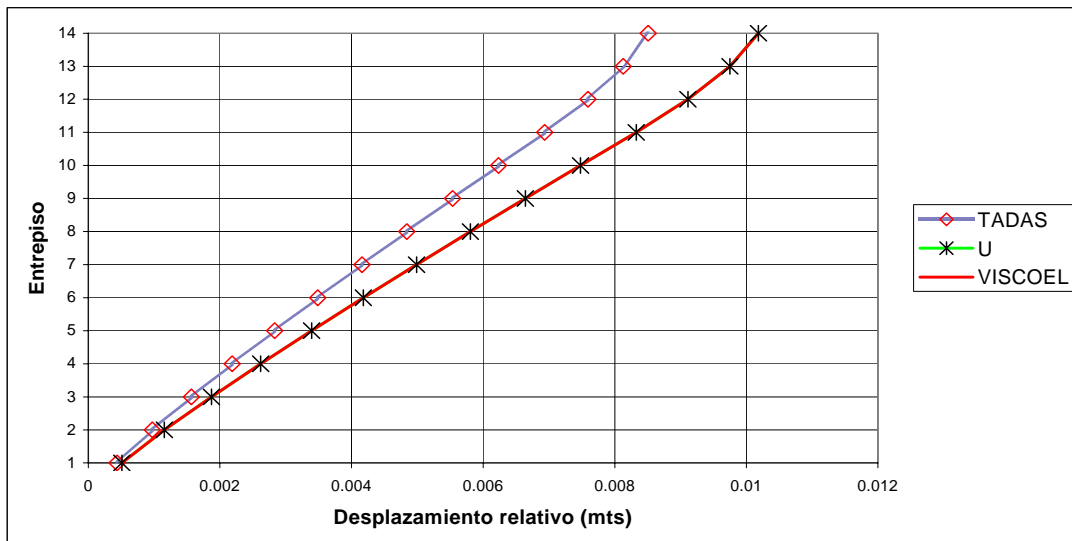


Figura II.8. Desplazamientos relativos de los marcos.

### II.6.3 Diseño de los contraventeos

Para el diseño de los contravientos del marco con disipadores de energía sísmica, se usó el Manual de Construcción en Acero del *Instituto Mexicano de la Construcción en Acero A.C.*, que en su sección 1.5 trata sobre esfuerzos permisibles que deberán cumplir los elementos componentes de una estructura, para el caso de elementos sujetos a esfuerzos de compresión deberán satisfacer la siguiente ecuación:

$$F_a = \frac{\left[ 1 - \frac{\left(\frac{KL}{R}\right)^2}{2Cc^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3\left(\frac{KL}{R}\right)}{8Cc} - \frac{\left(\frac{KL}{R}\right)^3}{8Cc^3}} \quad (2.21)$$

Esta ecuación deberá cumplirse siempre y cuando la relación  $KL/R$  sea menor a  $C_c$ , donde:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (2.22)$$

si  $KL/R$  resulta mayor que  $C_c$  entonces deberá usarse:

$$F_a = \frac{12\pi^2}{23\left(\frac{KL}{R}\right)^2} \quad (2.23)$$

de las ecuaciones anteriores, se tiene  $K$  = factor de longitud efectiva,  $L$  = longitud del miembro,  $R$  = radio de giro de la sección,  $F_y$  = esfuerzo de fluencia del acero estructural,  $E$  = módulo de elasticidad del acero.

La relación de esbeltez  $KL/R$  no deberá ser mayor a 200.

Para el caso de elementos sometidos a tensión, el esfuerzo permisible en el área efectiva no deberá exceder de

$$F_t \leq 0.60F_y \quad (2.24)$$

## II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS CON DISIPADORES

ni en el área neta efectiva de

$$F_t \leq 0.50F_u \quad (2.25)$$

La relación de esbeltez  $Kl/R$  no deberá ser mayor a 300 para los elementos a tensión.

Los valores de rigidez que se usaron, son los que están contenidos en la tabla II.2 el resto del diseño de los contraventeos por tipo de dissipador de energía, se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla II.13. Diseño de contraventeos en marco con TADAS.**

nivel	Kb (kg/cm)	P (kg)	A (cm <sup>2</sup> )	fa (kg/cm <sup>2</sup> )	L (cm)	Cc	r (cm)	KL/r	Fa (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de sección
1	227 038	20 800	45.10	461.20	467.50	128	6.55	71.37	1152.41	OR 178 x 127 x 7.9
2	167 834	17 600	27.00	651.85	436.00	128	4.42	98.643	936.95	OR 127 x 76 x 7.9
3	150 209	16 700	24.20	690.08	436.00	128	3.58	121.80	722.85	OR 102 x 72 x 7.9
4	141 584	15 900	22.80	697.37	436.00	128	3.58	121.80	722.85	OR 102 x 72 x 7.9
5	133 187	15 200	21.50	706.98	436.00	128	3.67	118.80	752.21	OR 102 x 72 x 6.4
6	126 765	14 400	20.40	705.88	436.00	128	3.67	118.80	752.21	OR 102 x 72 x 6.4
7	116 434	13 400	18.80	712.77	436.00	128	4.60	94.78	969.79	OR 127 x 76 x 4.8
8	107 278	12 400	17.30	716.76	436.00	128	4.60	94.78	969.79	OR 127 x 76 x 4.8
9	94 489	11 200	15.20	736.84	436.00	128	3.76	115.96	779.67	OR 102 x 72 x 4.8
10	83 349	10 100	13.40	746.27	436.00	128	3.81	114.44	794.17	OR 102 x 72 x 4.0
11	69 174	8 400	11.10	756.76	436.00	128	3.93	110.94	826.95	OR 102 x 72 x 3.2
12	59 283	6 700	9.50	705.26	436.00	128	3.60	121.11	729.55	OR 102 x 51 x 3.2
13	53 162	4 600	8.60	534.88	436.00	128	3.60	121.11	729.55	OR 102 x 51 x 3.2
14	46 048	2 500	7.40	337.84	436.00	128	2.78	156.83	332.73	OR 76 x 51 x 3.2

donde P = carga demandada por los contraventeos, A = área transversal de los contraventeos, fa = esfuerzo actuante, Fa = esfuerzo permisible, y L = longitud de los contraventeos.

## II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS CON DISIPADORES

La tabla II.14 representa el diseño de los contraventeos del marco dotado con dispositivos U, dicha tabla muestra las secciones definitivas de estos elementos, los cuales fueron revisados a compresión.

**Tabla II.14. Diseño de contraventeos en marco con U.**

nivel	Kb (kg/cm)	P (kg)	A (cm <sup>2</sup> )	fa (kg/cm <sup>2</sup> )	L (cm)	Cc	r (cm)	KL/r	Fa (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de sección
1	227 038	26 000	74.20	350.61	685.92	128	6.30	108.88	846.00	OR 178 x 127 x 12.7
2	167 834	18 500	53.30	340.37	667.22	128	5.23	127.58	664.39	OR 152 x 102 x 12.7
3	150 209	17 550	47.90	366.47	669.52	128	6.55	102.22	905.83	OR 178 x 127 x 7.9
4	141 584	16 980	45.30	374.60	672.31	128	6.55	102.64	902.08	OR 178 x 127 x 7.9
5	133 187	16 250	42.80	379.80	674.62	128	5.41	124.70	693.71	OR 152 x 102 x 7.9
6	126 765	15 480	40.80	379.86	675.10	128	5.41	124.79	692.81	OR 152 x 102 x 7.9
7	116 434	14 470	37.60	384.99	677.89	128	4.55	148.99	428.23	OR 127 x 102 x 9.5
8	107 278	13 390	34.70	386.39	678.37	128	4.65	145.89	464.54	OR 127 x 102 x 7.9
9	94 489	12 030	30.80	391.19	683.47	128	4.65	146.98	451.79	OR 127 x 102 x 7.9
10	83 349	10 650	27.20	392.04	684.44	128	4.72	145.01	474.68	OR 127 x 102 x 6.4
11	69 174	8 990	22.70	395.53	690.02	128	4.98	138.56	547.39	OR 152 x 51 x 6.4
12	59 283	7 100	19.60	362.08	694.62	128	4.60	151.00	404.18	OR 127 x 76 x 4.8
13	53 162	4 920	17.70	277.95	699.23	128	4.60	152.01	392.11	OR 127 x 76 x 4.8
14	46 048	2 550	15.30	166.31	699.23	128	4.32	161.86	268.68	OR 127 x 51 x 4.8

Todo el análisis y diseño de los marcos estructurales se hizo de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del DF, 1993, así como con las Normas Técnicas Complementarias de diseño en concreto.

Finalmente, la tabla II.15 representa el diseño de los contraventeos del marco con disipadores viscoelásticos.



## II. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS CON DISIPADORES

**Tabla II.15. Diseño de contraventeos en marco con viscoelásticos.**

nivel	Kb (kg/cm)	P (kg)	A (cm <sup>2</sup> )	fa (kg/cm <sup>2</sup> )	L (cm)	Cc	r (cm)	KL/r	Fa (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de sección
1	227 038	26 000	74.20	350.61	685.92	128	4.68	146.56	456.67	TR 178 x 60.8
2	167 834	18 500	53.30	340.37	667.22	128	4.54	146.96	452.00	TR 178 x 43.4
3	150 209	17 550	47.90	366.47	669.52	128	4.74	141.25	517.44	TR 178 x 35.8
4	141 584	16 980	45.30	374.60	672.31	128	4.74	141.84	510.82	TR 178 x 35.8
5	133 187	16 250	42.80	379.80	674.62	128	4.74	142.32	505.31	TR 178 x 35.8
6	126 765	15 480	40.80	379.86	675.10	128	4.71	143.33	493.87	TR 178 x 32
7	116 434	14 470	37.60	384.99	677.89	128	4.71	143.93	487.11	TR 178 x 32
8	107 278	13 390	34.70	386.39	678.37	128	4.45	152.44	386.83	TR 152 x 26.2
9	94 489	12 030	30.80	391.19	683.47	128	5.18	131.94	618.83	TR 178 x 25.3
10	83 349	10 650	27.20	392.04	684.44	128	5.24	130.62	632.79	TR 178 x 22.4
11	69 174	8 990	22.70	395.53	690.02	128	4.82	143.16	495.87	TR 152 x 16.4
12	59 283	7 100	19.60	362.08	694.62	128	4.82	144.11	484.97	TR 152 x 16.4
13	53 162	4 920	17.70	277.95	699.23	128	4.82	145.07	473.99	TR 152 x 14.1
14	46 048	2 550	15.30	166.31	699.23	128	4.87	143.58	491.06	TR 152 x 14.1

# ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE UN SISMO FUERTE

## III.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis de la respuesta sísmica de los tres sistemas estructurales con la adición de los disipadores de energía TADAS, U y Viscoelásticos, sometidos a un sismo fuerte, el cuál corresponde a la componente E-W del sismo del 19 de Septiembre de 1985 registrado en la estación SCT.

Se construyen 10 simulaciones de cada sistema con propiedades similares, para analizar probabilísticamente sus respuestas sísmicas.

Durante la aplicación de sismos moderados, una estructura se mantiene normalmente, dentro de su intervalo de comportamiento elástico lineal, pero en el caso de aplicar un sismo de magnitud fuerte sobre la estructura, se generan cambios en las propiedades dinámicas, las cuales como resultado, también alteran la respuesta y el comportamiento deja de ser lineal, la rigidez tiende a disminuir y el amortiguamiento a aumentar.

El índice de daño global se define como el indicador que está relacionado con la reducción de la confiabilidad de la estructura, como base para decidir sobre el momento de reparación de la misma [Campos y Esteva. 1998].

Dada la importancia de la definición del índice de daño global de la estructura, se presenta la manera de obtenerlos y de cómo se obtiene el índice de confiabilidad asociado.

El índice de daño global para la estructura está definido por:

$$D_k = \max\{D_{ki}; i = 1, \dots, n\} \quad (3.1)$$

donde  $D_{ki}$  es la pérdida de rigidez lateral del  $i$ -ésimo entrepiso, además  $K_i$  y  $K_{fi}$  están definidas como las rigideces laterales tangente inicial y secante del entrepiso  $i$  para la máxima amplitud de la deformación de entrepiso durante el movimiento, re escribiendo la ecuación (3.1), se tiene:

$$D_{ki} = \frac{K_i - K_{fi}}{K_i} \quad 0 \leq D_{ki} \leq 1 \quad (3.2)$$

De estas ecuaciones, si  $D_k$  y  $D_{ki}$  logran valores igual a 1, entonces se alcanzará la falla de la estructura bajo la acción de un sismo dado.  $D_k$  puede variar entre 0 y 1. La siguiente expresión asocia la probabilidad de daño de una estructura:

$$p_o + \int_0^1 f_D(d) dd + p_1 = 1 \quad (3.3)$$

Se tiene otra variable  $Q$ , la cual se relaciona con  $D_k$ , de tal forma que

$$D_k = 0 \quad \text{si } Q \leq 0 \quad (3.4)$$

$$D_k = Q \quad \text{si } 0 < Q < 1 \quad (3.5)$$

$$D_k = 1 \quad \text{si } Q \geq 1 \quad (3.6)$$

De la ecuación (3.3), si  $P_o = 0$  la probabilidad de daño es nulo, y si  $P_1 = 1$  la probabilidad de daño es total (colapso), esto es:

$$F_Q(u) = P[Q \leq u] \quad (3.7)$$

para ello

$$p_o = F_Q(0) \quad (3.8)$$

$$p_1 = 1 - F_Q(1) \quad (3.9)$$

$$f_{Dk}(d) = f_Q(d) \quad \text{para } 0 < D = Q < 1 \quad (3.10)$$

La falla se presenta si  $Q > 1$ , para determinar el índice de seguridad, es muy importante obtener una expresión para el margen de seguridad  $Z$ , de tal forma que la falla está condicionada para  $Z < 0$ , esto se logra si:  $Z = 1 - Q$ , entonces la condición de  $Q > 1$  corresponde a la condición  $Z < 0$ .

Designando como  $m_Q, m_z, \sigma_Q$  y  $\sigma_z$  las medias y desviaciones estándar de  $Q$  y  $Z$  respectivamente, entonces el índice de seguridad ( $\beta$ ) está dado como sigue, donde  $m_z = 1 - m_Q$ :

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} \quad (3.11)$$

Es decir que la probabilidad de falla está dada por :

$$Pf = P[Z < 0] \quad (3.12)$$

y puede ser estimado mediante la función de distribución normal, empleando el índice de confiabilidad de la ecuación 3.11, como:

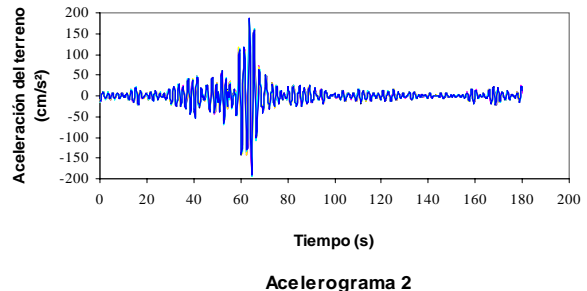
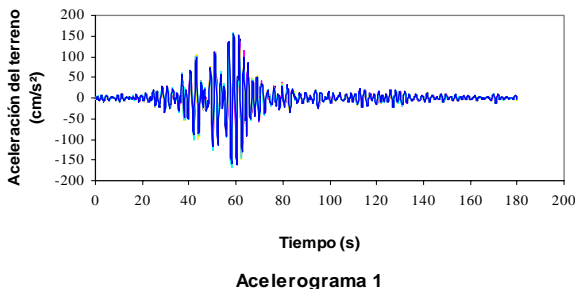
$$Pf = \Phi[-\beta] \quad (3.13)$$

El comportamiento no lineal en una estructura está asociado directamente al daño que ésta puede experimentar, por lo tanto, la idea central de este capítulo es determinar de los sistemas estructurales estudiados dotados con los disipadores analizados en este trabajo, cuál de ellos tiene una mejor respuesta sísmica (menos daño) ante un sismo fuerte, y finalmente un índice de confiabilidad alto.

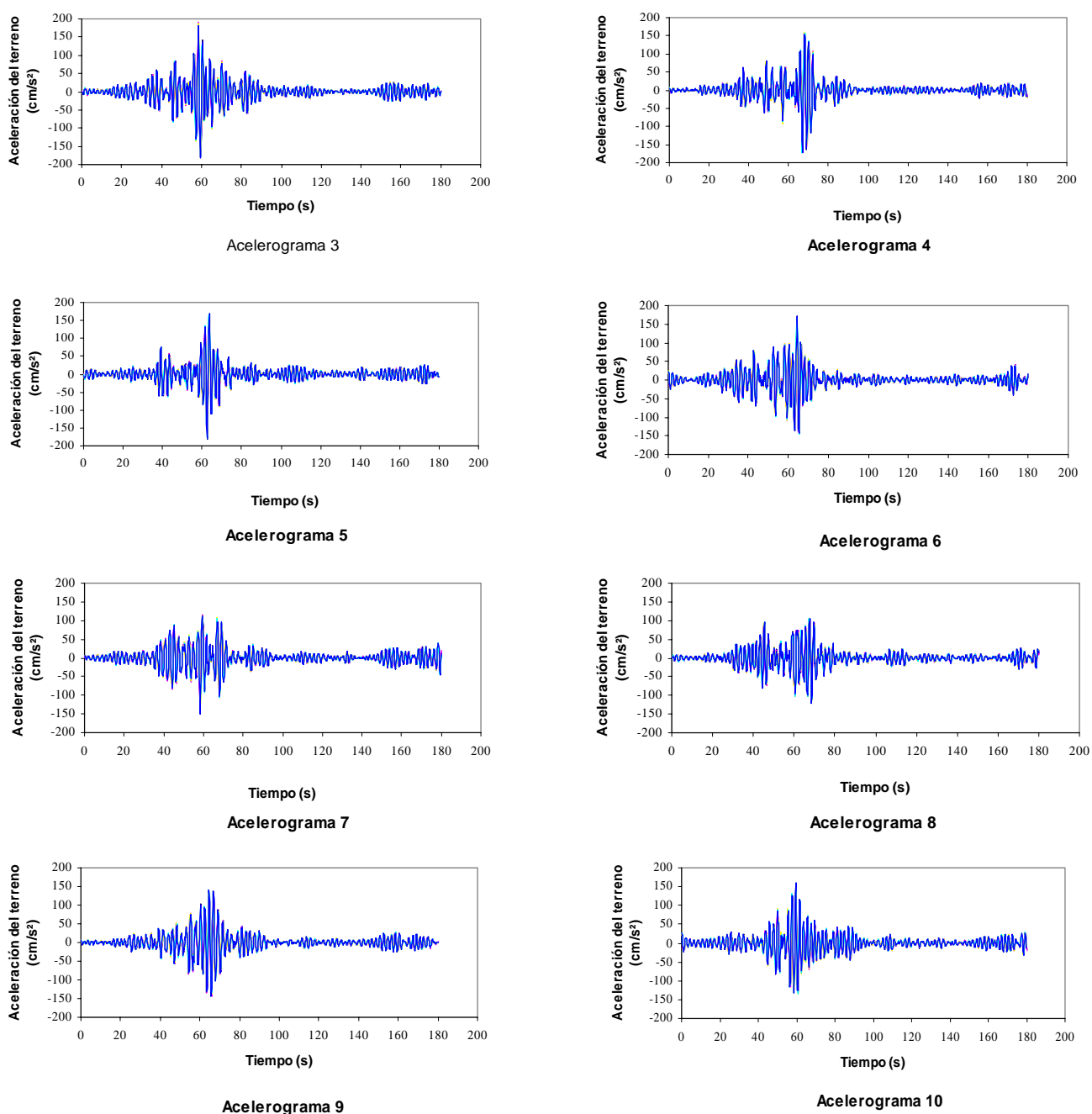
El deterioro de los elementos estructurales, tiene una relación directa con cada uno de sus índices de daño, por ello las decisiones de reparación o reemplazo deben realizarse sobre cada elemento dañado, y es conveniente establecer parámetros que relacionen la reducción de la confiabilidad estructural, como fundamento para tomar la decisión acerca del momento de reparación de cualquier elemento estructural dañado.

El siguiente grupo de gráficos corresponde a los acelerogramas simulados [Alamilla. 1996] empleados para la excitación de los sistemas estructurales.

Cada uno de estos registros corresponde a la aplicación de cada una de las 10 simulaciones que fueron diseñadas, para la obtención de la respuesta sísmica.



### III. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE UN SISMO FUERTE



**Figura III.1. Conjunto de acelerogramas.**

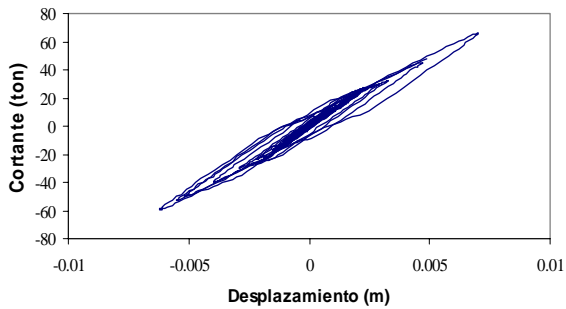
Este grupo de sismos contienen características muy variadas, la duración de cada sismo simulado es similar.

Se aprecia que la mayor parte de estos sismos presentan períodos dominantes muy largos.

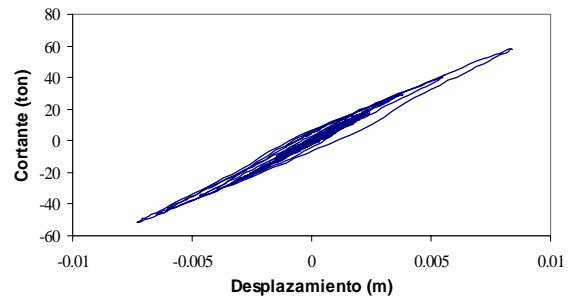
La mayoría de éstos sismos tienen una aceleración máxima extraordinariamente elevada, el movimiento que generan este tipo de señales sísmicas es poco severo para estructuras rígidas (de período corto), pero es altamente peligroso para estructuras muy altas y flexibles que tienen períodos naturales de vibración muy altos.

### III.2 Comportamiento sísmico de marco de concreto con TADAS

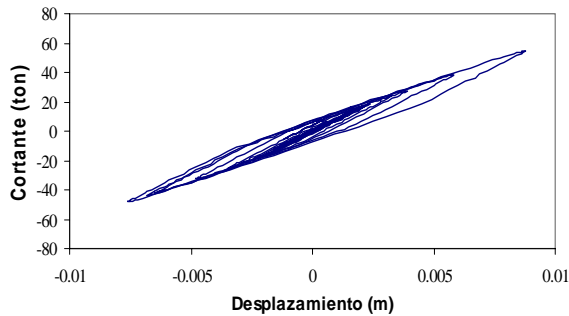
Se presentan los ciclos histeréticos que representan la respuesta sísmica de cada entrepiso para una simulación de las 10 construidas (realización 6 y acelerograma 6) con disipadores TADAS.



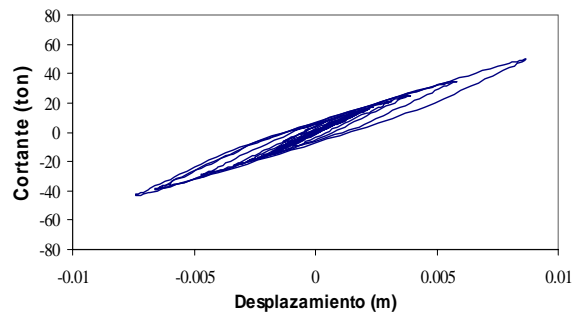
Tadas, entpiso 1, realización 6, acelerograma 6



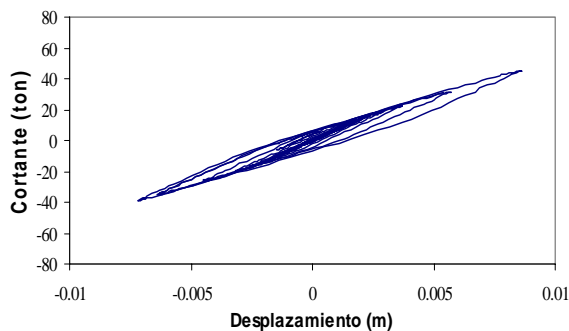
Tadas, entpiso 2, realización 6, acelerograma 6



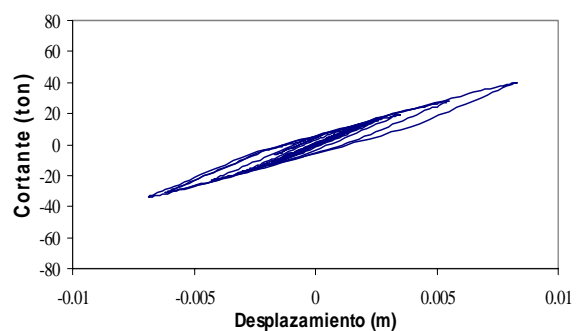
Tadas, entpiso 3, realización 6, acelerograma 6



Tadas, entpiso 4, realización 6, acelerograma 6

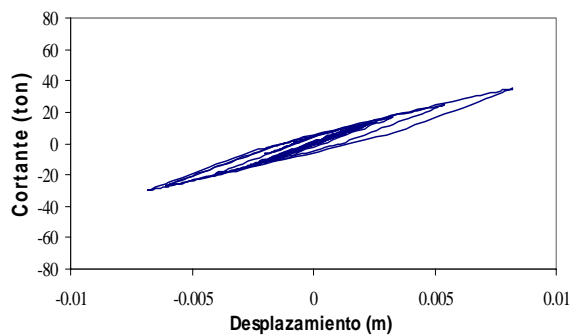


Tadas, entpiso 5, realización 6, acelerograma 6

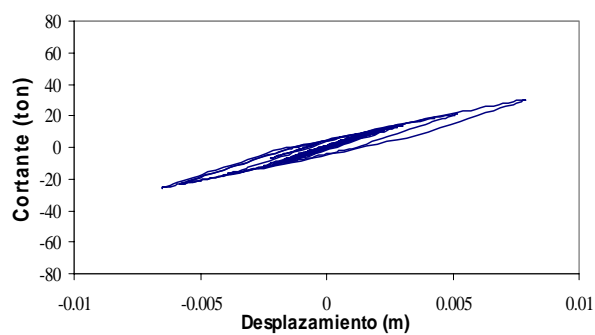


Tadas, entpiso 6, realización 6, acelerograma 6

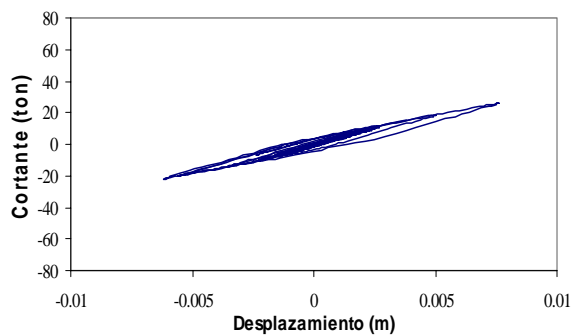
### III. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE UN SISMO FUERTE



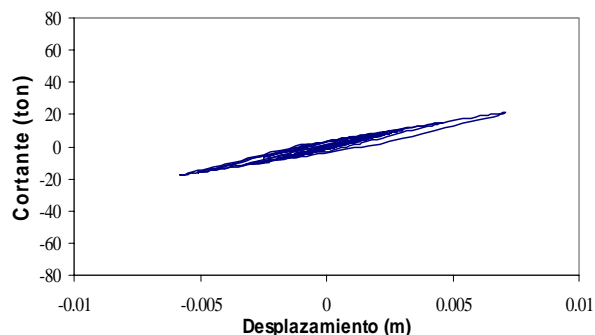
Tadas, entrepiso 7, realización 6, acelerograma 6



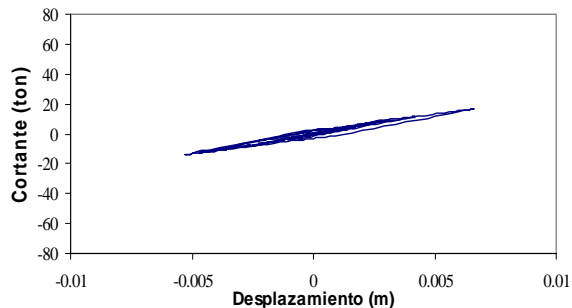
Tadas, entrepiso 8, realización 6, acelerograma 6



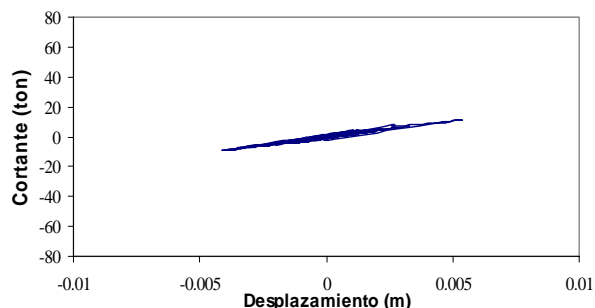
Tadas, entrepiso 9, realización 6, acelerograma 6



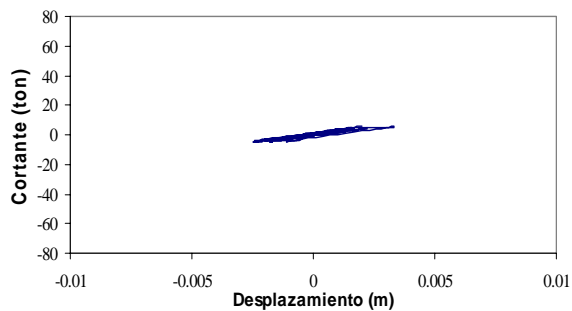
Tadas, entrepiso 10, realización 6, acelerograma 6



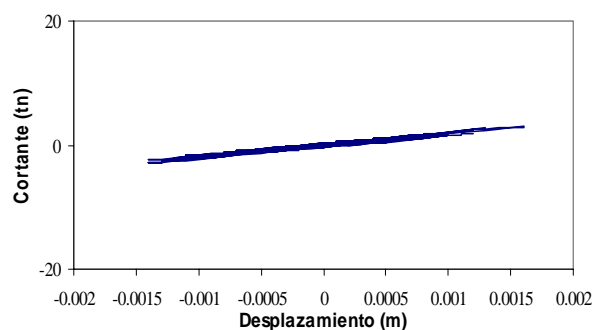
Tadas, entrepiso 11, realización 6, acelerograma 6



Tadas, entrepiso 12, realización 6, acelerograma 6



Tadas, entrepiso 13, realización 6, acelerograma 6



Tadas, entrepiso 14, realización 6, acelerograma 6

Figura III.2. Ciclos histeréticos en entrepisos de marco con TADAS.

Respecto a la respuesta sísmica mostrada en las gráficas anteriores, se sabe que el área incluida dentro de los lazos histeréticos representa la capacidad de disipación de energía de la estructura y se puede apreciar, que los primeros 12 niveles de este marco, muestran un comportamiento estable con ciclos sucesivos.

Mientras que los 2 niveles restantes, tienen un área reducida dentro de los ciclos, que se traduce en una menor capacidad de disipación de energía y un deterioro progresivo en la resistencia, que será afectada para futuros eventos sísmicos.

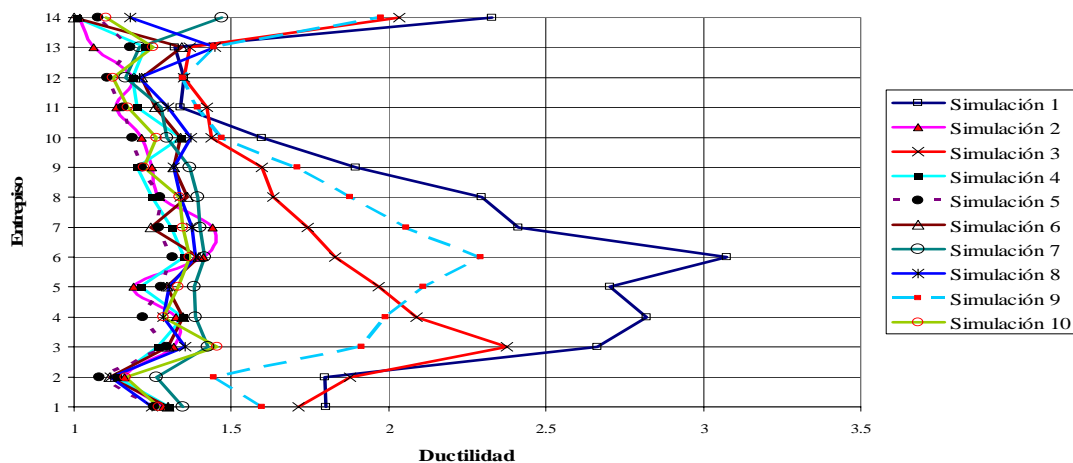


Figura III.3. Demanda de ductilidad para el marco con TADAS.

La figura III.3 muestra las 10 simulaciones del marco de concreto con propiedades similares, y dotadas con disipadores tipo TADAS, cada una de las curvas representa la demanda de ductilidad de tales sistemas, ante la excitación de un sismo de gran magnitud.

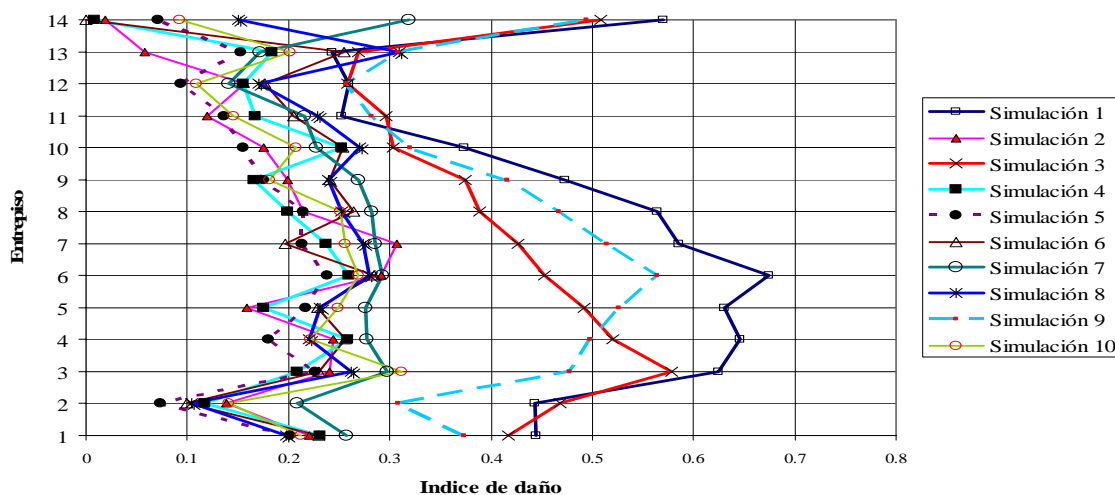


Figura III.4. Índice de daño para el marco con TADAS.

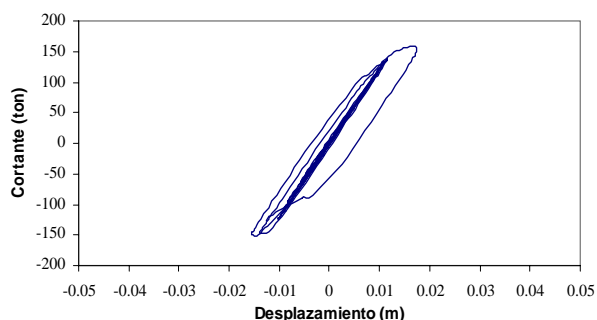


La figura III.4 presenta el índice de daño desarrollado por los marcos de concreto con disipadores TADAS.

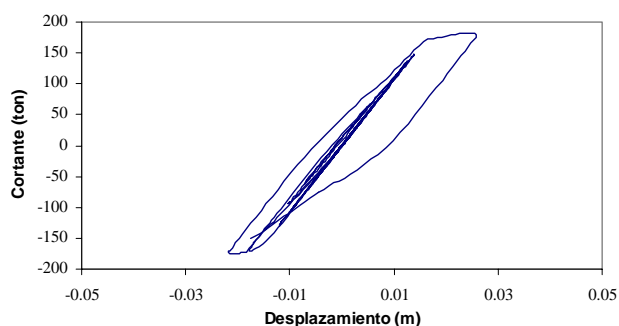
De la figura que asocia las ductilidades, la simulación 1, en el entrepiso 6, se desarrolló la mayor demanda de ductilidad que fue de 3.076, mientras que en la gráfica que muestra los índices de daño, la simulación 1 también logró el mayor índice de daño en el entrepiso 6, con un valor de 0.6749 (figura III.4).

### III.3 Comportamiento sísmico de marco de concreto con U

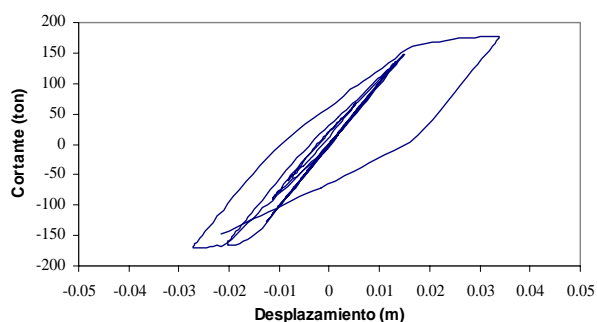
Las siguientes figuras muestran los ciclos histeréticos de los entrepisos que conforman una de las 10 simulaciones (realización 1, acelerograma 1) modelados con disipadores U.



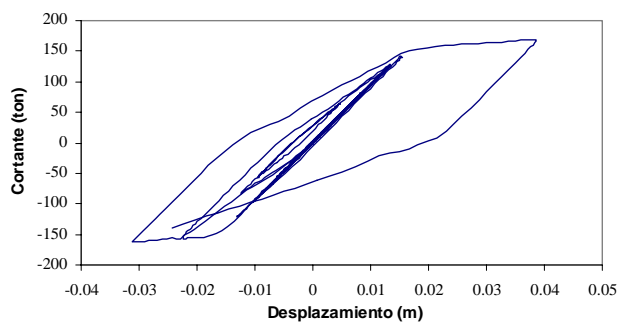
U, entrepiso 1, realización 1, acelerograma 1



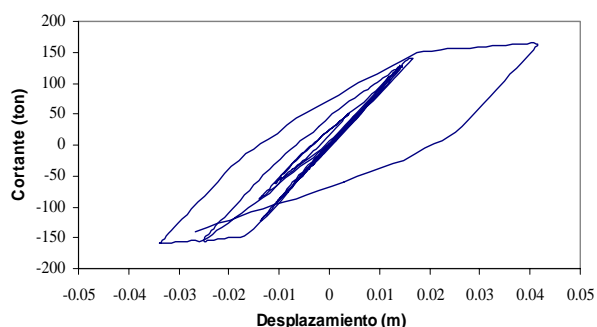
U, entrepiso 2, realización 1, acelerograma 1



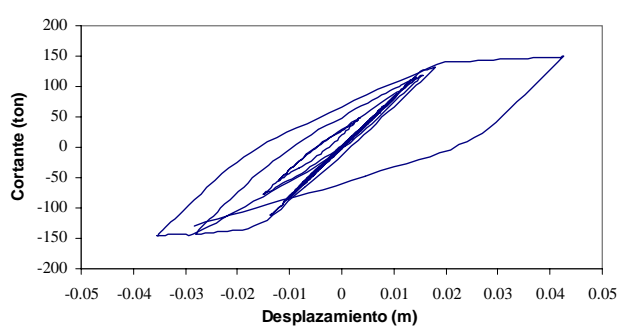
U, entrepiso 3, realización 1, acelerograma 1



U, entrepiso 4, realización 1, acelerograma 1



U, entrepiso 5, realización 1, acelerograma 1



U, entrepiso 6, realización 1, acelerograma 1

### III. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE UN SISMO FUERTE

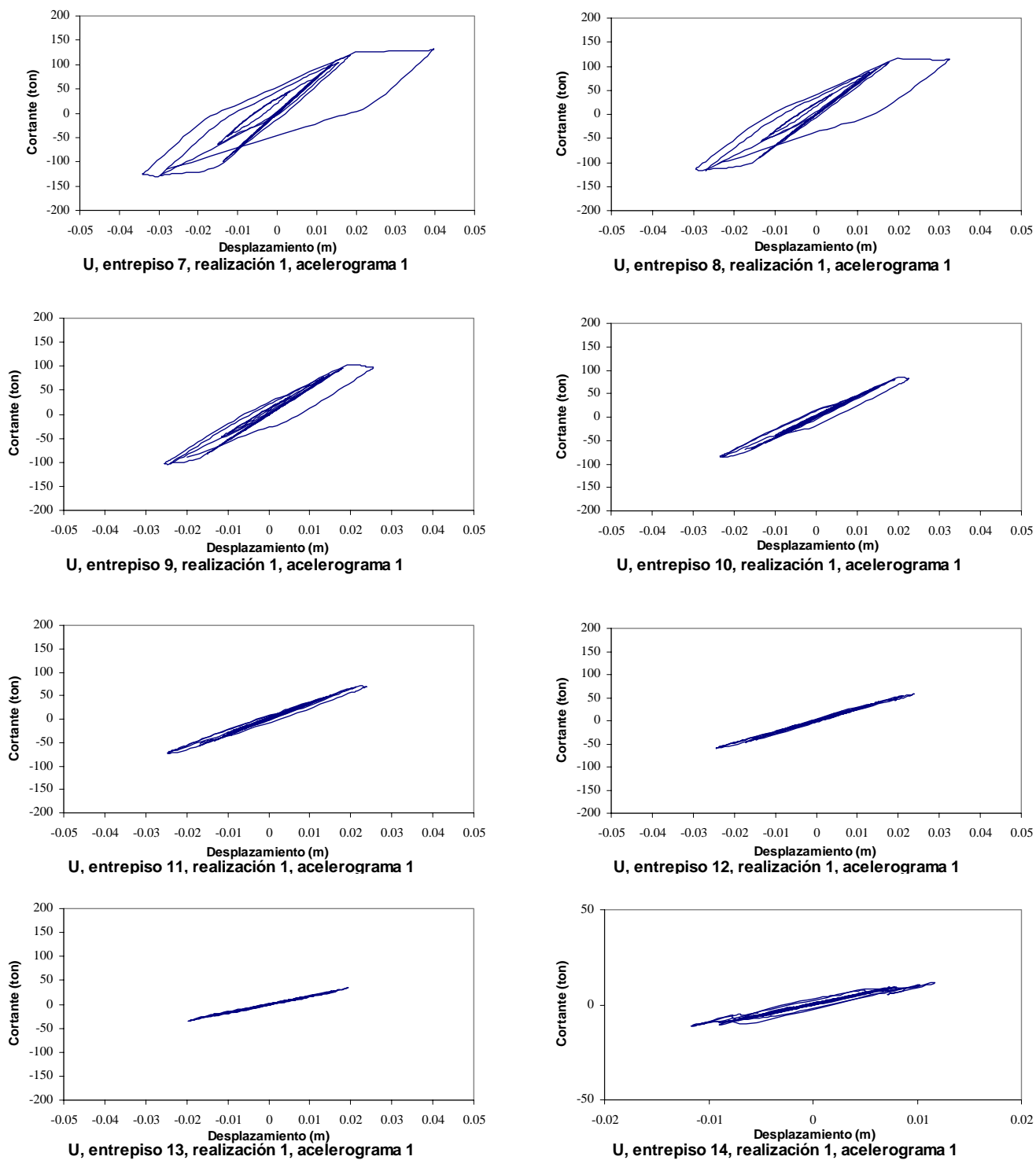


Figura III.5. Ciclos histeréticos en entrepisos de marco con U.

Cada uno de estos ciclos histeréticos, tiene una gran capacidad de disipación de energía, el área bajo la curva es muy grande desde el entrepiso 1 hasta el 10, el 11 y 12 tienen una menor capacidad de disipación respecto a los que le preceden, y por último los entrepisos 13 y 14 tienen un área mas reducida que cualquiera de los entrepisos anteriores, lo cuál afecta la resistencia de esos entrepisos del marco.

La siguiente figura, exhibe el comportamiento de ductilidad de cada una de las 10 simulaciones modeladas con disipadores tipo solera, en donde cada una de ellas fue sometida a un acelerograma (figura III.6).

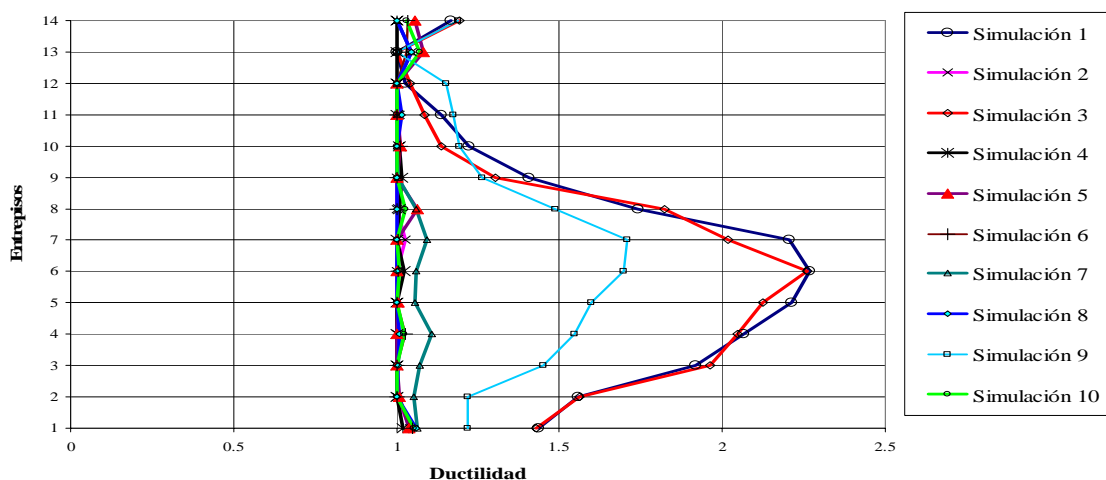


Figura III.6. Demanda de ductilidad para el marco con U.

Las curvas de demanda de ductilidad para el marco de concreto con disipadores tipo U, indican que la curva de mayor demanda, se presentó en el entrepiso 6 de las simulaciones número 1 y 3, las cuales tuvieron un valor de 2.268, y hubo varias curvas que tuvieron una demanda mínima de valor 1 para varios entrepisos.

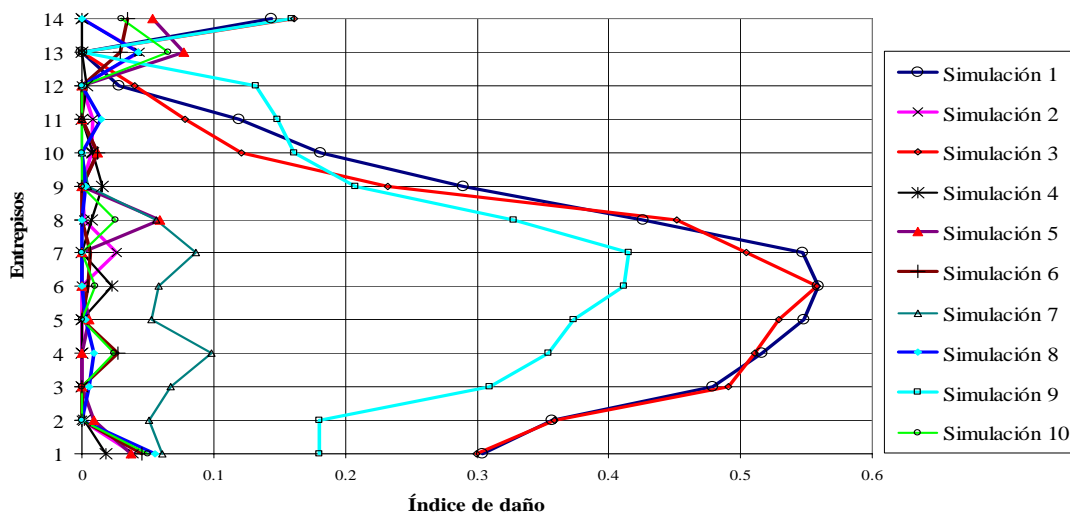


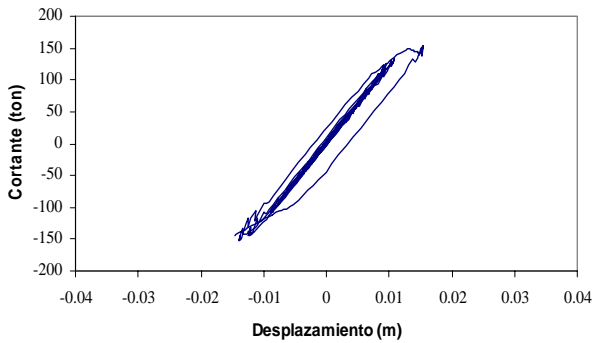
Figura III.7. Índice de daño para el marco con U.

La siguiente figura (III.7) muestra el índice de daño para las simulaciones del marco de concreto con disipadores U.

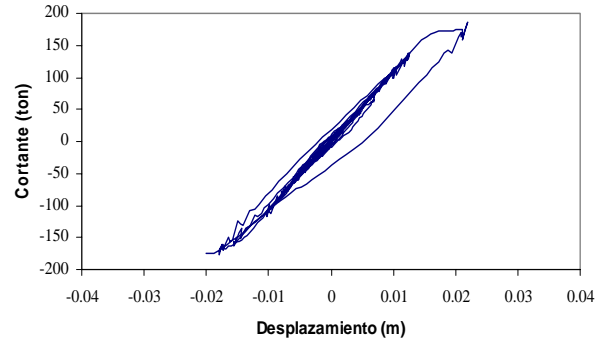
Analizando las curvas de la gráfica anterior, se observa que las curvas de las simulaciones que más se dañaron fueron la simulación 1, y la simulación 3, ambas registraron un valor de daño de 0.5590.

### III.4 Comportamiento sísmico de marco de concreto con viscoelásticos

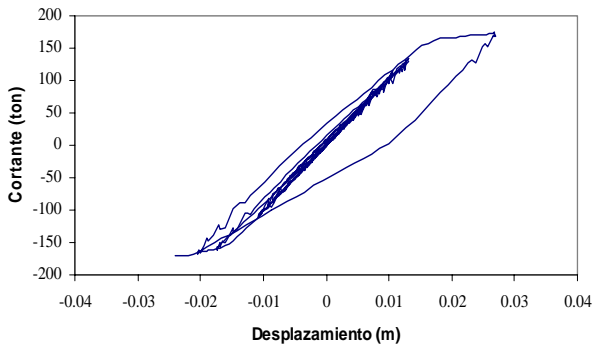
Las siguientes figuras representan los lazos histeréticos de cada uno de los entrepisos de una simulación elegida aleatoriamente (realización 1, acelerograma 1) con disipadores tipo VE.



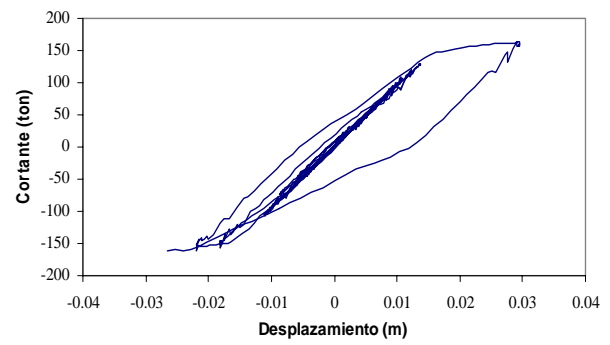
VE, entrepiso 1, realización 1, acelerograma 1



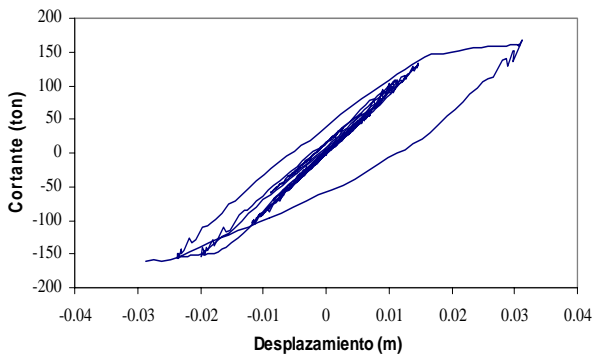
VE, entrepiso 2, realización 1, acelerograma 1



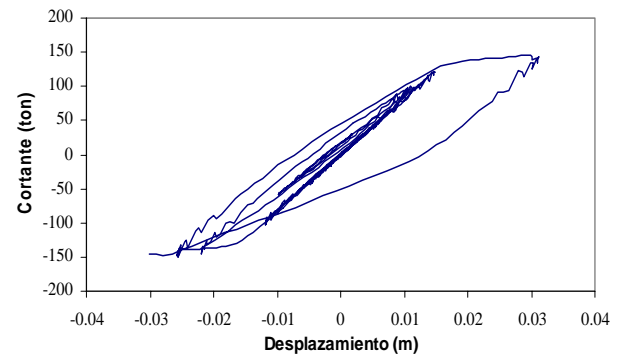
VE, entrepiso 3, realización 1, acelerograma 1



VE, entrepiso 4, realización 1, acelerograma 1

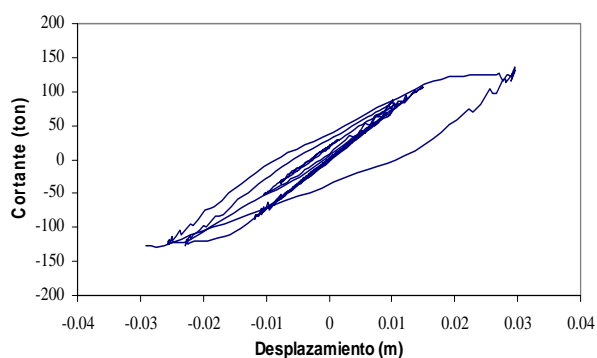


VE, entrepiso 5, realización 1, acelerograma 1

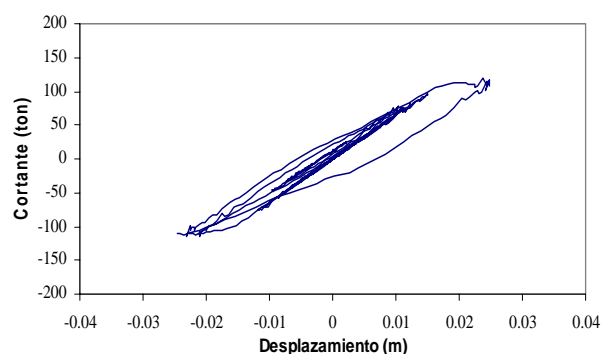


VE, entrepiso 6, realización 1, acelerograma 1

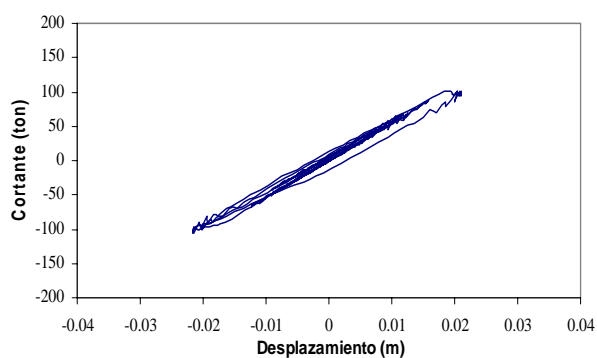
### III. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE UN SISMO FUERTE



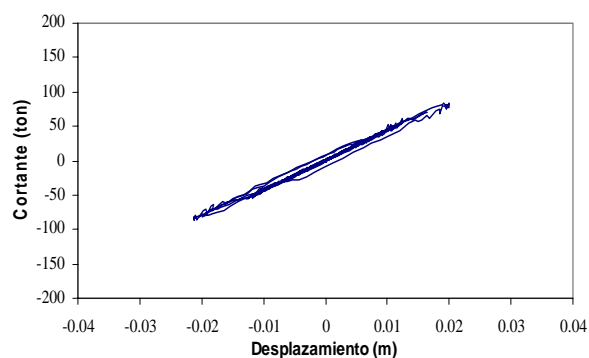
VE, entepiso 7, realización 1, acelerograma 1



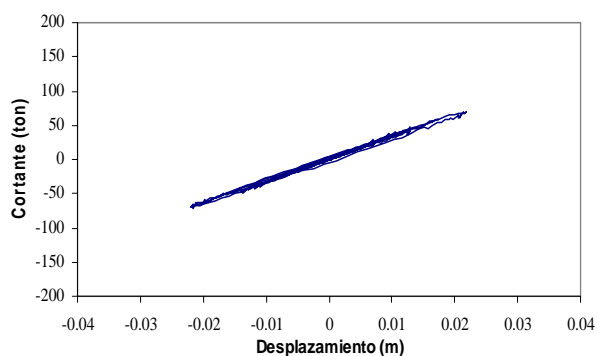
VE, entepiso 8, realización 1, acelerograma 1



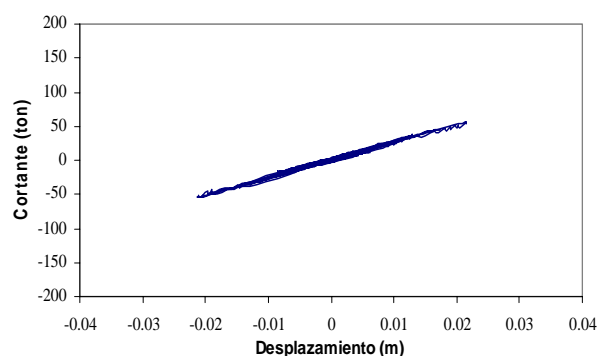
VE, entepiso 9, realización 1, acelerograma 1



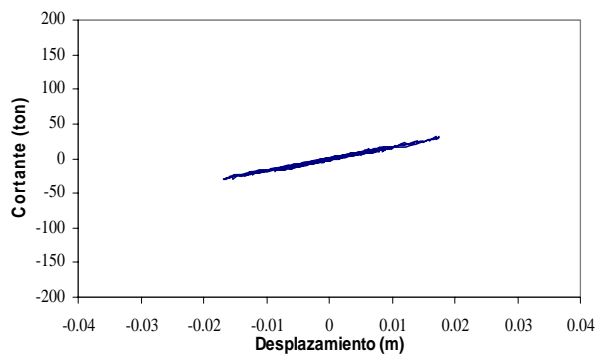
VE, entepiso 10, realización 1, acelerograma 1



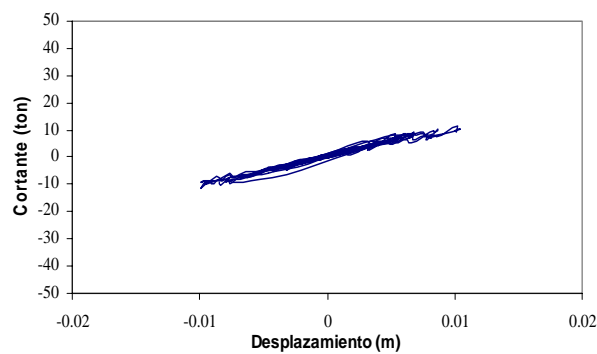
VE, entepiso 11, realización 1, acelerograma 1



VE, entepiso 12, realización 1, acelerograma 1



VE, entepiso 13, realización 1, acelerograma 1



VE, entepiso 14, realización 1, acelerograma 1

Figura III.8. Ciclos histeréticos en entepisos de marco con VE.

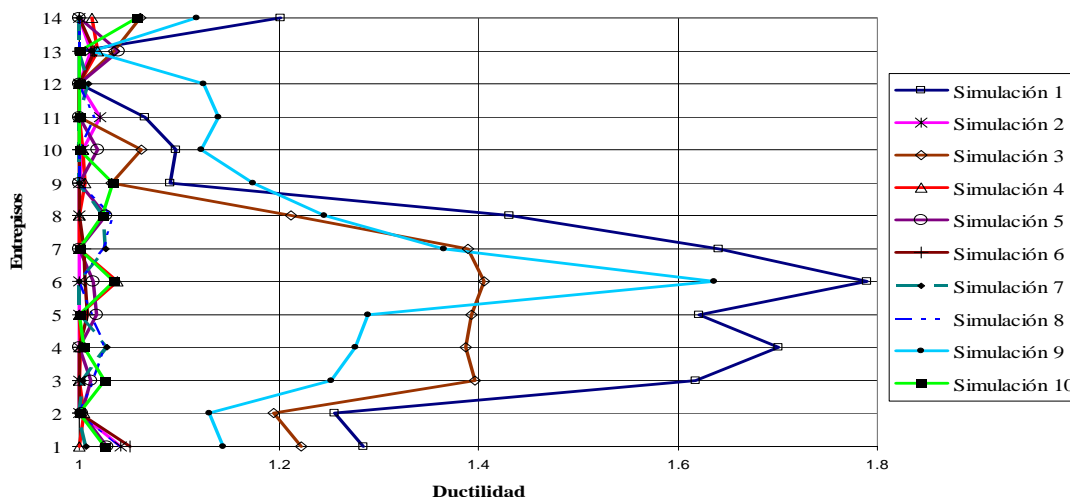


Figura III.9. Demanda de ductilidad para el marco con VE.

Las curvas de demanda de ductilidad de la figura III.9, corresponden a los valores de máximo deterioro para cada entrepiso de las 10 simulaciones del marco de concreto con disipadores viscoelásticos, sometidos a una aceleración simulada.

Se aprecia que la simulación número 1, obtuvo el valor más alto de ductilidad de 1.79 logrado en el entrepiso 6.

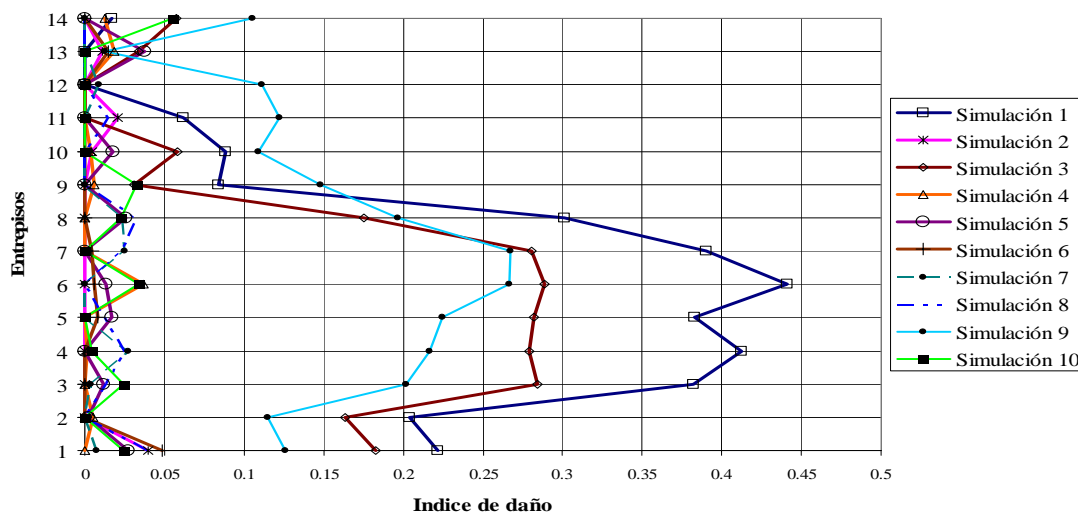


Figura III.10. Índice de daño para el marco con VE.

El índice de daño que se observa en la figura III.10 pertenece a las simulaciones de los marcos con disipadores VE, en ella se ve, que la simulación 1, entrepiso 6 tiene el valor más alto de confiabilidad, el cuál es de 0.4412, las curvas que representan las simulaciones 1,2 y 4 tuvieron un nivel alto de confiabilidad, mientras que el resto de los conjuntos estructurales, tuvieron un comportamiento semejante.

Comparando los gráficos anteriores, se puede apreciar, que de los 3 tipos de marcos estudiados, los modelados con disipadores tipo VE fueron los que tuvieron un mejor desempeño ante la aplicación del sismo fuerte, los resultados indican que hay una uniformidad del comportamiento de cada entrepiso de este marco.

Tabla III.1. Tabla de daños globales  $D_k$ .

Simulación	Respuestas		
	$D_k$ Marco TADAS	$D_k$ Marco U	$D_k$ Marco VE
1	0.674886	0.559043	0.441199
2	0.306526	0.043969	0.039684
3	0.578864	0.557897	0.288739
4	0.259563	0.023161	0.036451
5	0.238008	0.077473	0.037515
6	0.284323	0.045684	0.048922
7	0.318692	0.098549	0.027301
8	0.308886	0.055433	0.039885
9	0.563965	0.415096	0.267334
10	0.312284	0.065129	0.055225
<b>Promedio <math>mQ</math></b>	0.384600	0.184289	0.128189
<b>Var (Q)</b>	0.024751	0.049639	0.021915
<b>Desviación <math>\sigma Q</math></b>	0.157325	0.222798	0.148036
<b><math>mZ = 1 - mQ</math></b>	0.615400	0.815712	0.871811
<b><math>\sigma Z = \sigma Q</math></b>	0.157325	0.222798	0.148036
<b><math>\beta = mZ / \sigma Z</math></b>	3.911648	3.661211	5.889167
<b>P(f)</b>	$4.59 \times 10^{-5}$	$1.26 \times 10^{-4}$	$1.94 \times 10^{-9}$

La tabla III.1 presenta los valores del índice de daño global obtenidos de las 10 simulaciones construidas a partir de los 3 marcos estructurales con su respectivo dispositivo disipador.

Hay 3 columnas que muestran los valores que representan los daños globales máximos de cada simulación, puede apreciarse en esta tabla, que los valores fueron mayores en las primeras simulaciones y menores en las simulaciones medias.

En el caso de las simulaciones para el marco de concreto con TADAS, se observa que los valores que representan el índice de daño tuvieron muy poca variación, el valor mas grande fue de 0.674886 en la simulación 1 y el valor más pequeño de 0.238008 en la simulación 5.

Analizando los valores de las simulaciones del marco con dispositivos U, si hubo una mayor variación con respecto a los sistemas antes mencionados, en la simulación 1 se presentó el valor más grande de 0.559043, mientras que en la simulación 4 se obtuvo el valor más pequeño de las 10 simulaciones y fue de 0.023161.

Finalmente, de las simulaciones construidas para el marco de concreto con VE, se dio una variación de los índices de daño máximo, sin embargo en la mayoría de las simulaciones prevaleció un valor pequeño, la simulación 1 presentó el valor mayor de 0.441199 y la simulación 7 el menor de 0.027301.

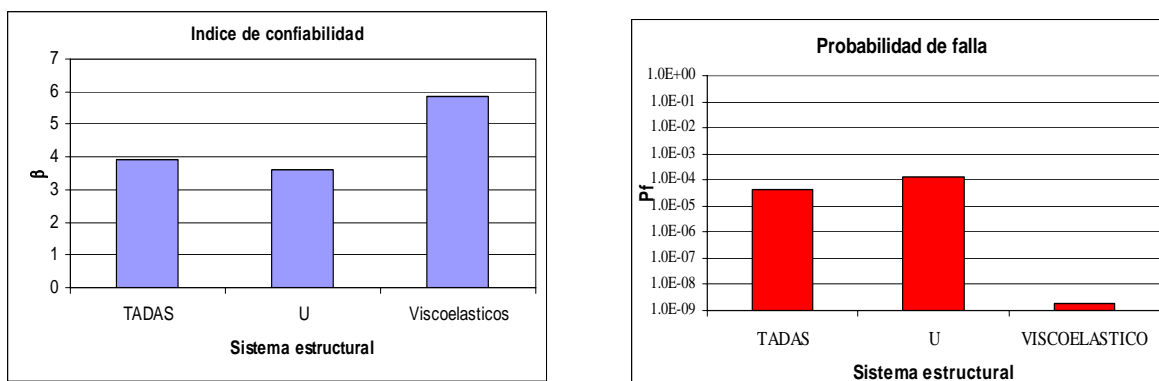
Adicionalmente, se indican el promedio, la varianza y la desviación estándar de las 10 simulaciones construidas. De los valores, se observa cómo éstos van determinado la tendencia entre los marcos estructurales, el deterioro en sus propiedades.

Los parámetros  $m_Z$  y  $\sigma_Z$  de la misma tabla, y que se asocian con el índice de confiabilidad, permite ver claramente entre los sistemas estructurales, cuál de ellos tendrá mayor confiabilidad.

Al principio de este capítulo se mencionaba la condición de reducción en la confiabilidad de un sistema estructural, para ello se consideró que el parámetro que relaciona el índice de daño debería fluctuar entre 0 y 1, valores mayores a 1 se considera que la estructura se colapsa o esta cerca de hacerlo, todos los valores que se obtuvieron de las simulaciones en la tabla III.1 están entre 0 y 1, por lo que se consideran sistemas seguros.



De los resultados obtenidos, respecto al índice de confiabilidad de los sistemas estudiados, se puede observar en la figura III.11, que el conjunto estructural que tuvo el mayor índice fue el marco de concreto con disipadores viscoelásticos y el que consiguió un menor índice fue el sistema con TADAS.



**Figura III.11. Índice de confiabilidad y probabilidad de falla de marcos con diferentes tipos de disipadores de energía.**

De la probabilidad de falla de estos sistemas, se observa que el sistema estructural con U al resultar tener un menor índice de confiabilidad entre estos sistemas estudiados, tuvo la mayor probabilidad de falla. El sistema con VE presentó un mayor índice de confiabilidad y en conclusión tuvo la menor probabilidad de falla.

En conclusión, de acuerdo a las condiciones de alta sismicidad de la zona de la ciudad de México, el marco estructural dotado con disipadores de energía sísmica, sometido a un sismo de gran magnitud como el registrado el 19 de Septiembre de 1985, que tuvo el mayor índice de confiabilidad, lo cual se traduce en una menor pérdida de rigidez fue el sistema con disipadores VE.

Por lo tanto se propone este sistema, de los 3 estudiados en este trabajo, para ser aplicado en la ciudad de México.

## CAPÍTULO IV

# ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE HISTORIAS DE SISMOS SIN MANTENIMIENTO

### IV.1 Introducción

El estudio en esta sección, consiste en estudiar la respuesta estructural de los marcos de concreto dotados con tres tipos diferentes de disipadores de energía sísmica sometidos ante un grupo de historias de sismos, correspondientes a un intervalo de cien años, y de acuerdo al peligro sísmico de la zona de estudio [Esteva *et al.* 1988]. En éstos análisis no se considera el mantenimiento de las estructuras, por lo tanto los daños se irán acumulando con cada evento sísmico.

Debido a que se han considerado 5 historias de sismos, y cada historia está formada por una cantidad variable de sismos, se construyen igual cantidad de simulaciones para ser sometidas a igual cantidad de sismos en cada historia, esto es, 29 simulaciones con propiedades similares.

Con este trabajo, se espera que la respuesta estructural de los marcos simulados sea obtenida en términos de daños sufridos, desplazamientos, demandas de ductilidad y finalmente en índices de confiabilidad.

En este trabajo no se considera el mantenimiento de las estructuras a largo plazo, con el objetivo de ver las tendencias de comportamiento a ese plazo.

Como ya se mencionó anteriormente, un marco fue elegido para ser usado en 5 simulaciones, y en cada una de ellas fué sometido a una historia de temblores diferente, que en total abarcan 100 años, y cada intensidad encontrada representa la aceleración espectral máxima que corresponde a un acelerograma simulado [Alamilla. 1996].

En seguida se muestran todos los sismos correspondientes a las cinco historias, en la primera se presentan 7 sismos.

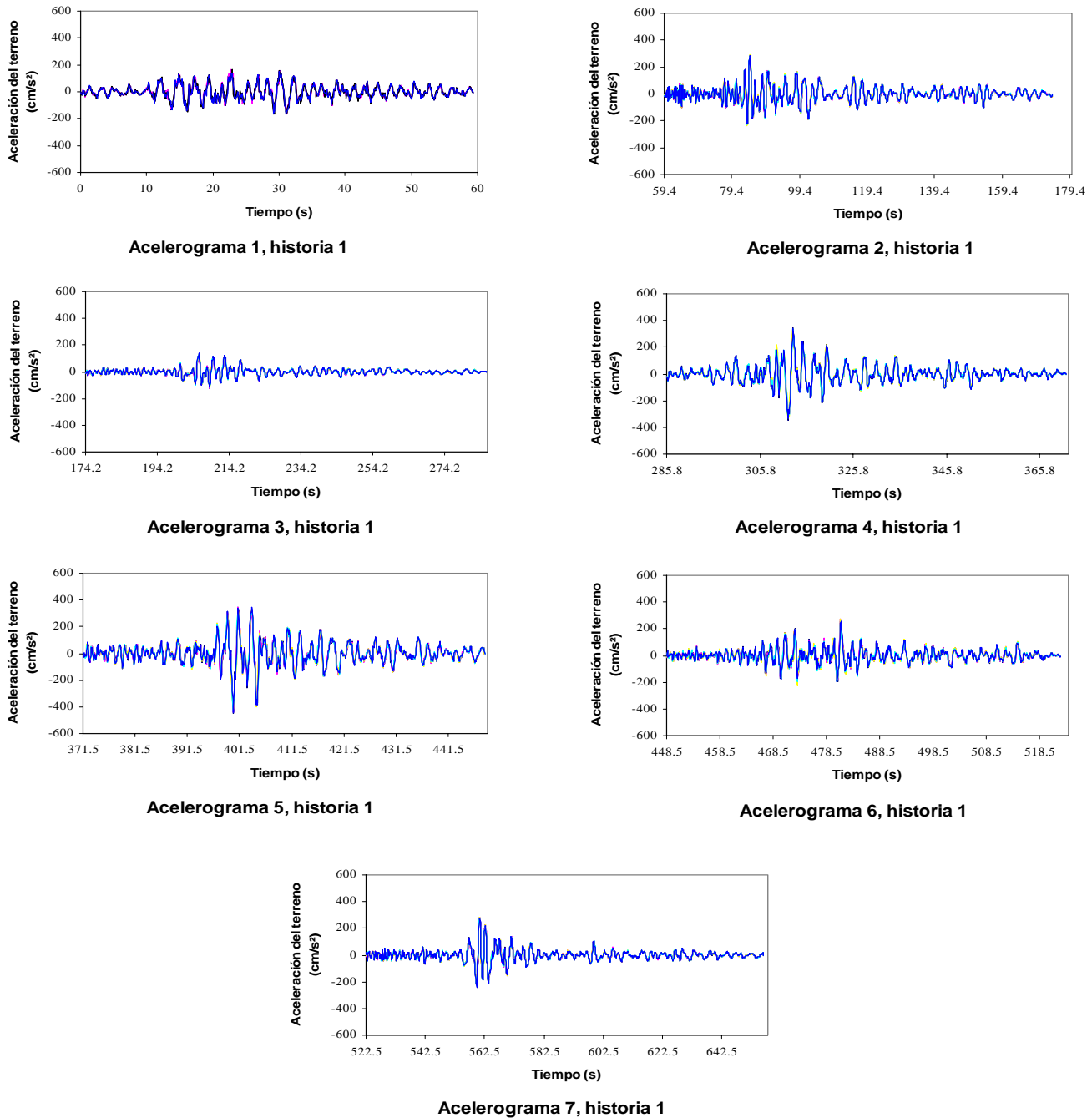
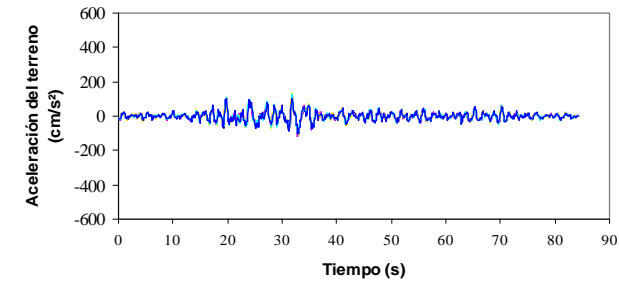
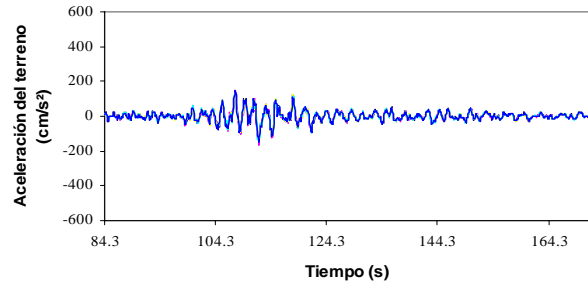


Figura IV.1. Historia de sismos núm. 1.

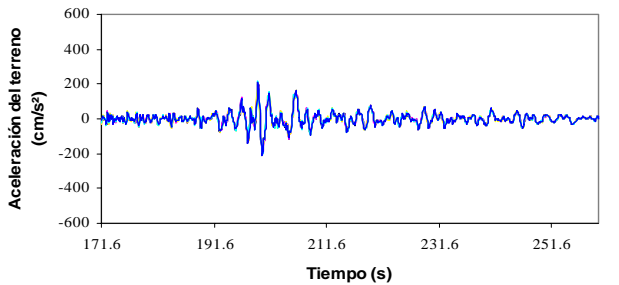
La historia de sismos número 2 está compuesta de 7 acelerogramas simulados que a continuación se muestran:



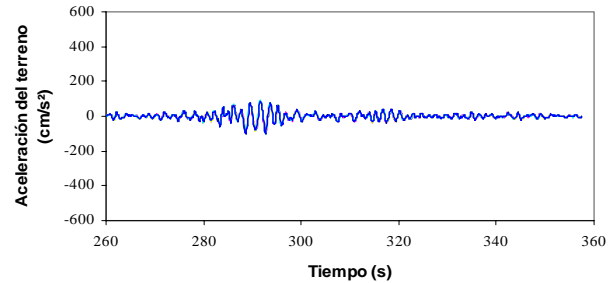
**Acelerograma 1, historia 2**



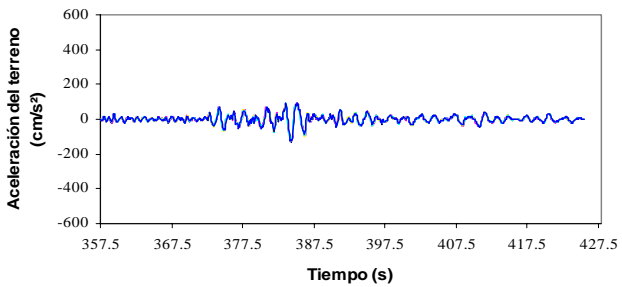
**Acelerograma 2, historia 2**



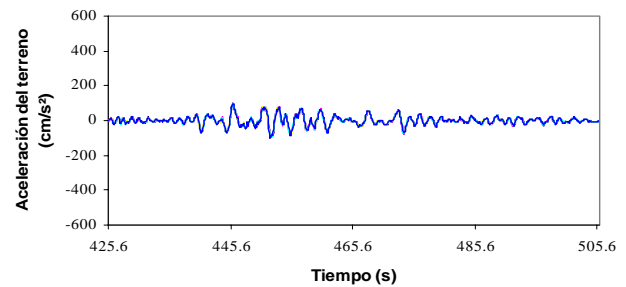
**Acelerograma 3, historia 2**



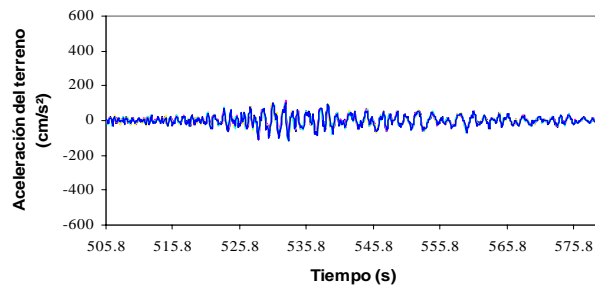
**Acelerograma 4, historia 2**



**Acelerograma 5, historia 2**



**Acelerograma 6, historia 2**



**Acelerograma 7, historia 2**

**Figura IV.2. Historia de sismos núm. 2.**

El grupo de señales sísmicas perteneciente a la historia 3 que a continuación se presentan, esta compuesta por 4 acelerogramas (figura IV.3).

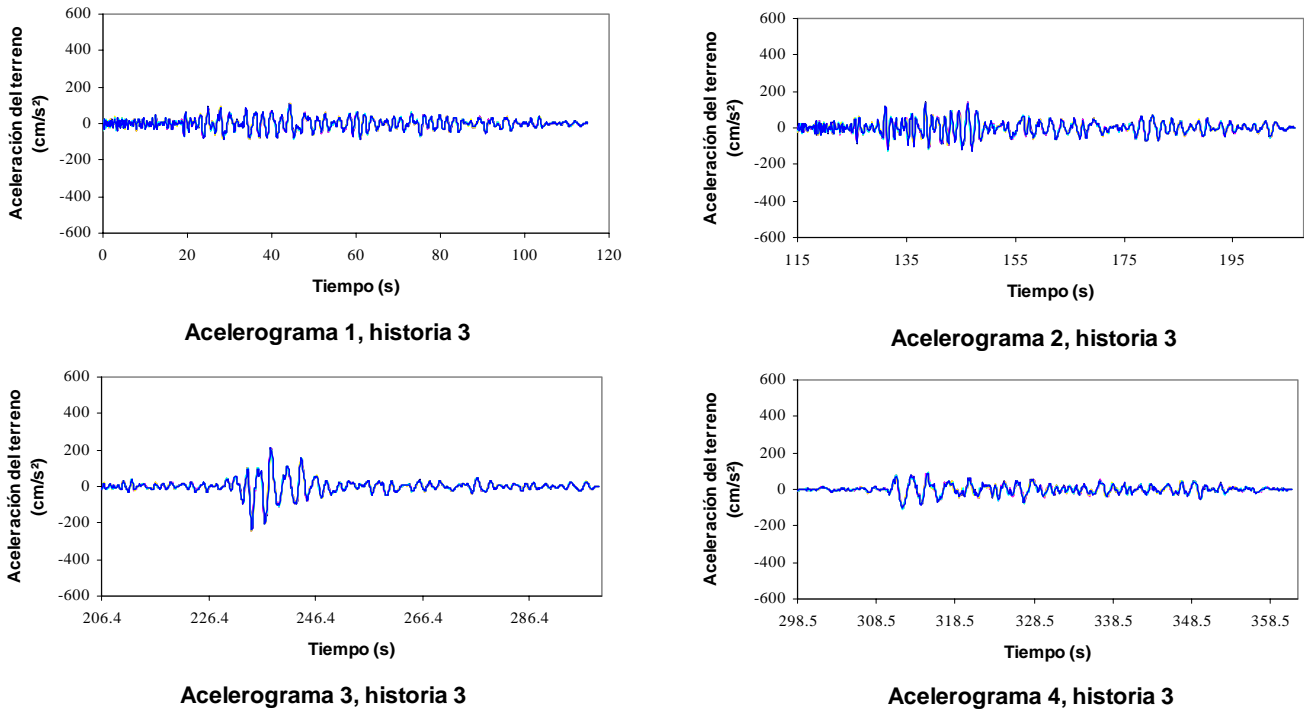
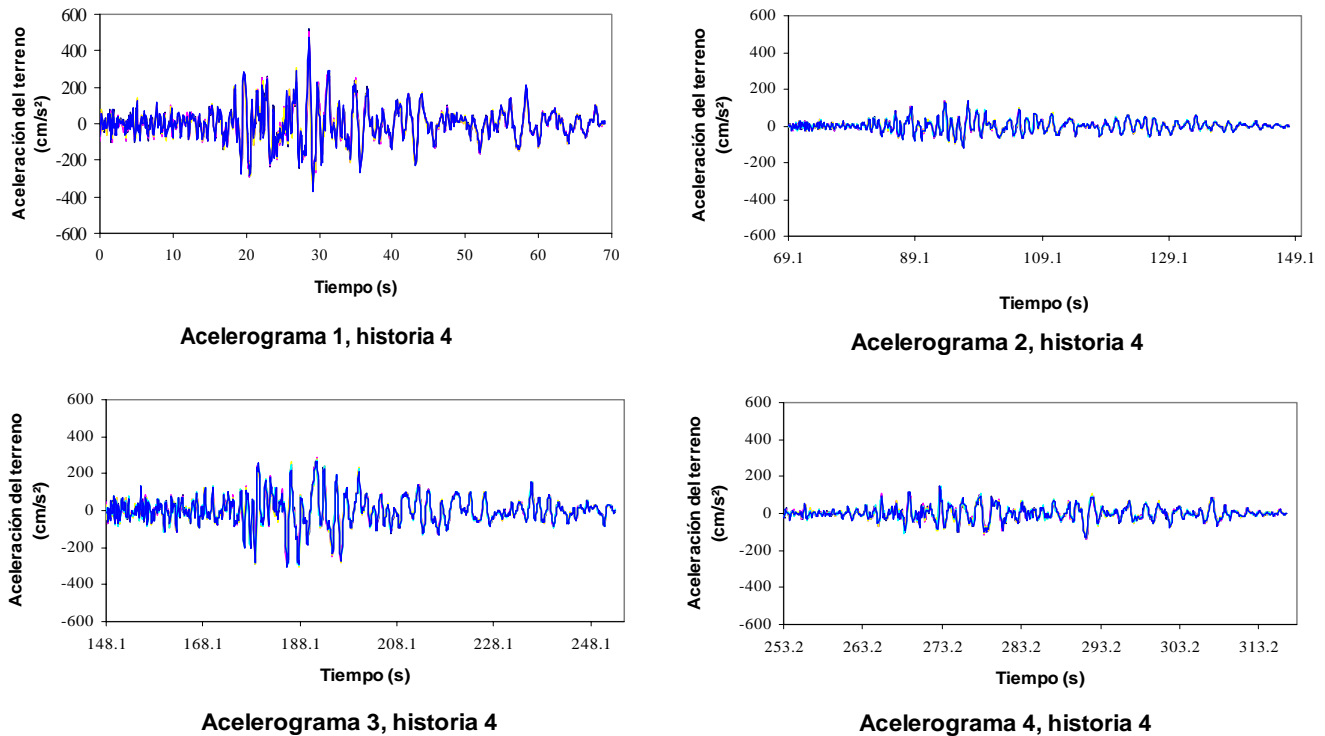


Figura IV.3. Historia de sismos núm. 3.

La historia número 4 esta representada por medio de los siguientes 6 sismos en la figura IV.4



IV. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE HISTORIAS DE TEMBLORES SIN MANTENIMIENTO

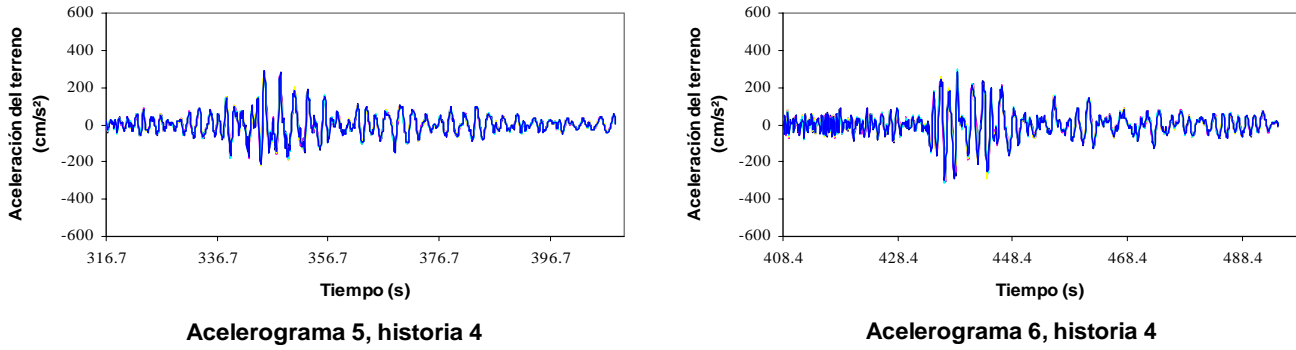


Figura IV.4. Historia de sismos núm. 4.

Se presenta mediante la figura IV.5 el último grupo de sismos que pertenecen a la historia 5.

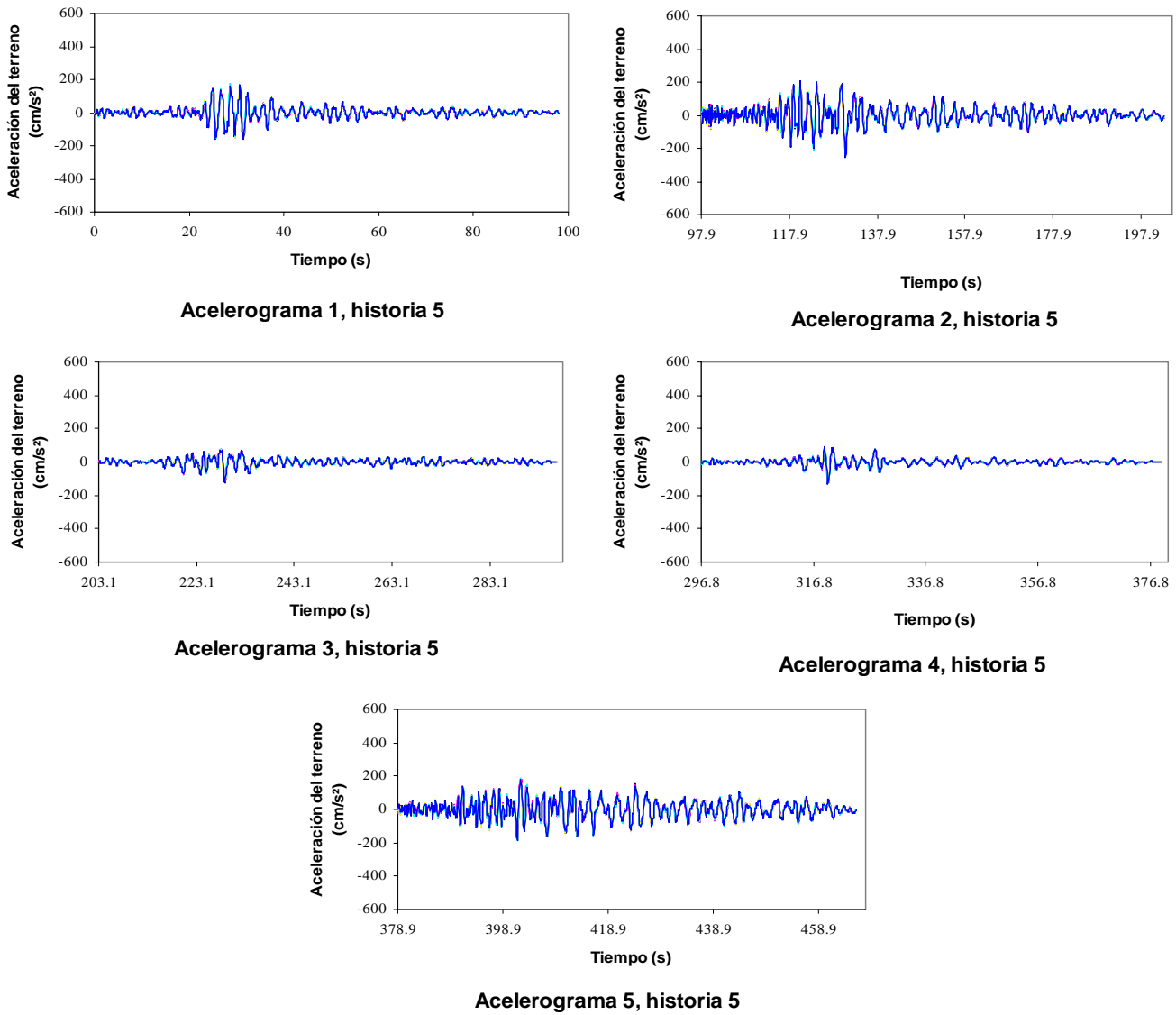


Figura IV.5. Historia de sismos núm. 5.

La tabla VI.1 muestra algunas características importantes de las historias de sismos para la zona del lago (estación SCT) de la ciudad de México, que se emplean en este capítulo, cada intensidad encontrada representa la aceleración espectral máxima que corresponde a un acelerograma simulado, se indica la duración de cada sismo (100 años) y su intensidad ( $\xi=0.05$ ).

Tabla IV.1 Tabla de historia de sismos.

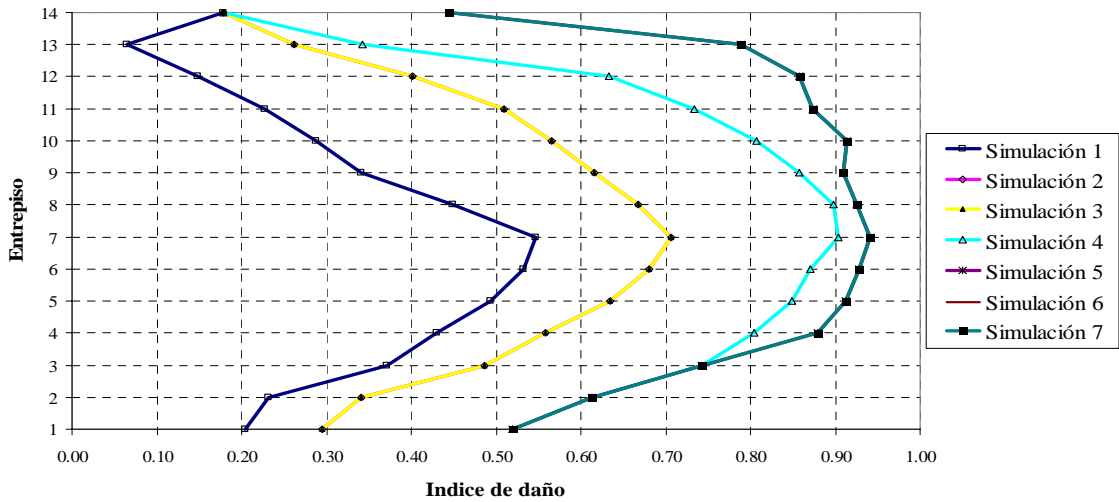
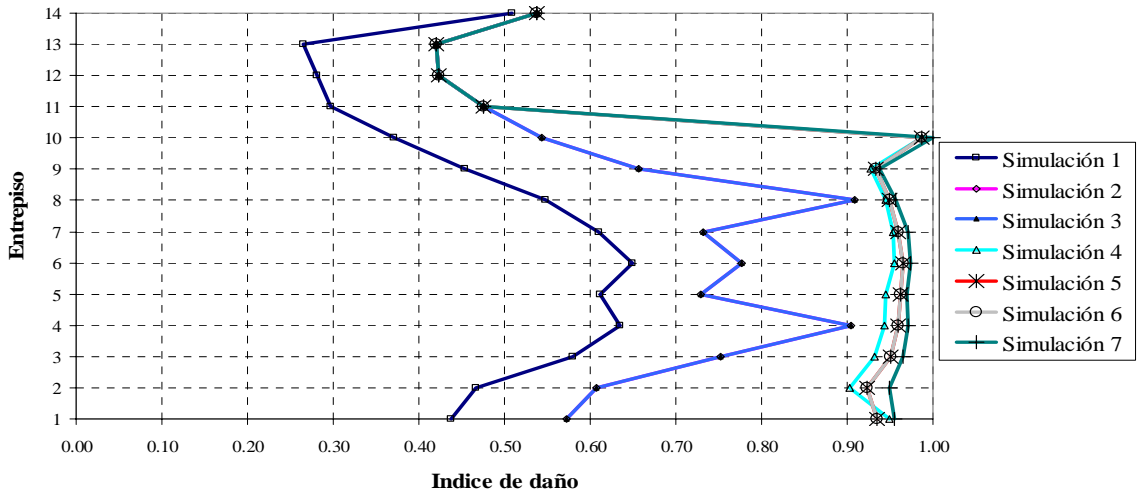
HISTORIA DE TEMBLORES	No. SISMO	INTENSIDAD (CM/S <sup>2</sup> )	TIEMPO (AÑOS)
Historia 1	1	745	1.31
	2	1148	3.94
	3	528	16.76
	4	1250	23.94
	5	1568	53.79
	6	828	66.81
	7	1237	71.02
Historia 2	1	406	28.42
	2	607	40.06
	3	703	44.84
	4	541	47.36
	5	468	57.73
	6	427	72.64
	7	518	76.67
Historia 3	1	571	24.19
	2	732	28.68
	3	934	85.60
	4	429	88.68
Historia 4	1	1449	5.63
	2	594	6.67
	3	1284	16.19
	4	514	54.31
	5	1134	78.71
	6	1383	93.50
Historia 5	1	983	4.61
	2	979	16.45
	3	408	67.27
	4	438	82.78
	5	817	92.60

## IV.2 Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 1

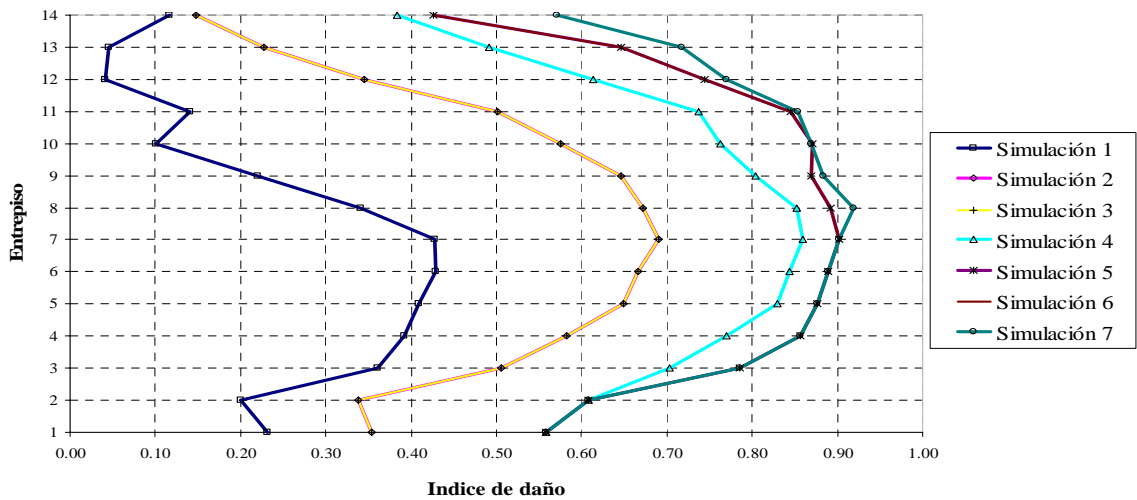
A continuación se presentan las respuestas estructurales de los marcos con disipadores, se muestra tal comportamiento por historia de temblores.

En este primer grupo de temblores las respuestas pueden ser observadas por medio de las siguientes figuras:

IV. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE HISTORIAS DE TEMBLORES SIN MANTENIMIENTO



U-HISTORIA 1



VE- HISTORIA 1

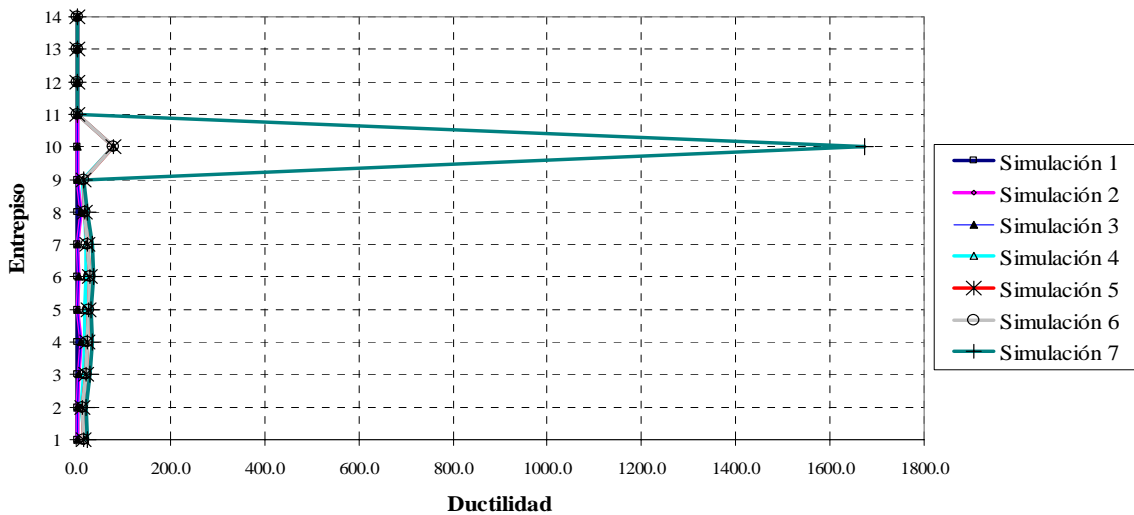
Figura IV.6. Índice de daño de marcos sometidos a la historia de sismos núm.1.



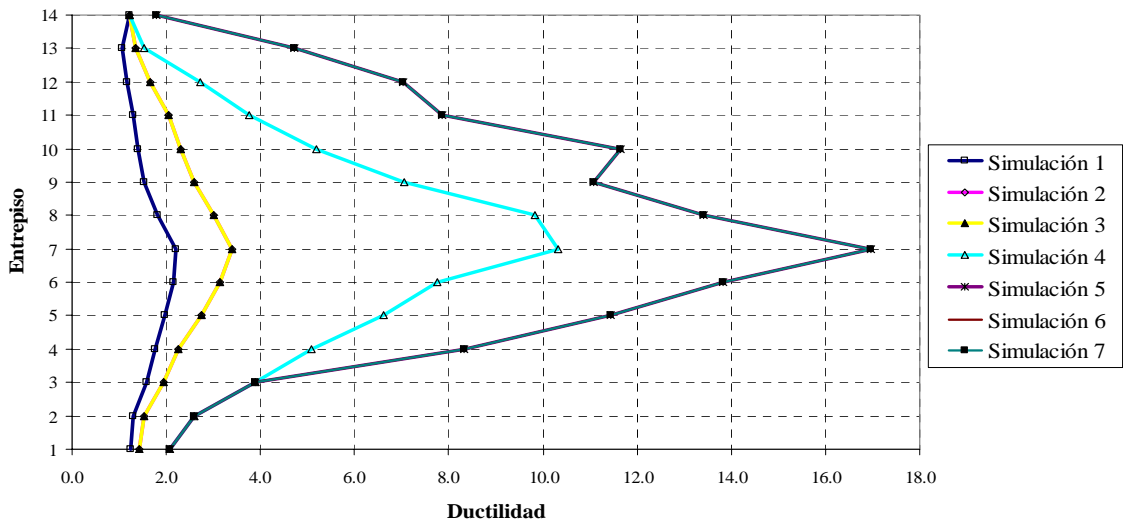
En la figura IV.6 se puede apreciar las respuestas del índice de daño de los sistemas estudiados, se ve que en las simulaciones para el marco con TADAS, hubo algunas que fueron fuertemente dañadas, incluso algunos sistemas estuvieron muy cerca del colapso (cerca del valor 1).

Las gráficas de las simulaciones para los marcos con U y VE tienen un comportamiento similar, el daño que sufren los sistemas están comprendidos entre 0.10 y 0.90.

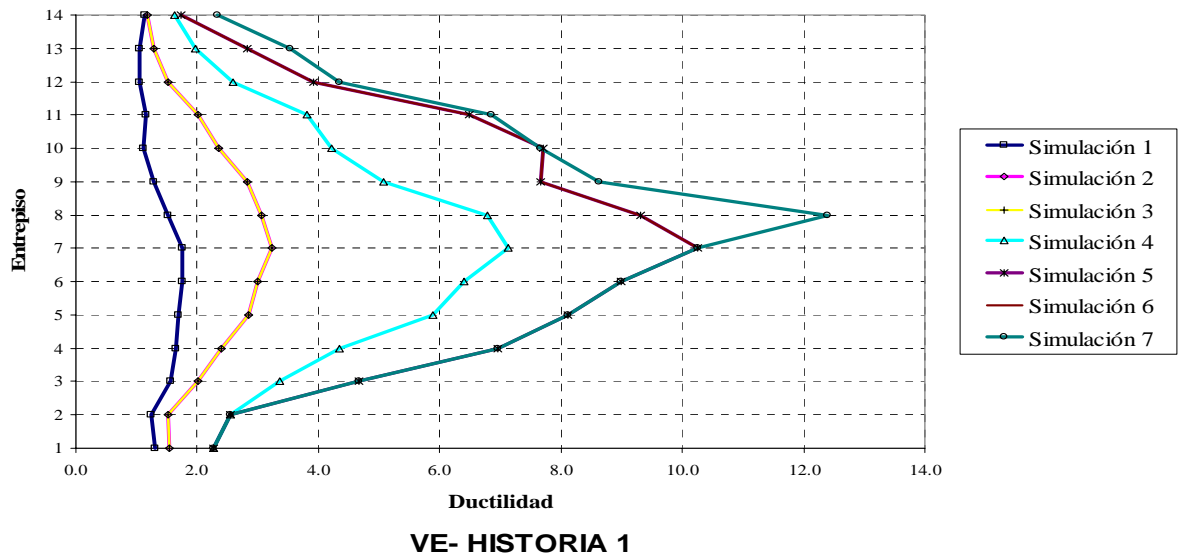
Los siguientes esquemas contienen la demanda de ductilidad del marco elegido aleatoriamente con sus respectivos dispositivos disipadores de energía.



TADAS-HISTORIA 1



U-HISTORIA 1



**Figura IV.7. Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm.1.**

Las figuras anteriores representan la demanda de ductilidad de las simulaciones construidas para la historia de sismos 1, se observa que en la gráfica de simulaciones para el marco con TADAS se presentó una ductilidad enorme, esto tiene una explicación, la cuál se asocia con la gráfica IV.6 de índice de daño de este mismo sistema, En el entrepiso 7 del sismo 7, como ya se comentó, se presentó un daño que acerca el sistema al colapso y debido al vínculo que existe entre estos conceptos, al acercarse la respuesta de esta simulación a la falla, ocasiona que la ductilidad se dispare a valores muy grandes.

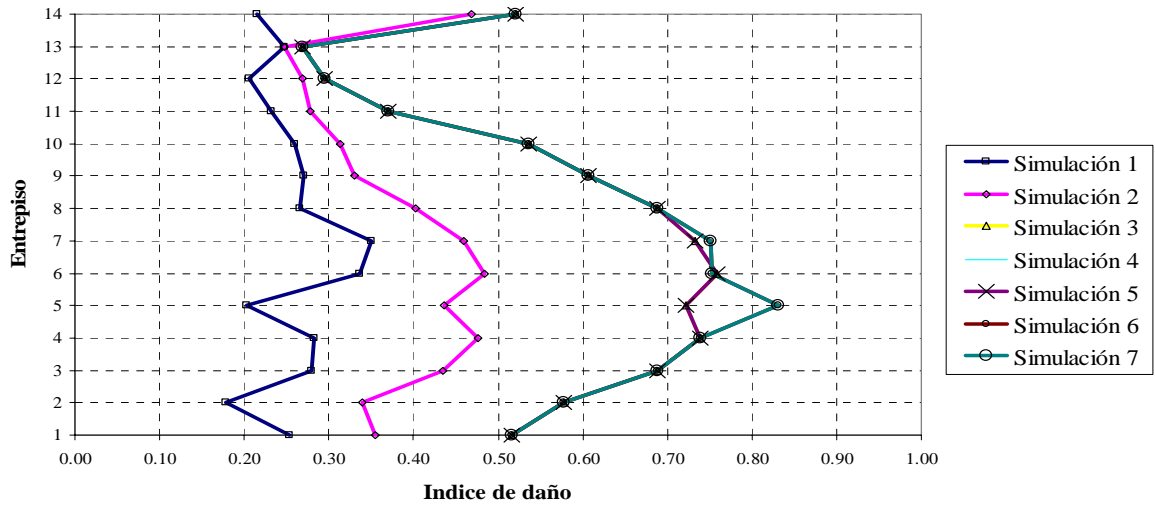
Respecto a las respuestas de demanda de ductilidad de las simulaciones para los marcos con U y VE, se aprecia que solo pocas simulaciones tuvieron una demanda muy grande, y esto es debido a que esas simulaciones fueron sistemas más débiles que los otros, además, el sismo pudo haber sido fué más fuerte.

La simulación 1, construida para el sismo 1 fué la que menos demanda de ductilidad tuvo.

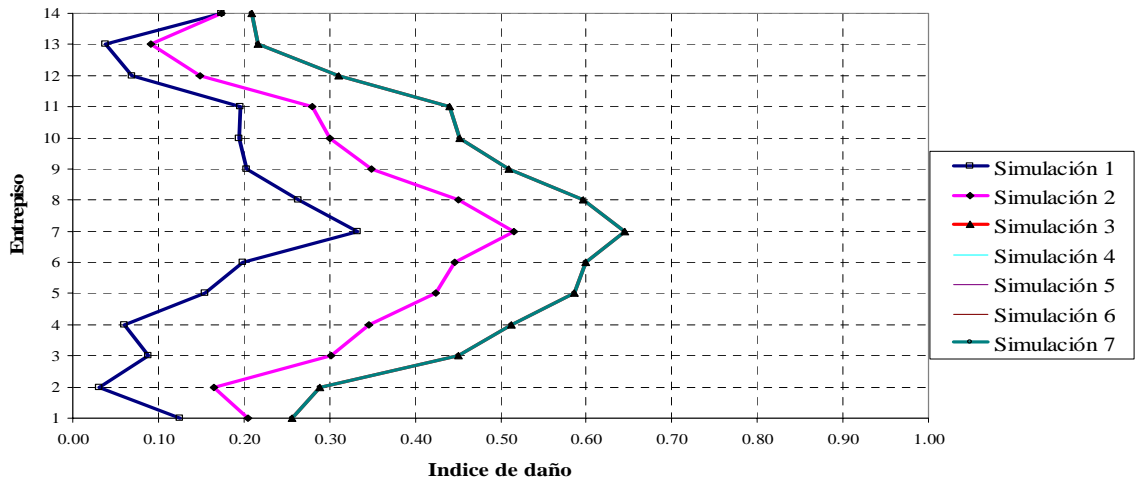
### IV.3 Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 2

Se presentan las gráficas de índice de daño y demanda de ductilidad correspondiente a la historia de sismos núm.2.

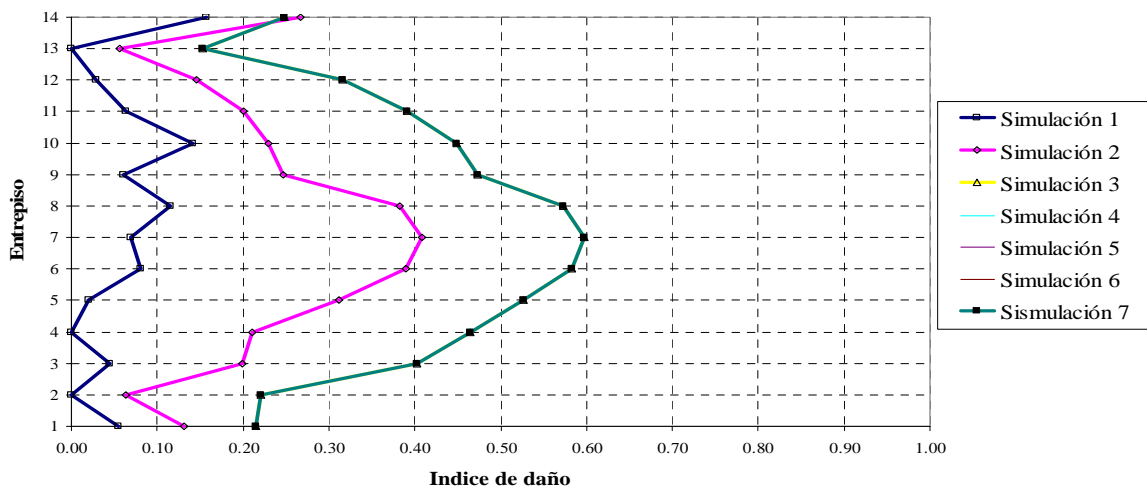
IV. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ANTE HISTORIAS DE TEMBLORES SIN MANTENIMIENTO



TADAS-HISTORIA 2



U- HISTORIA 2



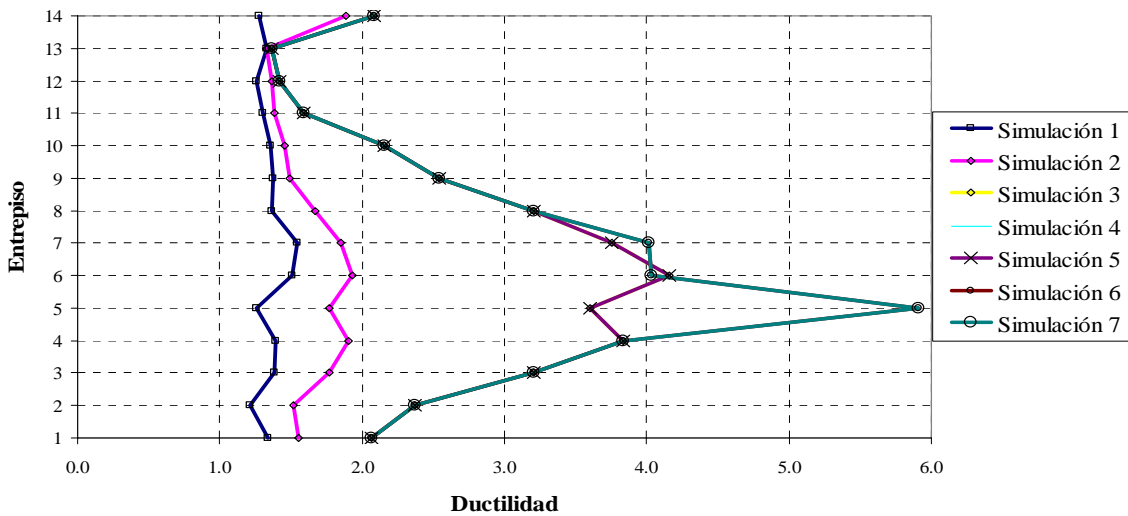
VE- HISTORIA 2

Figura IV.8. Indice de daño de marcos sometidos a la historia de sismos núm.2.

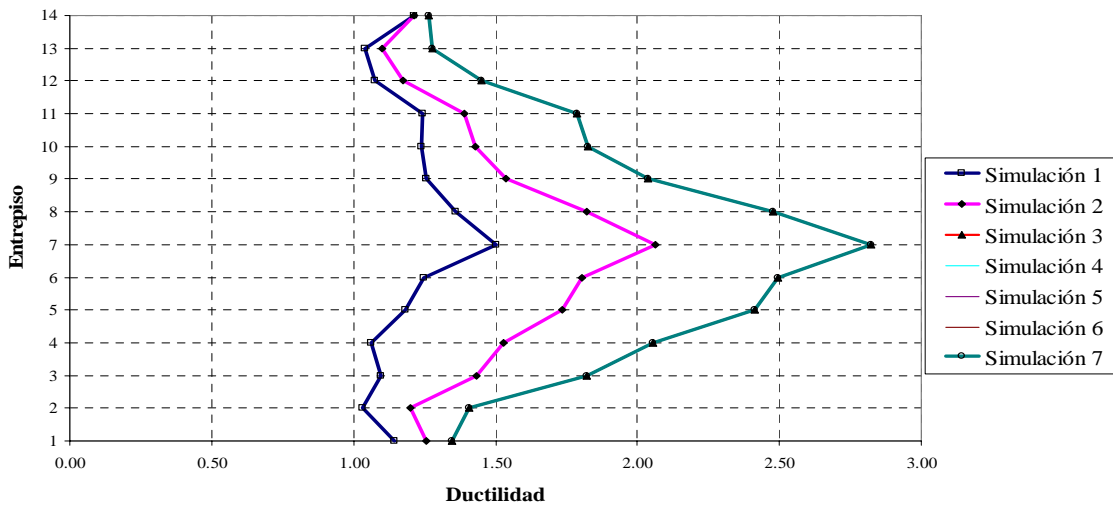
De este conjunto de gráficos que representan el índice de daño de las simulaciones para los marcos de concreto con disipadores, el correspondiente a los TADAS presentó una mayor degradación, especialmente la simulación correspondiente al sismo 6 en el entrepiso 5.

En esta historia, el conjunto de simulaciones para el marco con VE presentó muy poco daño comparado con los otros 2 sistemas, concentrándose la mayor parte de las curvas por abajo del valor de 0.6.

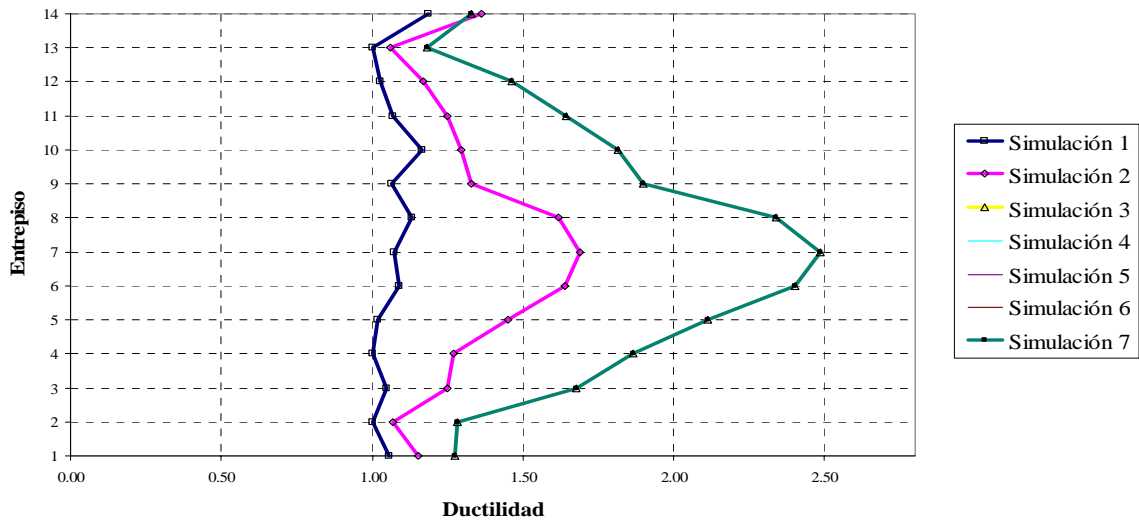
Las respuestas de los sistemas con U presentaron un comportamiento estable y la curva que sufrió mas daño, tuvo una degradación ligeramente mayor a la simulación más dañada con VE.



TADAS-HISTORIA 2



U- HISTORIA 2



VE- HISTORIA 2

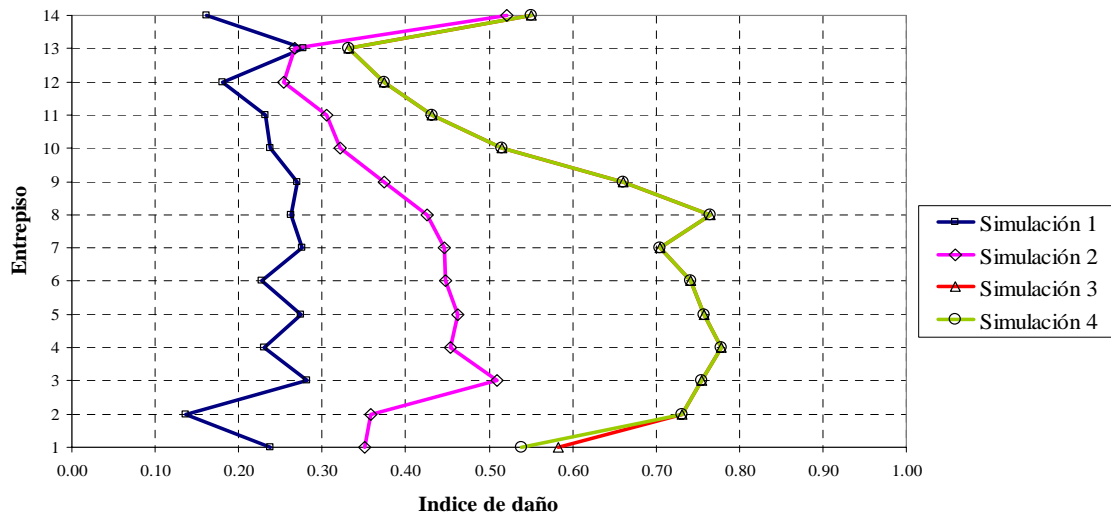
Figura IV.9. Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm.2.

Se aprecia que las demandas de ductilidad para esta historia de sismos fué mayor para las simulaciones que representaban al marco de concreto con TADAS, las simulaciones para el marco con VE tuvo las menores demandas.

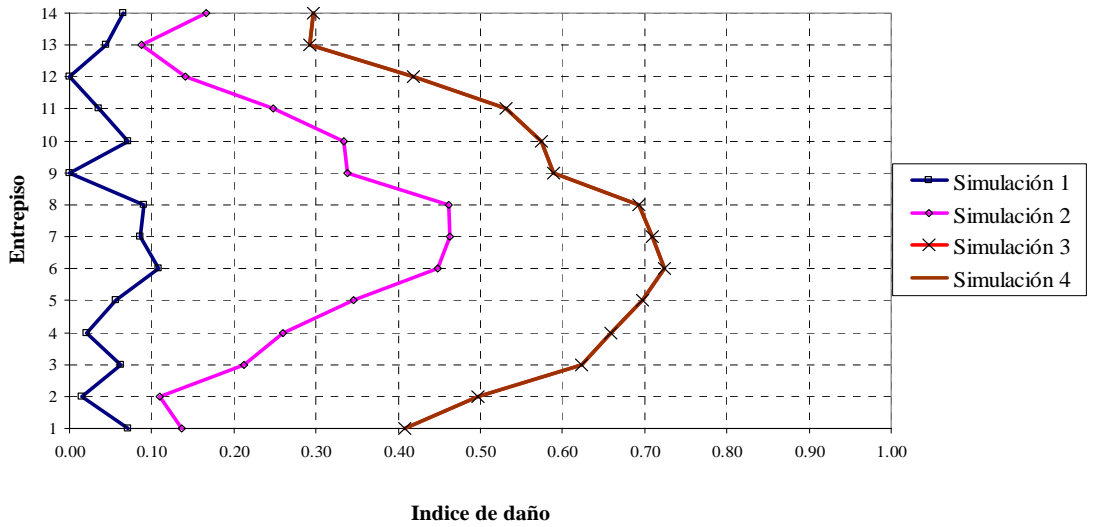
A diferencia de los otros sistemas, el construido con VE para esta historia, tuvo demandas de ductilidad menores a 1.

#### IV.4 Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 3

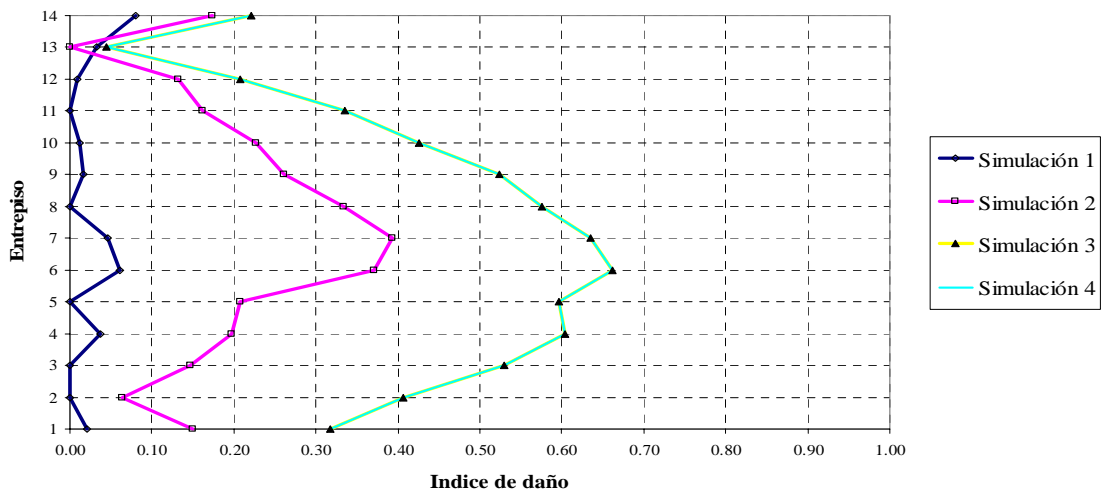
Los índices de daño obtenidos, de aplicar el grupo de sismos número 3, están representados por el siguiente conjunto de gráficas.



TADAS-HISTORIA 3



U- HISTORIA 3



VE- HISTORIA 3

Figura IV.10. Índice de daño de marcos sometidos a la historia de sismos núm.3.

En este grupo de esquemas el comportamiento entre los grupos de simulaciones de los marcos estructurales con sus dispositivos disipadores es similar, no distinguiéndose una diferencia importante entre uno y otro, sin embargo, el conjunto con TADAS no tiene curvas cercanas a demanda cero, y los otros conjuntos de simulaciones si, esto significa mejor comportamiento de los sistemas U y VE en esta historia.

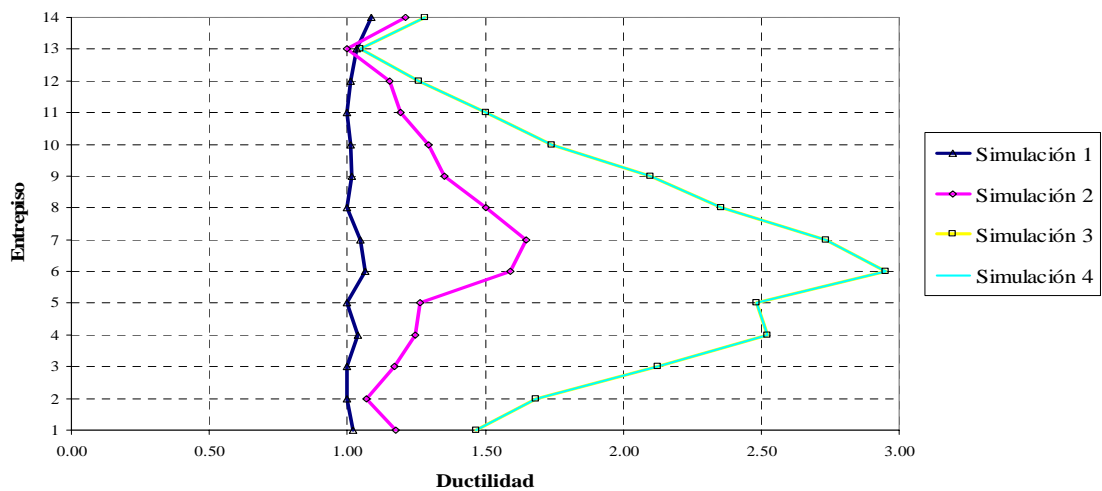
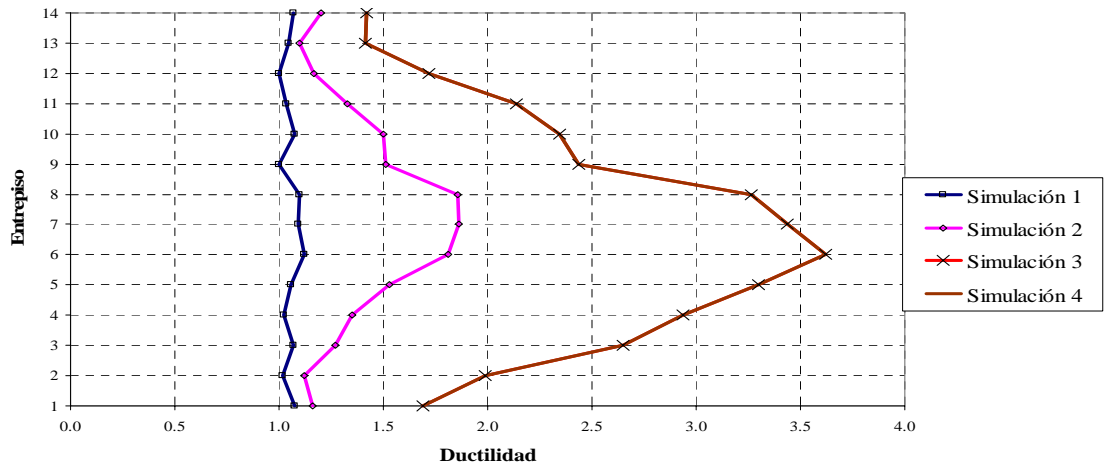
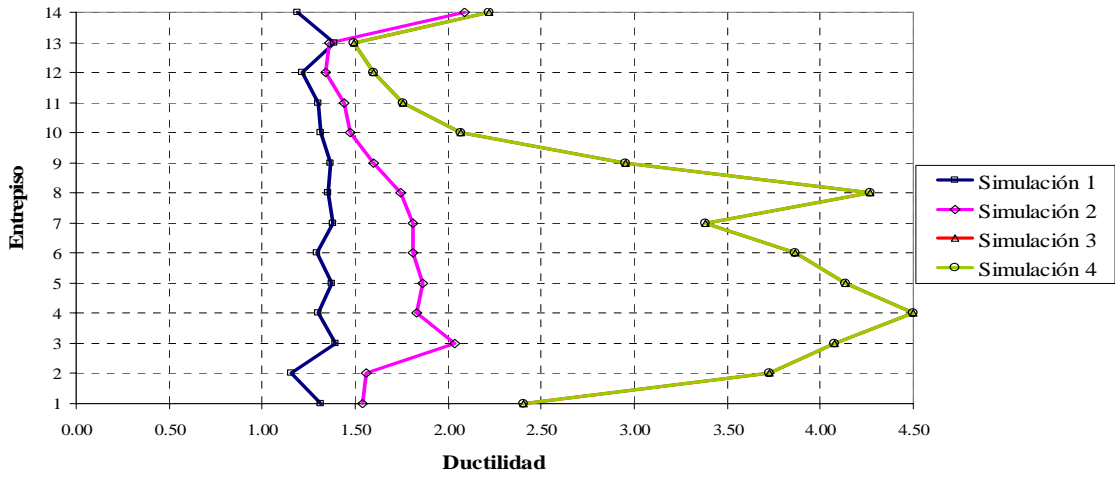


Figura IV.11. Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm.3.

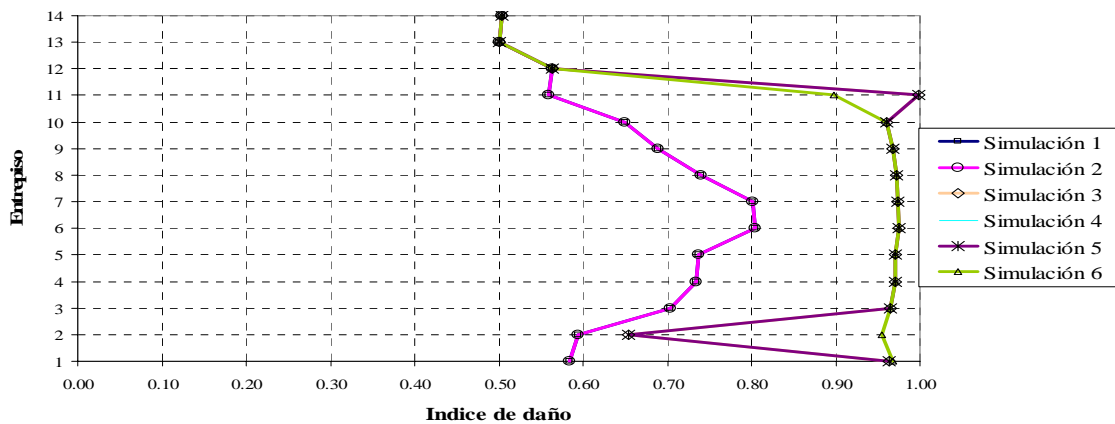
A partir de los esquemas anteriores, se observa el buen comportamiento en cuanto a demanda de ductilidad de las realizaciones en los marcos con U y VE, el conjunto de simulaciones para el marco con TADAS tuvo la mayor demanda, esto significa que para esta historia han resultado sistemas más débiles.

El conjunto de simulaciones construidas del marco con VE ha logrado para esta historia, una demanda de ductilidad menor que los otros 2 sistemas.

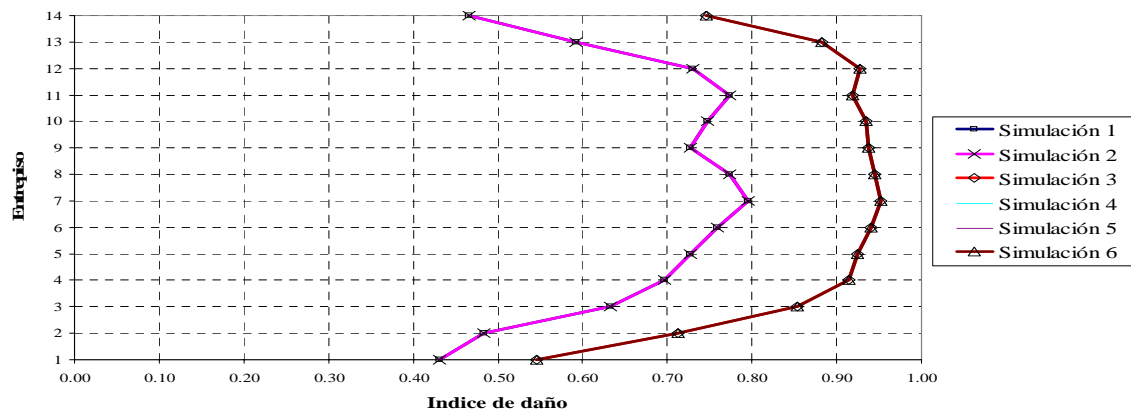
El comportamiento para esta historia de las simulaciones con U tiene mucha similitud con el alcanzado por el marco con VE en sus simulaciones.

#### IV.5 Comportamiento sísmico para historia de sismos núm. 4

El grupo siguiente de gráficas corresponde al índice de daño y demanda de ductilidad de los marcos con disipadores sometidos a la historia de sismos número 4.

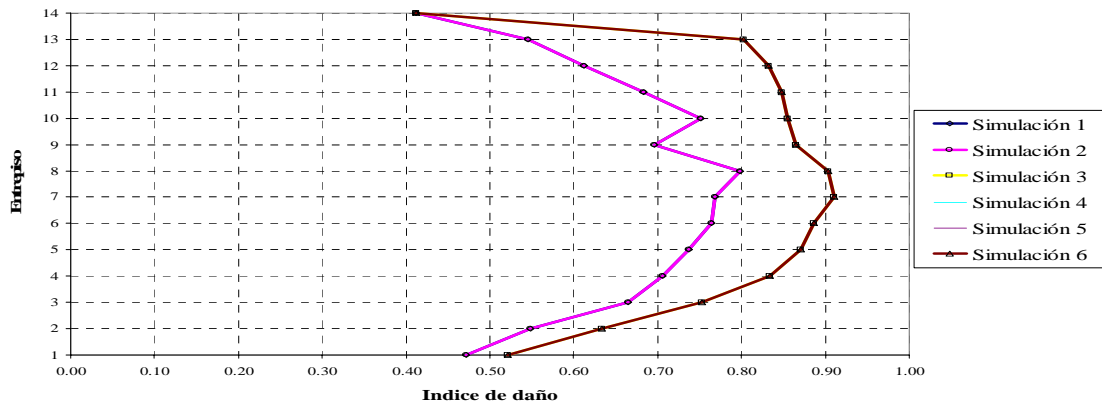


TADAS- HISTORIA 4



U- HISTORIA 4



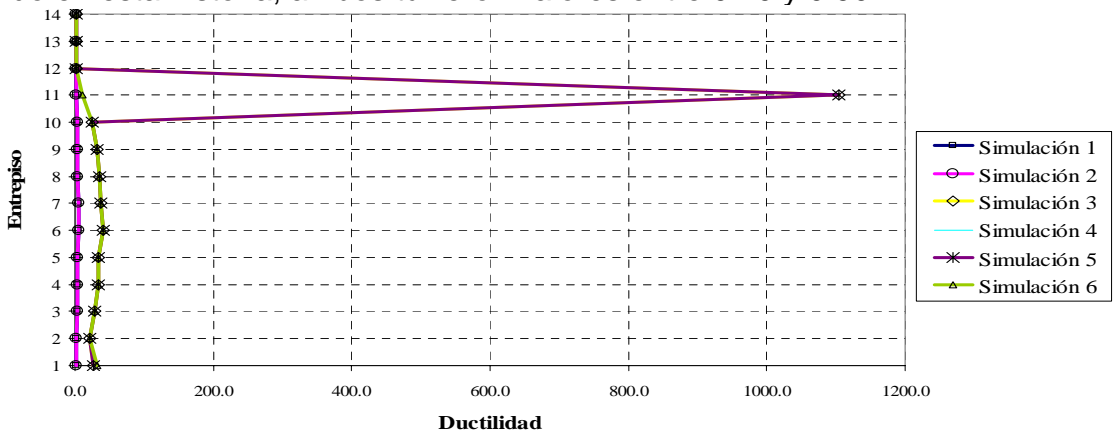


VE- HISTORIA 4

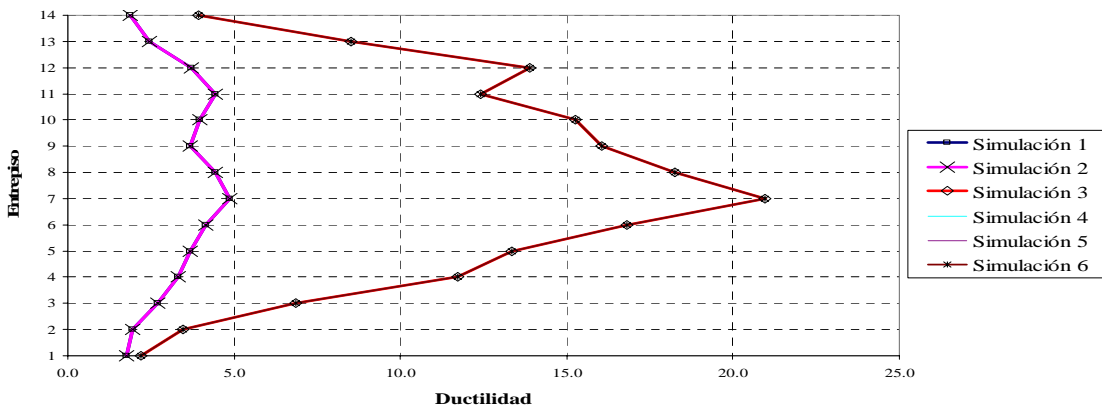
Figura IV.12. Índice de daño de marcos sometidos a la historia de sismos núm.4.

Por el comportamiento sobre el deterioro de los elementos sometidos a la historia de sismos 4 que tuvieron todos los sistemas, puede decirse que el conjunto de sismos que componen este grupo son mas fuertes comparados con los de las otras historias, el sistema de simulaciones del marco con TADAS tuvo en 2 entrepisos (1 y 11) valores muy cercanos al colapso.

La similitud en el comportamiento de las simulaciones de los marcos con U y VE sigue prevaleciendo en esta historia, ambos tuvieron valores entre 0.40 y 0.90.



TADAS- HISTORIA 4



U- HISTORIA 4

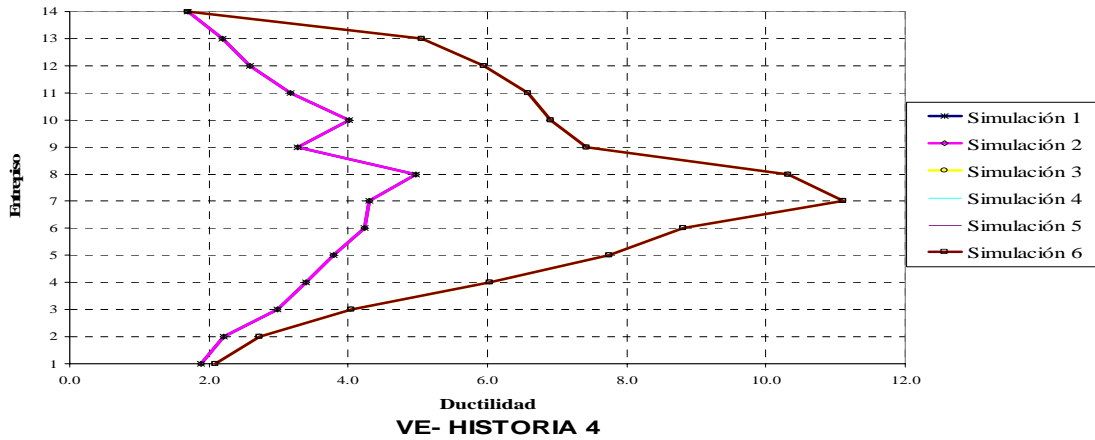


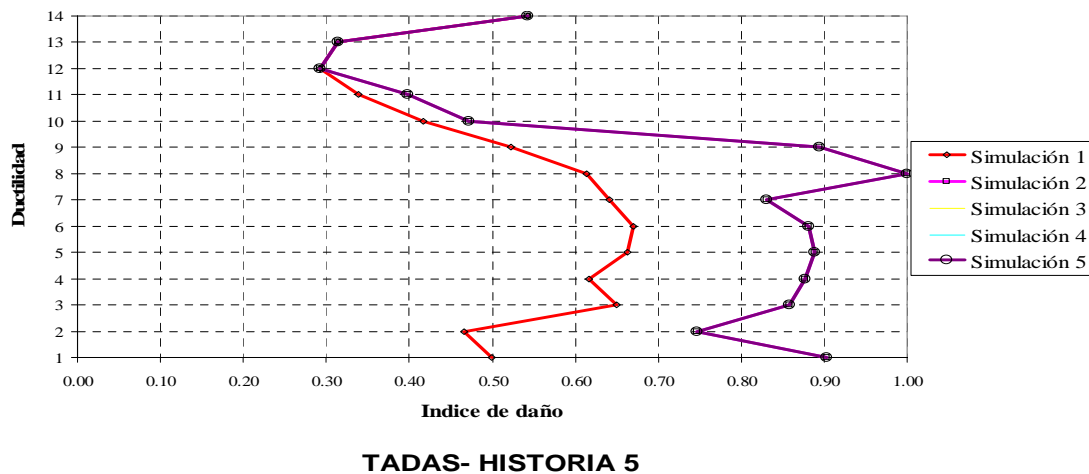
Figura IV.13. Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm.4.

La figura anterior muestra las respuestas de ductilidad, correspondientes a la historia número 4, como consecuencia de haber obtenido valores cercanos a 1 en la gráfica de índice de daño de esta misma historia, como se puede apreciar el sistema de marco con TADAS logró un valor de ductilidad muy grande en el entrepiso 11.

Las simulaciones del marco con U presentaron para esta historia una mayor demanda de ductilidad en comparación con el marco con VE, el cuál continúa teniendo el mejor comportamiento de este grupo, debido a su menor demanda de ductilidad.

#### IV.6 Comportamiento sísmico para historia de sismo núm. 5

Finalmente el siguiente grupo de gráficas contiene el índice de daño y demanda de ductilidad de los marcos con disipadores sometidos a la historia de sismos núm. 5.



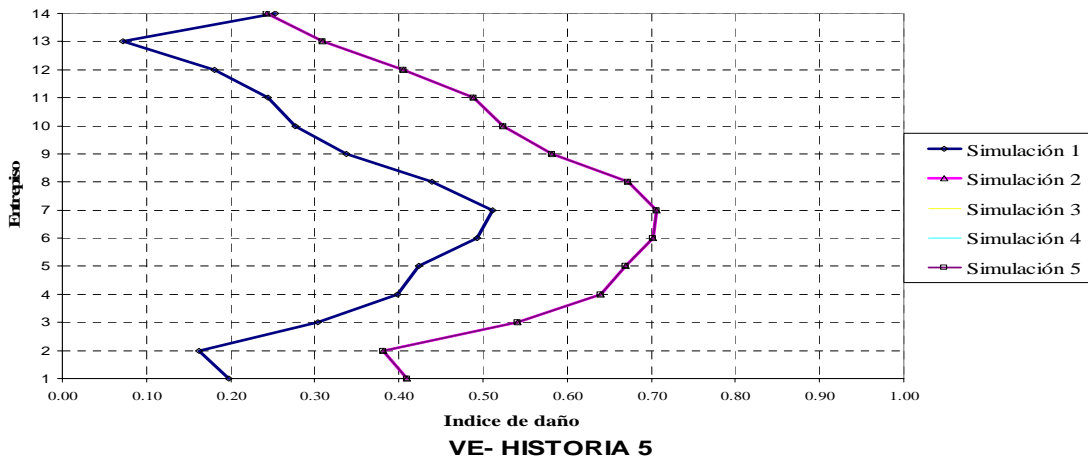
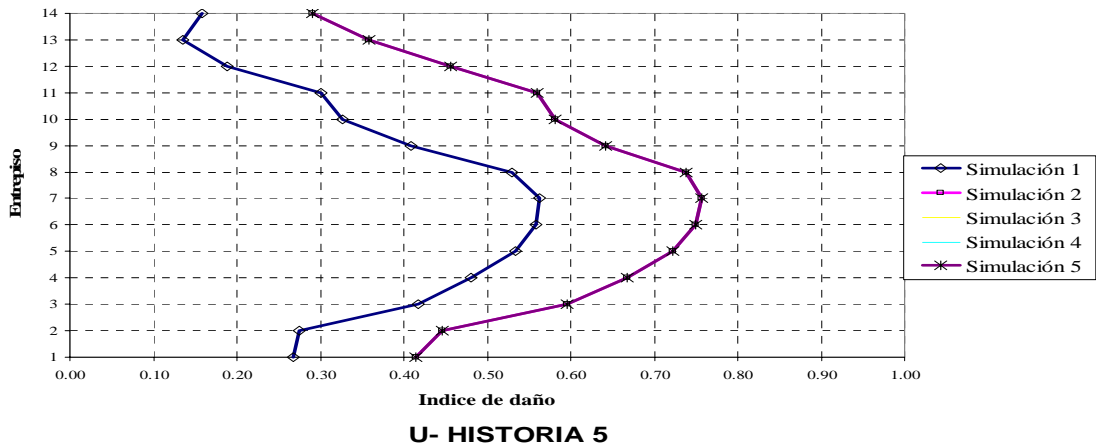


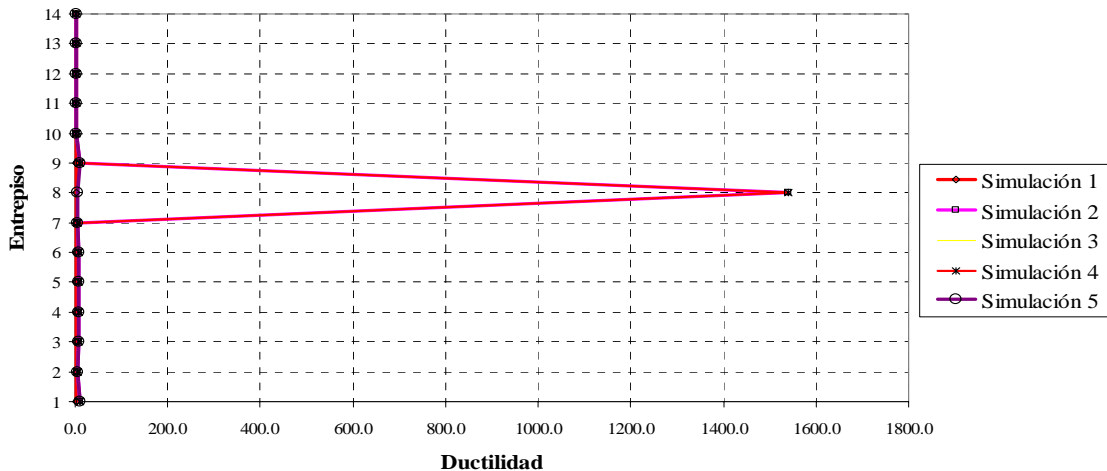
Figura IV.14. Índice de daño de marcos sometidos a la historia de sismos núm.5.

Finalmente, de este grupo de sismos se comenta que los sistemas con TADAS presentaron un deterioro muy grande en el entrepiso 8 debido al sismo 2, con una misma tendencia de aumento en el deterioro de sus propiedades en los entrepisos inferiores al ya mencionado.

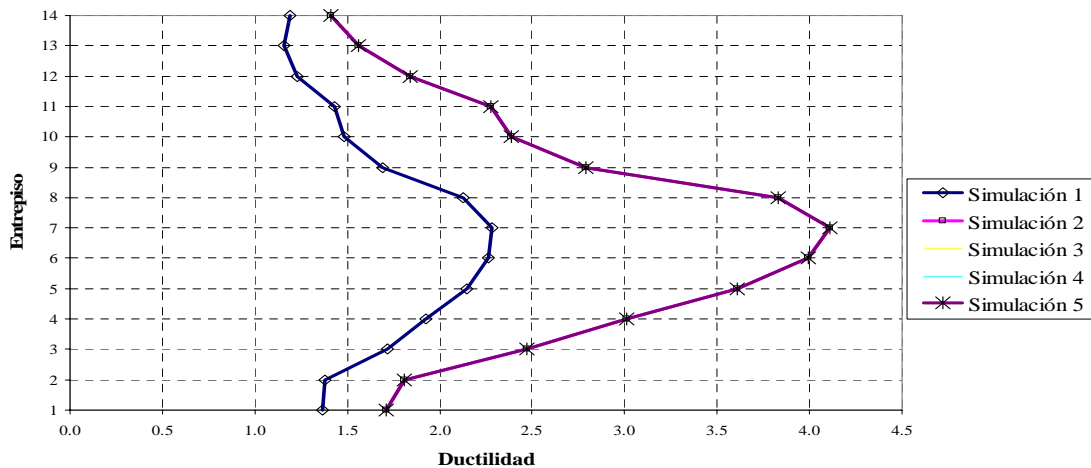
De la respuesta para el marco con U, se aprecia que todas las simulaciones coincidieron en 2 curvas, de las cuáles los entrepisos extremos, esto es, los superiores e inferiores lograron poca pérdida en sus propiedades, mientras que en los entrepisos medios sufrieron una mayor degradación.

En lo que respecta a las simulaciones del marco con VE, sufrieron poco daño en los pisos inferiores y superiores, y un poco más en los entrepisos medios.

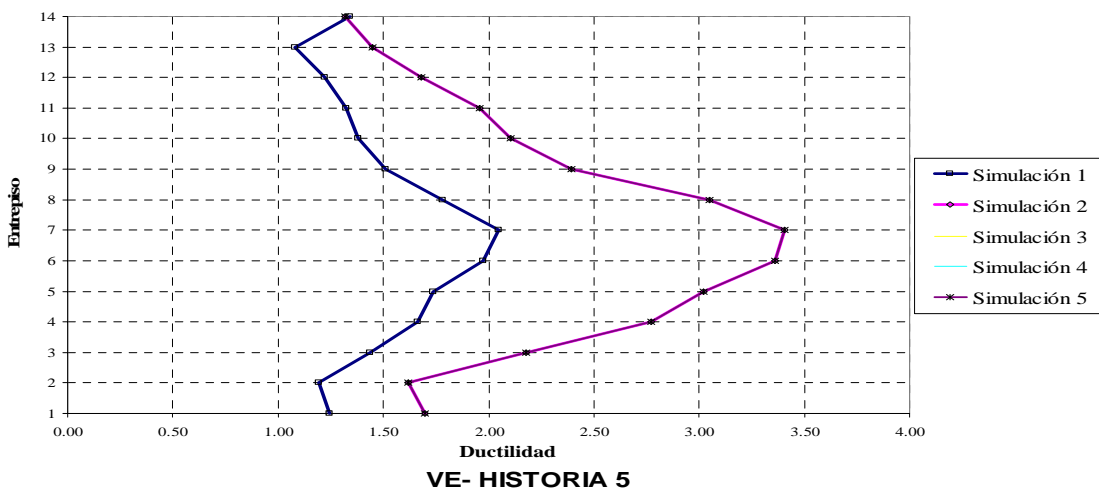
El último grupo de respuestas se presentan en el siguiente esquema, ahí se aprecia el valor muy grande de demanda de ductilidad del marco con TADAS y la forma similar que tuvieron en el comportamiento de los sistemas con U y VE.



TADAS- HISTORIA 5



U- HISTORIA 5



VE- HISTORIA 5

Figura IV.15. Demanda de ductilidad de marcos sometidos a la historia de sismos núm.5.

La tabla IV.1 presenta los daños globales máximos de las simulaciones construidas a partir de los marcos de concreto con disipadores tipos TADAS, U y Viscoelásticos, sometidos a historias sísmicas que en conjunto abarcan 100 años.

Esta tabla contiene 3 columnas principales que muestran los valores de la máxima degradación para cada marco estructural con disipadores de energía sísmica.

Tabla IV.2 Tabla de daños globales ante historias de sismos.

MARCO TADAS		MARCO U		MARCO VE	
HISTORIA	D <sub>K</sub>	HISTORIA	D <sub>K</sub>	HISTORIA	D <sub>K</sub>
1	0.999402	1	0.941083	1	0.919313
2	0.830766	2	0.645610	2	0.597879
3	0.777889	3	0.723588	3	0.661415
4	0.999095	4	0.952318	4	0.909950
5	0.999350	5	0.756595	5	0.706271
<b>Promedio mQ</b>	0.921300	<b>Promedio mQ</b>	0.650273	<b>Promedio mQ</b>	0.617111
<b>Var ( Q )</b>	6.507689	<b>Var ( Q )</b>	4.902672	<b>Var ( Q )</b>	4.494787
<b>Desviación σQ</b>	2.551017	<b>Desviación σQ</b>	2.214198	<b>Desviación σQ</b>	2.120091
<b>σZ = σQ</b>	2.551017	<b>σZ = σQ</b>	2.214198	<b>σZ = σQ</b>	2.120091
<b>mZ = 1 - mQ</b>	0.078700	<b>mZ = 1 - mQ</b>	0.349727	<b>mZ = 1 - mQ</b>	0.382889
<b>β = mZ / σZ</b>	0.030850	<b>β = mZ / σZ</b>	0.157948	<b>β = mZ / σZ</b>	0.180600
<b>pf</b>	0.487695	<b>pf</b>	0.437249	<b>pf</b>	0.428341

Respecto a los valores de las respuestas de las simulaciones del marco con TADAS, se aprecia que en la historia 1 se obtuvo la máxima degradación y en la historia 3 la menor degradación, sin embargo, los valores obtenidos fueron altos en cada historia.

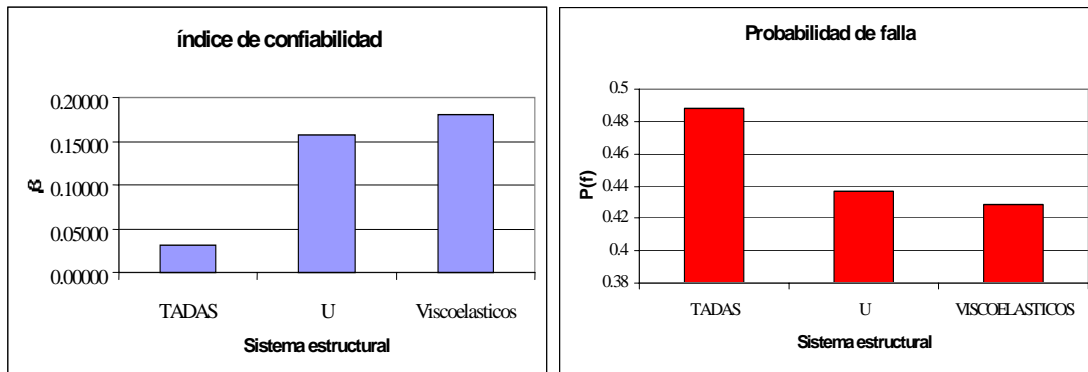
Las simulaciones del marco con dispositivos U presentaron degradación variable, que comprendió valores de 0.645610 en la historia 2 y de 0.952318 para la historia 4, y un promedio de 0.650273.

El comportamiento de daño sufrido por el marco con VE fue mejor que los otros 2 sistemas, pues resultaron valores inferiores, así lo confirma el promedio de los valores.

Los parámetros posteriores al promedio, describen el procedimiento para determinar el índice de seguridad de los sistemas estudiados, ahí se observa que el sistema estructural con VE tuvo el valor más grande.

El último renglón de esa tabla presenta la probabilidad de falla, la cuál ratifica el mejor comportamiento del marco con VE sometido a historias de sismos pues obtuvo un valor de 0.428341.

La figura IV.16 muestra la comparación de la respuesta estructural de cada uno de los sistemas estructurales estudiados en este trabajo, en ella se puede observar que el sistema con el mayor índice de confiabilidad es el correspondiente al marco con disipadores VE, y el sistema con menor índice de seguridad es el TADAS.



**Figura IV.16. Índice de confiabilidad y probabilidad de falla de marcos con diferentes tipos de disipadores de energía sometidos a historias de sismos.**

Respecto a la probabilidad de falla, puede apreciarse esquemáticamente que el sistema TADAS tiene la mayor probabilidad de colapso y el VE la menor.

En resumen, el estudio de conjuntos estructurales de concreto reforzados con 3 diferentes tipos de disipadores de energía como TADAS, U y Viscoelásticos, asentados sobre un suelo con las características de la zona blanda de la ciudad de México, y sometido a la aplicación de 5 historias sísmicas que en conjunto comprenden un período de 100 años, y no considerando costos de mantenimiento, reveló que de los 3 sistemas estudiados, el reforzado con VE resultó tener la mejor respuesta ante las condiciones ya citadas.

Los resultados obtenidos en este trabajo ofrecen al lector algunas aportaciones importantes que se sugiere se deben tomar en cuenta para mejorar trabajos similares en el futuro.

Una gran cantidad de experimentos realizados sobre elementos disipadores de energía en diversas partes del mundo y posteriormente publicados en congresos, han manifestado el buen comportamiento de estos elementos bajo un elevado número de ciclos de carga, sí se equiparan algunos dispositivos respecto a propiedades generales como comportamiento histerético, deformación, fatiga, etc. se verá que tiene una gran similitud.

Añadiendo la experiencia obtenida de este trabajo sobre el comportamiento de los dispositivos bajo sismos específicos, se puede considerar que el método de análisis y diseño, basado en ductilidades tolerables aplicado aquí, es apto para ser extensivo a otros tipos de disipadores de energía.

Otra aportación importante que se deduce de este trabajo, es la experiencia obtenida al analizar 3 conjuntos de marcos de concreto con elementos disipadores de energía sísmica, el estudio de estos sistemas ha evolucionado tanto, ya que los primeros trabajos que se realizaron estaban basados en comparativas entre marcos reforzados con y sin disipadores, y poco a poco se fué demostrando que los sistemas reforzados tenían una mejor respuesta que los que no estaban reforzados con dispositivos disipadores, la experiencia sobre estos estudios en tiempos pasados ha propiciado que hoy en día se puedan realizar trabajos como el que aquí se ofrece.

La elección de los dispositivos usados para este trabajo no fué a través de una decisión al azar, sino que originalmente se pensó comparar dispositivos desarrollados analítica y experimentalmente en algunos países que en su momento tenían la vanguardia tecnológica sobre estos sistemas, así que se consideró trabajar con el dispositivos U ó también llamado solera, el cuál se inició experimentalmente en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El dispositivo TADAS fue elegido por haber sido analizado inicialmente en Taiwán, y finalmente se optó por emplear el dispositivo viscoelástico, cuyos inicios se remontan en Taiwán y se comparten en los Estados Unidos.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En este trabajo se mostró que la adición de elementos disipadores de energía en marcos estructurales permite, ante una sollicitación sísmica importante, una disminución en el nivel de esfuerzos en la parte convencional (trabes y columnas) de dicho marco, lo cual se traduce en un menor daño en ellos y por consiguiente una menor pérdida de rigidez y resistencia.
- Respecto al análisis y diseño de los sistemas estudiados, este trabajo empleó una metodología que se basa en el empleo de ductilidades tolerables y que es aplicada principalmente a marcos de concreto dotados con EDES. Esta metodología cubre satisfactoriamente los apartados que el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal pide para estructuras con esta clase de dispositivos. En cuanto a las respuestas se estableció que determinan el nivel de daño para cada sistema ante sismos de intensidades dadas, y con ello se obtiene el nivel de confiabilidad para dichos sistemas.



- El análisis de las respuestas de los marcos estructurales con disipadores para un sismo fuerte e historias de sismos, permitió conocer la capacidad de disipación de energía de cada conjunto estructural representado en gráficas de ciclos histeréticos, índice de confiabilidad, probabilidad de falla, etc.
- Al ser sometidos los conjuntos estructurales con disipadores a un sismo fuerte como el registrado el 19 de Septiembre de 1985, los resultados indicaron que el conjunto estructural que obtuvo una mejor respuesta fue el dotado con disipadores Viscoelásticos.
- De los marcos estructurales con elementos disipadores sometidos bajo la acción de historias de sismos correspondientes a un intervalo de 100 años, en la zona de la ciudad de México, el conjunto estructural que mejor respuesta tuvo bajo esas condiciones, también fue el sistema construido con dispositivos Viscoelásticos.
- Los resultados finales establecen que construir marcos de concreto con dispositivos Viscoelásticos en una zona como en la que se encuentra cimentada una buena parte de la ciudad de México tiene un mejor comportamiento que los otros sistemas aquí estudiados.
- En [Esteva y Campos. 1998] se presentaron índices de confiabilidad de estructuras con propiedades similares a los de este trabajo. Los valores de dichos índices son parecidos a los obtenidos en esta tesis para el caso de un sismo fuerte, mientras que los valores resultantes para el caso de las historias de sismos son menores, pero son considerados adecuados porque se trata de un acumulado de 100 años sin considerar reparaciones.
- En este trabajo se ha destacado la importancia y recomendado el uso de dispositivos viscoelásticos, por haber mostrado tener un comportamiento estructural más conveniente, nótese que tanto en el caso del sismo fuerte como en las historias de sismos, el sistema con viscoelásticos tiene una diferencia notable de 2 puntos con respecto a los otros dispositivos. Los otros dos sistemas aquí estudiados (TADAS y U) son también buenas alternativas, ya que ambos presentan índices de confiabilidad similares y adecuados en caso del sismo fuerte, mientras que para las historias aleatorias de sismos, el dispositivo U tiene un mayor índice de confiabilidad.
- Derivado de la eficacia y buen comportamiento que tuvieron los sistemas estructurales dotados con disipadores de energía, producto de la aplicación del criterio de diseño sismo - resistente aquí usado, Se propone que estos criterios sean considerados para futuras ampliaciones y mejoras de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del RCDF [1995] en lo referente a dispositivos especiales sobre disipación de energía.

- Respecto a los valores de índice de confiabilidad de este trabajo, en [Swiden Technology Centre, 2001] se muestran algunos parámetros que permitirían establecer una comparación con los valores aquí obtenidos. En dicha referencia se maneja un índice de confiabilidad de 3.0 para edificios seguros de Estados Unidos. Si se toma ese valor como el parámetro a comparar, para el caso del sismo fuerte, los valores obtenidos en este trabajo fueron superiores a ese valor, lo cual significa que los sistemas aquí tratados tienen una probabilidad de falla similar que algunos edificios construidos en Estados Unidos, y son muy adecuados para su empleo.
- Para el diseño de los disipadores, este trabajo ofrece al lector, una alternativa para encontrar las propiedades y características buscadas para estos elementos, se sabe que ellos tienen un comportamiento histerético y pueden sufrir altos ciclos de aplicación de cargas sin falla; además, han sido utilizados en múltiples pruebas experimentales cumpliendo satisfactoriamente las características que deben tomar para el diseño sísmico de edificios.
- Dentro de la metodología de análisis y diseño se mostró que con el empleo de paquetes disipadores equivalentes (disipadores + contraventeos) facilitaron el manejo de los valores de rigidez y resistencias de los elementos estructurales. Para adecuarlas a las etapas de análisis y diseño, se ofrece un apartado que propone la estimación de estas propiedades para cada uno de los componentes del paquete en forma simultánea.
- Los métodos de evaluación aplicados en este trabajo, definen el deterioro que sufren algunos elementos en algunas de sus propiedades, principalmente rigidez y resistencia, dichos métodos emplean ciertos parámetros de control que involucran ductilidades, además de un espectro de diseño.

## TRABAJOS FUTUROS

- En trabajos de investigación posteriores, se recomienda considerar los costos de mantenimiento, reparación y de consecuencia de los daños, durante el intervalo de estudio de corto y largo plazo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### ARTÍCULOS

**Aguirre, M.**, 1993. "Disipador de energía montable sobre contravientos en U invertida", Informe Interno, Proyecto 2127, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

**Aguirre, M. y Chicurel, R.**, 1975. "Elasto-plastic behavior of an energy absorbing device", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

**Aguirre, M. y Sánchez, R.**, 1989. "Pruebas de elementos disipadores de energía sísmica", Revista Construcción y Tecnología, IMCyC, Vol. 1, No. 10, México.

**Aguirre, M. y Sánchez, R.**, 1992. "A structural seismic damper", J. of Structural Engrg., ASCE, Vol. 118, No. 5, USA.

**Aiken, I. D., Kelly, J. M., y Mahmoodi, P.**, 1990. "The application of viscoelastic dampers to seismically resistant structures", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, USA.

**Aiken, I. D., Eeri, M., Nims, D. K., Whitakker, A. S., Kelly, M. J.**, 1993. "Testing of passive energy dissipation systems", Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3, USA.

**Aiken, I. D., Nims, D. K., Kelly, M. J.**, 1992. "Comparative study of four passive energy dissipation systems", Bulletin N.Z. Nat. Soc. For Earthquake Engineering, Vol. 25, No.3, Nueva Zelanda.

**Ashour, S. A. y Hanson, R. D.**, 1987. "Elastic seismic response of buildings with supplemental damping", Report No. UMCE 87-01, The University of Michigan, Ann Arbor, Mi. USA.

**Buckle, I. G.**, 2000. "Passive control of structures for seismic loads", 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda.

**Campos, D. y Esteva L.**, 1997a. "Modelo de comportamiento histerético y de daño para vigas de concreto reforzado", Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (SMIS), Veracruz, México.

**Campos, D. y Esteva L.**, 1997b. "Bases para criterios de diseño de edificios dotados de elementos disipadores de energía" Proyecto para el Departamento del Distrito Federal; Reporte no. 7537, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

**Campos, D. y Esteva L.**, 1998. "Diseño de edificios con disipadores de energía", Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, SMIE, Monterrey N.L., México

**Campos, D. y Esteva L.,** 2002. "Criterios de diseño sismo – resistente óptimos de edificios con disipadores de energía", Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla, México.

**Chang, K. C., Soong, T. T., Lai, M. L. y Neilsen, E. J.,** 1993. "Development of a design procedure for structures with added viscoelastic dampers", Proceedings of a seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and Active control, ATC-17-1, USA.

**Chang, K. C., Lai, M. L., Soong, T. T., Hao, D. D. y Yeh, Y. C.,** 1993. " Seismic behavior and design guidelines for steel frame structures with added viscoelastic dampers", NCEER 93-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY. USA.

**Chang, K. C., Soong, T. T., Lai, M. L. y Neilsen, E. J.,** 1993. "Viscoelastic dampers as energy dissipation devices for seismic applications", Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3, USA.

**Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S. T. y Lai, M. L.,** 1995. "Seismic behavior of steel frames with added viscoelastic dampers", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 121, No.10, USA.

**Chang, K. C., Shen, K. L., Soong, T. T. y Lai, M. L.,** 1994. " Seismic retrofit of a concrete frame with added viscoelastic dampers", 5<sup>Th</sup> National Conf. Earthquake Engrg, Chicago, Il., USA.

**Cherry, S., EERI, M. y Filiatrault, A.,** 1993. "Seismic response control of buildings using friction dampers", Earthquake Spectra, Vol. 9, No. 3, USA.

**Constantinou, M. C., Symans, M. D., Tsopeles, P., Taylor, D. P.,** 1993. "Fluid viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation", Proc. of seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and active control, ATC 17-1, USA.

**Cruickshank, C.,** 1962. "Funcionamiento de cubetas deflectoras como disipadores de energía en vertedores", revista Ingeniería, No. 3, Vol. XXXII, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

**Echavarría, A., Aguirre, M., Maldonado, J. y López Bátiz, O.,** 1996. "Dynamics behavior of two type of energy dissipation devices "shear-panel" and "oval-shaped steel strips", XI World Conference on Earthquake Engineering, Art. 1505, Acapulco, Gro. México.

**Echegaray y Ladrón de Guevara,** 1997. "Algunos aspectos prácticos del análisis, implementación y diseño de amortiguadores antisísmicos", XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica", Vol. 1, Veracruz, Ver., México.

**Esteva, L., Díaz, O., García, J.,** 1998. "Practical seismic design criteria and life-cycle optimization for structures with hysteretic energy-dissipating devices", Asia-Pacific Workshop on Seismic Design and Retrofit of Structures, Taipei, Taiwan.

**Esteva, L. y Campos, D.,** 1998. "Criterios para el diseño sismo-resistente de edificios de concreto reforzado dotados de disipadores de energía", Proyecto para el Gobierno del Distrito Federal, Reporte no. 8552, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

**FEMA,** 1998. "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of Buildings", FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., USA.

**Foutch, D. A., Wood, S. L., y Brady, P. A.,** 1993. "Seismic retrofit of nonductile reinforced concrete frames using viscoelastic dampers", Proc. ATC-17-1 seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active control, ATC, Vol. 2, Redwood City, USA.

**Fu, Y.,** 1996. "Frame retrofit by using viscous and viscoelastic dampers", Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México.

**Fujita S., Fujita T., Morikawa, S. y Suizo, Y.,** 1991. "Seismic response of steel framed buildings using viscoelastic dampers", trans., 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. 2, Japón.

**Gómez, C., Cruz, J. I., Jara, J. M., Vargas, E.,** 1993. "Estudio paramétrico de estructuras con cables de presfuerzo", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Pto. Vallarta, Jal., México.

**Gómez, C., Rosenblueth, E. y Jara, J. M.,** 1993. "Estudio paramétrico de estructuras con disipadores de energía", Boletín del Centro de Investigación Sísmica, Fundación Barros Sierra, Vol. 3, No. 1, México.

**González Alcorta, R.,** 1998. "Ensaye en mesa vibradora de una estructura con dispositivos disipadores de energía sísmica", Memorias V Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, México.

**González Alcorta, R., Muriá Vila, D., Díaz Najera, D.,** 1994. "Respuesta teórica y experimental de una estructura prototipo con disipadores de energía sísmica, Informe interno, Proyecto 2555, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

**Hsu, S. Y. y Fafitis, A.,** 1992. "Seismic analysis and design of frames with viscoelastic connections", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 118, No.9. USA.

**Jara, M. J.,** 1994. "Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores", Revista de Ingeniería Sísmica, No. 47, México.

**Jara, J. M., Vargas, E., Galindo, C., González, R., y Gómez, C.,** 1992. "Seismic performance of buildings with energy dissipating systems", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España.

**Kelly, J. M. y Skinner, M. S.** 1980. "The design of Steel Energy-Absorbing Restrainers and their Incorporation into Nuclear Power Plants for Enhanced Safety: (Vol 2): Development and Testing of Restraints for Nuclear Piping Systems", Report No. UCB/EERC-80/21, Earthquake Engineering Research Center; University of California, Berkeley, USA.

**Kelly, J. M., Skinner, R. I. y Heine, A. J.,** 1972. "Mechanisms of energy absorption in special devices for using in earthquake resistant structures". Bulletin of New Zealand Nat. Soc. for Earthquake Engineering, Nueva Zelanda.

**Kirekawa, A., Ito, Y. y Asano, K.,** 1992 "A study of structural control using viscoelastic material", Proceedings of the Tenth world Conference on Earthquake Engineering, Vol. 4, Madrid, España.

**Lin, R. C., Liang, Z., Soong, T. T. and Zhang, R. H.,** 1988. "An experimental study of seismic structural response with added viscoelastic dampers", National Center for Earthquake Engineering Research, Report NCEER-88-0018, Buffalo, NY., USA.

**Lin, R. C., Liang, Z., Soong, T. T. and Zhang, R. H., Mahmoodi, P.,** 1991. "An experimental study on seismic behavior of viscoelastically damped structures", Engineering Structures, Vol. 13, USA.

**Meli, R.,** 1976. "Bases para los criterios de diseño estructural del proyecto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Serie del Instituto de Ingeniería No. 375, UNAM, México.

**Miner, M. A.,** 1945. "Cumulative damage in fatigue", Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, Trans, ASME. USA

**Miranda, E., Alonso, J. y Lai, M. L.,** 1998. "Performance-based design of a building in Mexico City using viscoelastic dampers", VI National Conference on Earthquake Engineering, IC-3, Seattle, USA.

**Mirza, S. A., y McGregor, J.,** 1979. "Variations in dimensions of reinforced concrete members", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST4.

**Mitchel, G. R., y Woodgate, R. W.,** 1971. "Floor loadings in offices. The results of a survey", Dept. of Envir. Build. Res. Estali, cp 3/71, Garston.

**Miyamoto, S. K.,** 2000. "State of the art applications of passive energy dissipators", 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda.

**Park, Y. J. y Ang, A. H. S.**, 1985. "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", J. Struct. Engrg. ASCE, Vol. 3, No. 4, USA.

**Ruíz, S. E. y Alvarez, J. L.**, 1995. "Panorámica sobre la reglamentación de edificios con dispositivos reductores de la respuesta sísmica", Riesgo Sísmico y Reglamentación de Diseño, IV Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Oaxaca, Oax., México.

**Ruíz, E., Mejía, R. y Ruíz, S. E.**, 1996. "Comparative study of a multistory frame with energy dissipation devices and without them", XI World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Gro. México.

**Ruíz, S. E.**, 1992. "Análisis estructural y costos de edificios con aisladores sísmicos". Revista de Ingeniería Sísmica, No. 44, México.

**Ruíz, S. E.**, 1998. "Alternativas para controlar la respuesta sísmica de los edificios, Trabajo de ingreso a la Academia Mexicana de Ingeniería, Octubre, México.

**Ruíz, S. E.**, 1998. "Revisión sobre el desarrollo de disipadores de energía sísmica en México", Memorias V Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica. México.

**Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. W. y Chung, R. M.**, 1996. "Passive energy dissipation devices for seismic applications", Technical report NISTIR-5923, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.

**Sadek, F., Mohraz, B. y Riley, M. A.**, 2000. "Improved linear procedures for analysis of structures with passive energy dissipation devices", 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda.

**Sánchez Martínez, J. L.**, 1993. "Ideas relativas al comportamiento estructural de construcciones rigidizadas con elementos metálicos", III Simposio Internacional de Estructuras de Acero y VI Simposio Nacional de Estructuras de Acero, IMCA, Vol. II, México.

**Sánchez, R. A. R.**, 1991. "Disparador automático para pruebas de tracción en estructuras", Memorias IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, VIII Congreso nacional de Ingeniería Estructural, Vol. 1, Colima, México.

**SEAOC**, 1998. "Provisions for Implementing Energy Dissipation Devices", Structural Engineers Association of California. USA.

**SEAONC**, 1993. "Tentative general requirements for the design and construction of structures incorporating discrete passive energy dissipation devices", Structural Engineering Association of Northern, Calif., USA.

**Seki, M., Katsumata, H., Uchida, H. y Takeda, T.,** 1988. "Study on Earthquake Response of Two-Storied Steel Frame with Y-Shaped Braces", Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. IV, Japon.

**Scholl, R. E.,** 1993. "Design criteria for yielding and friction energy dissipators", Proc. ATC-17-1 seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active control, ATC, Vol. 2, Redwood City, USA.

**Shen, K. L. y Soong, T. T.,** 1995. "Modeling of viscoelastic dampers for structural applications", J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 121, No. 6. USA.

**Shen, K. L. y Soong, T. T.,** 1996. "Design of energy dissipation devices based on concept of damage control", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 122, No.1, USA.

**Shin, M. H.,** 2000. "Structural semi-active control device", 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda.

**Silva, F. L. y Ruíz, S. E.,** 1993. "Consideraciones sobre el diseño sísmico de marcos con dispositivos disipadores de energía", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.

**Skinner, R. I., Kelly, J. M. y Heine A. J.,** 1973. "Energy absorption devices for earthquake-resistant structures" Fifth World Conference on Earthquake Engineering. Italia.

**Soong, T. T. y Mahmoodi, P.,** 1990. "Seismic behavior of structures with added viscoelastic dampers", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, Cal., USA.

**Soong, T. T. y Spencer Jr, B. F.,** 2000. "Active, Semi-active and hybrid control of structures", 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda.

**Su, Y. F.,** 1990. "Aseismic Design of Building Structures with ADAS Devices", Report to the Sinotech Engineering Consultants, Inc., Su and Structures Engineers Corporation, Taiwan.

**Swiden Technology Centre,** 2001. "Methods, Applications and Software for Structural Reliability Assessment". Reporte SL/WEM/R/M8663/5/01/6, Corus UK Limited, United Kingdom.

**Tena Colunga, A.,** 1998. "Modelado analítico con disipadores de energía. Aplicaciones en proyectos de reparación", Memorias V Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica. México.



**Tsai, K. C., Li, J. W., Hong, C. P., Chen, H. W., Su, Y. F.,** 1993 “Welded steel triangular plate device for seismic energy dissipation”, Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, Vol. 2, Sn. Fco., Cal., USA.

**Tsai, C. S. y Lee, H. H.,** 1993. "Application of viscoelastic dampers to high-rise buildings", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 119, No. 4, USA.

**Tsai, K. C., Hong, C. P. y Su, Y. F.,** 1992. “Experimental Study of Steel Triangular Plate Energy Absorbing Device For Seismic-Resistant Structures”, Report No CEER/R81-08, Center for Earthquake Engineer Research, National Taiwan University, Taiwan.

**Tsai, K. C. y Chen, H. W.,** 1992. “Seismic response of Building Structures using Steel Triangular Plate Energy Dissipators”, Report No CEER/R81-09, Center for Earthquake Engineer Research, National Taiwan University, Taiwan.

**Tsai, K. C. and Hong, C. P.,** 1992. “Steel Triangular Plate Energy Absorber for Earthquake-Resistant Buildings”, Proceedings, the First World Conference on Constructional Steel Design, Acapulco, México.

**Tsai, K. C., Chen, H. W. and Wang, T. F.,** 1993. “Steel Plate Energy Absorber for Improved Earthquake Resistance”, Proceedings of the Structure Congress, ASCE, USA.

**Tsai, K. C. and Li, J. W.,** 1993. “Experimental Study of TADAS Device using Pseudodynamic substructure testing procedures”, Center for Earthquake Engineer Research, National Taiwan University, Taiwan.

**Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P. and Su, Y. F.,** 1993. “Design of Steel triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction”, Theme Issues on Seismic Dampers, EERI.

**Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P., Li, J. W. and Su, Y. F.,** 1993. “Welded Steel Triangular Plate device for Seismic Energy Dissipation”, Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, Vol. 2, ATC, USA.

**Vera, R. y Ramírez de Alba, H.,** 1996. “Panel con dispositivos disipadores de energía”, X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, SMIE, Vol. II, Zacatecas, México.

**Villanueva, J. M., y Meli, R.,** 1984 “Análisis estadístico de propiedades mecánicas de acero de refuerzo producidos en México”, Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

**Whittaker, A., Bertero, V. V., Alonso, J.,** 1989. "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-89/02, University of California at Berkeley, USA.

**Zhang, R. H. and Soong, T. T.,** 1992. "Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 118, No. 5, USA.

## **LIBROS DE TEXTO Y REGLAMENTOS**

**Bazán, E., Meli, R.,** 1999. "Diseño sísmico de edificios", Editorial Limusa, México.

**Collins, J. A.,** 1993. "Failure of Materials in Mechanical Design", John Wiley & Sons., USA.

**Departamento del Distrito Federal.,** 1993. "Reglamento de construcciones para el Distrito Federal", Diario Oficial de la Federación, 2 Agosto, México.

**Departamento del Distrito Federal.,** 1995. "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", Gaceta Oficial del Distrito Federal, 27 Febrero, México.

**Departamento del Distrito Federal.,** 1996. "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Gaceta Oficial del Distrito Federal, 25 Marzo, México.

**Ferry , J. D.,** 1980. "Viscoelastic properties of polymers", John Wiley, NY, USA.

**Instituto Mexicano de la Construcción en Acero.,** 1987. "Manual de Construcción en Acero", Editorial Limusa, México.

## **TESIS**

**Aguilar, R. R.,** 1998. "Comportamiento histerético de dispositivos disipadores de energía tipo panel de cortante", Tesis de maestría en ingeniería, DEPFI, UNAM, México.

**Alamilla, J.** 1996. "Procesos estocásticos y simulación de acelerogramas sísmicos en el Valle de México", Tesis de maestría, DEPFI, UNAM, México.

**Alvarez Ruiz, J. L.,** 1997. "Influencia de la carga axial en el comportamiento de disipadores de energía tipo TADAS y ADAS", Tesis de maestría en ingeniería, DEPFI, UNAM, México.

**Campos, D.,** 2005. "Diseño óptimo de edificios con disipadores de energía", Tesis Doctoral en Desarrollo, DEPFI, UNAM, México.

**García, K. M. M.**, 1998, "Comportamiento sísmico de puentes con mecanismos disipadores de energía", Tesis de maestría, DEPFI, UNAM, México.

**Limón Sánchez, L. A.**, 1997, "Análisis y diseño de marcos estructurales con disipadores de energía sísmica y con contravientos", tesis de maestría, SEPI – ESIA, IPN, México.

# CARACTERÍSTICAS DE LOS DISIPADORES TIPO: TADAS, U Y VISCOELÁSTICOS

## A.1 Clasificación de los disipadores de energía

En años recientes el desarrollo y empleo de los disipadores de energía han tenido un gran impulso y difusión, gracias al esfuerzo de empresas e instituciones de investigación que han dedicado mucho tiempo al estudio analítico y experimental de estructuras con estos sistemas.

Según su funcionamiento ó nivel de control, los disipadores de energía sísmica que existen en la actualidad, pueden ser clasificados en 3 grupos: dispositivos de control activo, dispositivos de control semi-activo y dispositivos de control pasivo.

### A.1.1 Dispositivos de control activo

Tienen por objeto atenuar las vibraciones de una estructura mediante la aplicación de fuerzas externas ó cambios en las propiedades mecánicas de la estructura, como funciones instantáneas de la respuesta sísmica del edificio y controlada mediante un sistema de información electrónica. Su empleo requiere de una fuente de energía, lo cual puede resultar crítico durante un evento sísmico ya que la fuente de energía principal de la estructura puede fallar.

Entre los dispositivos más comunes que forman parte de este grupo, se encuentran los siguientes: masa activa, tendones activos y dispositivos de fricción activos.

### **A.1.2 Dispositivos de control semi-activo**

Sistema desarrollado que combina las mejores características de los sistemas de control pasivo y activo, estos sistemas ofrecen la adaptabilidad de los dispositivos de control activo sin necesidad de usar grandes fuentes de poder, en realidad muchos de ellos operan con baterías para mantener en operación el equipo de control (computadora, sensores, actuadores, etc), lo cual los vuelve más estables, además de que requieren una baja demanda de energía [Soong y Spencer Jr. 2000].

Extensos estudios indican que implementar apropiadamente sistemas de control semi-activos, tienden a desarrollarse significativamente mejor que los dispositivos pasivos y tienen el potencial para lograr un mejor desempeño que la totalidad de los sistemas activos existentes, permitiendo así una reducción en la respuesta durante las condiciones de cargas dinámicas.

### **A.1.3 Dispositivos de control pasivo**

Responden al movimiento de manera propia, es decir, sin hacer uso de medios que lo accionen, se agrupan en:

**1) Disipadores de energía.** Se ubican generalmente en contraventeos. Su función principal es disipar la energía sísmica incidente mediante comportamiento histerético ó agregando amortiguamiento al sistema. De acuerdo a la forma como disipan energía, estos dispositivos comprenden la siguiente clasificación:

#### **a) Dispositivos histeréticos**

El comportamiento que se tiene en este tipo de dispositivos se muestra en la figura I.4.1, las características de esta gráfica indican que la pendiente, en la parte inelástica, está sujeta a las características propias de cada dispositivo, además, existe mayor disipación de energía entre más grande sea el área encerrada por la gráfica, debido a lo anterior, estos dispositivos se subdividen de la siguiente forma:

**Compresión.** La disipación de energía se logra cuando los elementos estructurales, que contienen los dispositivos, trabajan a compresión e inducen sobre éstos, deformaciones en la misma dirección.

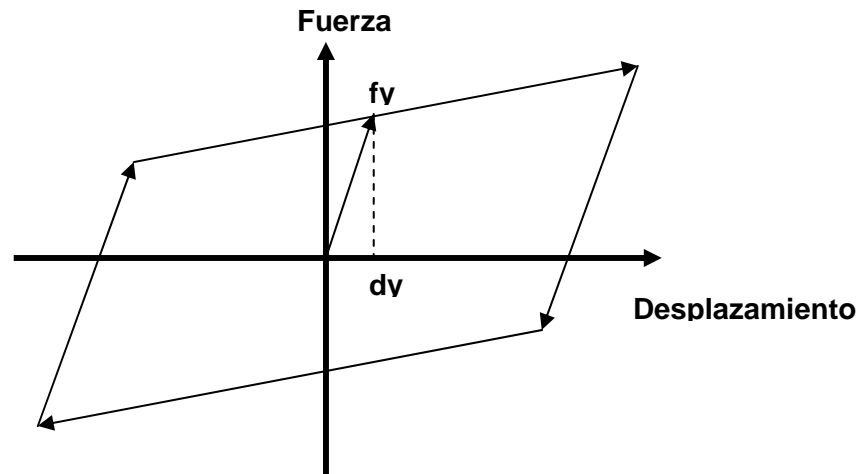


Figura A.1. Comportamiento histerético.

**Flexión.** Estos elementos permiten la disipación de energía, a través de la fluencia del material, al someterlos a deformaciones por la flexión, en este grupo se encuentran los dispositivos ADAS y TADAS.

**Cortante.** Este tipo de disipador consta de un elemento de acero de poca longitud, de sección transversal en forma de H, colocado de tal forma que la placa del alma coincide con el sentido de aplicación de la carga. La liberación de energía se logra al deformarse inelásticamente dicha placa por la acción del esfuerzo cortante, ver [Seki *et al.* 1988].

**Rolado por flexión.** El sistema está compuesto por 2 placas en forma de U acopladas en la parte central a un nivel diferente que al de sus caras extremas (figura A.2), al deslizarse una cara con respecto a la otra, los desplazamientos relativos entre los niveles ocasionan el movimiento conocido como rolado por flexión mediante el cuál se disipa energía.

**Tensión.** La disipación de energía se basa en la plastificación del material al someterse a esfuerzos de tensión, dependiendo de la geometría de su sección transversal y de la velocidad con que se aplica la carga.

**Torsión.** El comportamiento histerético se logra cuando los dispositivos, colocados de acuerdo a una localización preestablecida, son sometidos a deformaciones por torsión.

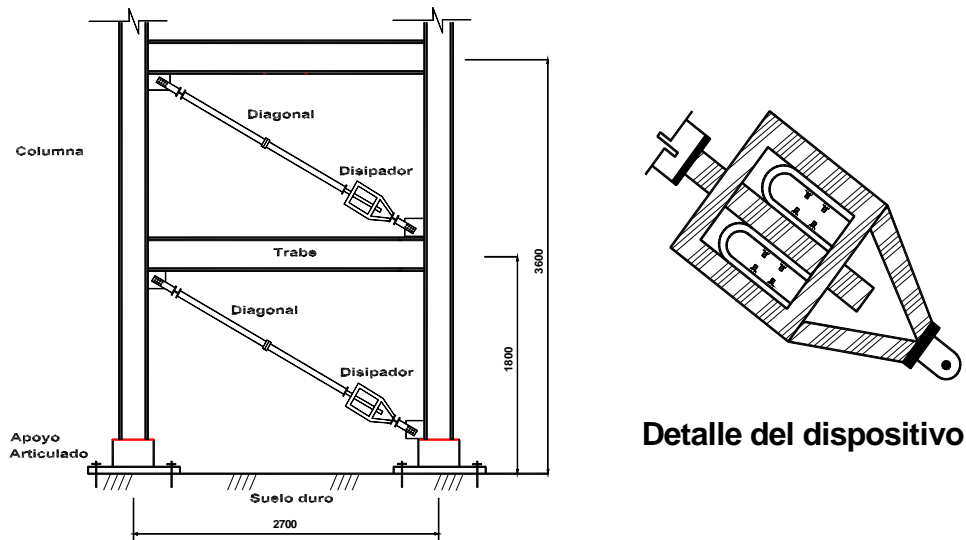


Figura A.2. Dispositivos en forma de U [González Alcorta. 1994].

**Contraventeos concéntricos.** Una forma de reducir la respuesta con comportamiento plástico en la estructura misma, consiste en colocar una barra diagonal desde el nudo del nivel inferior hasta un punto distante del nudo del nivel superior, o bien empleando dos barras diagonales colocadas en su parte inferior en cada uno de los nudos que delimitan la cruzía, mientras que en su extremo superior van a la parte central de la viga sin que se conecten en el mismo punto, ocasionando que la parte de la viga, entre ambos contraventeos, fluya por cortante y disipe energía.

### b) Disipadores de energía por extrusión

Este dispositivo consiste en hacer pasar, a través de un tubo cuya sección transversal varía a lo largo de su longitud, una cierta cantidad de plomo el cual, al deformarse, disipa energía. Cuando el plomo deja de deformarse se cristaliza y recobra sus propiedades originales.

### c) Disipadores de energía por fricción

Este sistema consiste en colocar dos placas en el punto de intersección de 2 contraventeos colocados en forma de cruz, de tal forma que al desplazarse lateralmente la estructura se generen esfuerzos por fricción debido al roce entre las placas, en dicha intersección.

#### d) Disipadores con comportamiento viscoelástico

Su colocación es similar a los disipadores de energía por fricción pero difieren de estos por su comportamiento viscoelástico; la viscosidad es una propiedad que tienen algunos materiales de resistirse a fluir. Al disipar energía el elemento viscoso realiza trabajo mecánico generando calor. Sus propiedades dependen tanto de la magnitud y velocidad de la carga como de la temperatura.

**2) Osciladores resonantes.** Estos dispositivos establecen la inclusión en una estructura de uno o varios sistemas vibratorios, con propiedades dinámicas como: masa, rigidez y amortiguamiento, con ellas es posible modificar las propiedades dinámicas originales de una estructura, el procedimiento es el siguiente: al aplicar fuerzas armónicas al sistema, la masa de la estructura no sufre ningún desplazamiento mientras la masa del oscilador vibra, así la fuerza en su resorte se conserva igual pero en sentido opuesto a la dirección de la fuerza excitadora.

**3) Cables de Presfuerzo.** Se trata de sistemas de contraventeos los cuales, en realidad, no tienen capacidad para disipar energía, sin embargo incrementan la rigidez y resistencia de las estructuras que los contienen lo cual los convierte en una alternativa más de solución en la reducción de daño sísmico.

#### e) Disipadores con comportamiento viscoso

Estos dispositivos se caracterizan porque al deformarse desarrollan fuerzas que son proporcionales a su velocidad de deformación, el caso más típico es el de un cilindro con un pistón y uno o varios orificios por los que puede escurrir un fluido viscoso, ver [Ruíz. 1998].

### A.2 Disipadores de energía tipo TADAS

Los disipadores de energía tipo TADAS, debido a su funcionamiento, están clasificados como dispositivos de control pasivo histerético a flexión.

El dispositivo TADAS consta de una placa triangular de acero, similar a la mitad de una placa ADAS, también pueden ser colocados en paquete varias de ellas, en uno de sus lados se empotra a otra placa de acero, conectada al nivel superior del entrepiso. En el vértice inferior del triángulo se coloca un perno que se conecta a los contraventeos que parten del nivel inferior del entrepiso.

Cada placa triangular se inserta a la placa base para fijarlas, antes que la soldadura sea aplicada.

Los TADAS son una variante de los dispositivos ADAS, y pueden alcanzar las mismas características de rigidez, resistencia y disipación de energía que estos, y con un menor efecto de la carga axial



Marcos estructurales con estos dispositivos, han sido aplicados en zonas con un alto riesgo sísmico

El ciclo fuerza - deformación de los especímenes probados de dispositivos TADAS, se muestran en la figura II.7, se puede ver desde la figura que un dispositivo TADAS, sometido a incrementos de carga cíclica, los efectos de los esfuerzos son muy pronunciados cuando se desarrollan grandes deformaciones en el dispositivo.

La variación de la sección transversal es ocasionada por el desplazamiento de niveles, uno con respecto al otro, produciendo una deformación en curvatura simple sobre las placas, como consecuencia de esto, al empotrarse uno de los extremos, se genera un diagrama de esfuerzos casi uniforme a lo largo de su longitud que es distinto en su eje neutro, por ello se explica la forma triangular que se tiene, Adicionalmente, en pruebas experimentales realizadas, se ha comprobado que la distribución de esfuerzos por flexión es triangular.

El funcionamiento de estos dispositivos es el siguiente: Al imponer un desplazamiento lateral finito al marco, y perpendicular al plano de la placa triangular (figura A.3), que esta empotrada en su lado superior y simplemente apoyada en su extremo inferior. La curvatura producida por la carga aplicada, se distribuye uniformemente, ocurriendo la fluencia simultánea a todo lo alto de la placa.

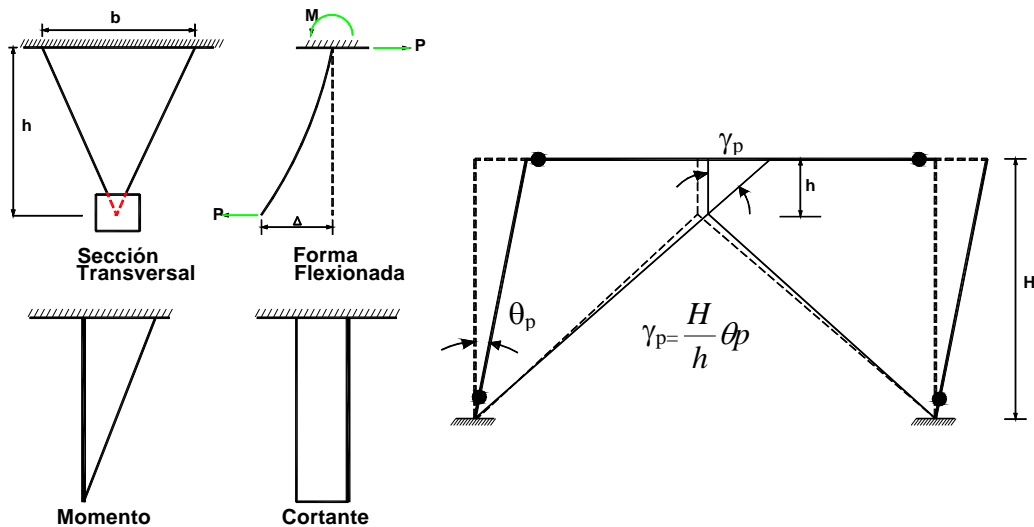


Figura A.3. Comportamiento básico de la placa triangular sometida a carga y mecanismo de disipación de energía.

En experimentos sobre marcos de prueba realizados por [Tsai *et al.* 1993] se emplearon dimensiones en las placas TADAS mostradas en la Tabla A.1.

**Tabla A.1. Dimensiones de las placas TADAS usadas por Tsai en marcos de prueba.**

Nivel	t (mm)	h (mm)	b (mm)	N (n. de placas)	$\Delta y$ (mm)
1	36	325	177.6	8	3.6
2	36	325	178.5	5	3.6

La rigidez lateral  $K_d$  del TADAS es:

$$K_d = \frac{NEbt^3}{6h^3} \quad (A.1)$$

Donde  $E$  es el módulo de Young,  $N$  es el número de placas triangulares del dispositivo,  $t$  es el espesor de las placas,  $b$  y  $h$  son el ancho y altura respectivamente.

La fuerza de fluencia  $P_y$ , y la fuerza plástica  $P_p$  del dispositivo son:

$$P_y = \frac{F_y N b t^2}{6h} \quad (A.2)$$

$$P_p = \frac{F_y N b t^2}{4h} \quad (A.3)$$

el desplazamiento de fluencia  $\Delta y$ , es:

$$\Delta y = \frac{F_y h^2}{Et} \quad (A.4)$$

donde  $F_y$  representa el esfuerzo de fluencia a tensión, si el ángulo de giro,  $\gamma$ , del dispositivo se define como el cociente del desplazamiento lateral entre la altura de la placa triangular, entonces se puede definir  $\gamma_y$ , como:

$$\gamma_y = \frac{F_y h}{Et} \quad (A.5)$$

Cuando se combina el dispositivo TADAS con un contraventeo en un marco, el elemento TADAS no sólo proporciona rigidez lateral adicional, sino también amortiguamiento histerético cuando se rebasa una respuesta específica del marco. Suponiendo comportamiento plástico de los miembros, la figura A.3 muestra el mecanismo de disipación del marco con TADAS.

De la geometría del mecanismo, la demanda rotacional inelástica del dispositivo TADAS puede calcularse de la siguiente forma:

$$\gamma_p = \theta_p \frac{H}{h} \quad (\text{A.6})$$

donde  $H$  es la altura del entrepiso y  $\theta_p$  es el ángulo de rotación plástico.

Por otra parte, se realizaron pruebas cíclicas a dispositivos TADAS para conocer su comportamiento ante este tipo de solicitaciones [Tsai *et al.* 1993]. Los especímenes experimentales fueron de acero A-36, articulados en la punta de la placa triangular y empotrados en el extremo opuesto mediante soldadura calificada y sujetos a la carga de un actuador hidráulico (figura A.4).

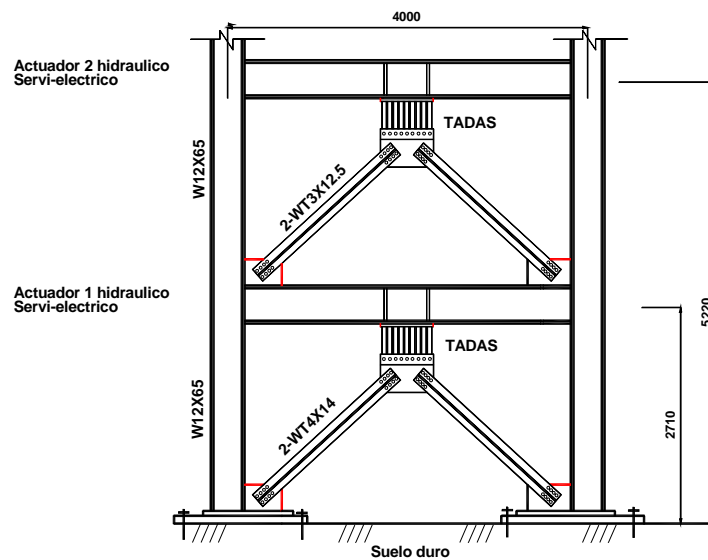


Figura A.4. Prueba pseudodinámica de un marco TADAS de 2 niveles.

Al revisar el comportamiento fuerza-deformación del dispositivo se encontró, que este puede sostener un gran número de ciclos de fluencia reversible sin ningún signo de degradación de rigidez o resistencia. Además, la rigidez elástica del dispositivo es bastante predecible si se consideran solamente deformaciones por flexión.

Resultaría muy difícil hacer trabajar a los dispositivos TADAS en un arreglo con diagonales concéntricas (figura A.5.a), pues se requerirían detalles de conexión muy complicados entre las diagonales y los elementos estructurales del marco convencional para garantizar el adecuado trabajo de los dispositivos [Tena. 1998], por lo que el mejor arreglo para utilizar los dispositivos TADAS es montarlos en contraventeos tipo chevrón (figura A.5.b)

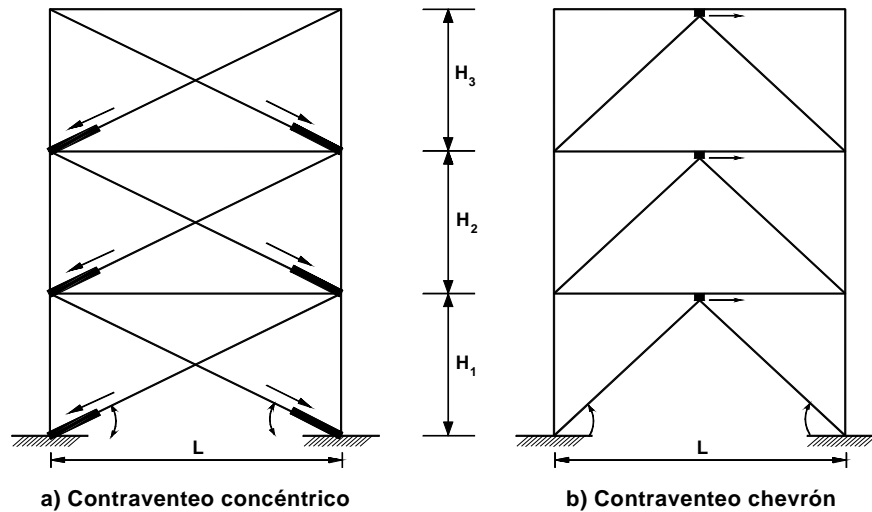


Figura A.5. Formas convencionales de montar dispositivos disipadores de energía en estructuras.

El reemplazo de la placa ó placas que forman este dispositivo, debe llevarse a cabo una vez que ha sido solicitado por un sismo y presenta fisuras ó una falla total en estos elementos, con esto se confirma el fácil reemplazo y colocación de ellas.

### A.3 Disipadores de energía tipo U.

Los disipadores de energía tipo U, también son llamados tipo solera, porque están hechos con solera de acero comercial. Considerando la clasificación descrita en el capítulo I, esta clase de disipadores se localiza en los disipadores de control pasivo, y rolado por flexión.

Este dispositivo consta de 2 placas en forma de U, las cuales están hechas de acero comercial, cuya sección es de 1.3 cm de espesor por 3.8 cm de ancho, el resto de sus propiedades geométricas se pueden apreciar (figura I.4.1), dichas placas están unidas entre sí, a un nivel inmediato a ellas, y en el otro extremo de cada una de ellas a otro nivel estructural mediante barras.

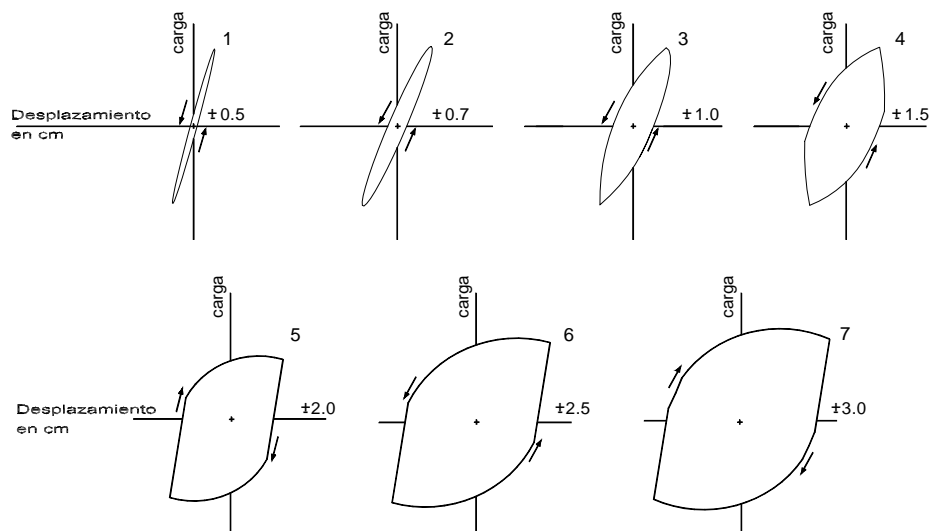
Los dispositivos tipo U operan bajo el concepto denominado: *rolado por flexión*, los desplazamientos relativos ocasionados por la energía sísmica en las placas en forma de U, ocasionan un movimiento semejante a las orugas de un tractor, mediante el cual disipan la energía sísmica.

Hasta la fecha, no se han construido marcos estructurales con la inclusión del disipador de energía aquí tratado, sin embargo, se han realizado múltiples estudios para dar una solución estructural satisfactoria para edificios con periodos de vibración intermedios ubicados en terrenos con periodos dominantes bajos.

Análisis paramétricos de un sistema de un grado de libertad con disipadores de energía y demandas de ductilidad de 2 y 4, mostraron que el intervalo en periodos convenientes para estos sistemas en la zona blanda de la ciudad de México, son los inferiores a 1.6 s [Gómez *et al.* 1993].

La figura A.6 muestra los resultados de ensayos complementarios para estimar la influencia de la amplitud de la excitación en el comportamiento de los elementos. Las pruebas de fatiga con frecuencia constante de 0.50 Hz. fueron hechas con amplitudes de 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0, efectuándose 2 pruebas para cada una de las amplitudes, empleando un juego de 2 soleras y aplicando ciclos de deformación hasta causar la falla de alguna de las soleras.

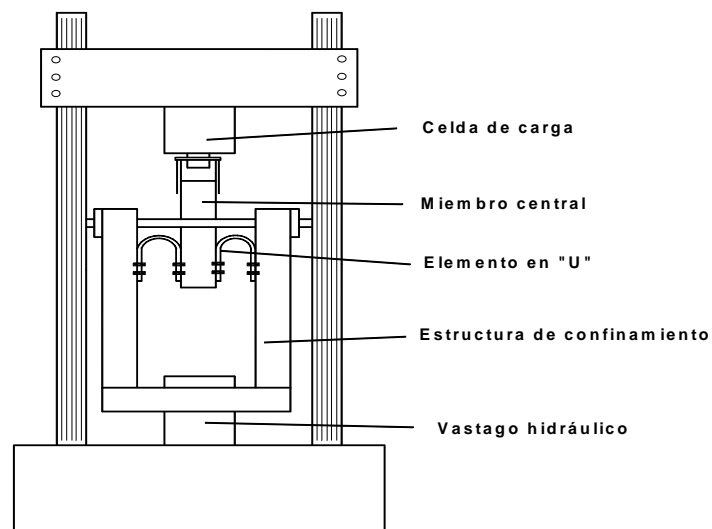
Su comportamiento histerético es muy estable (figura A.6) y por la forma en que se deforman, alcanzan la fluencia en casi toda la sección transversal al mismo tiempo. El número de ciclos de carga y descarga que soportan depende de la amplitud de deformación (figura A.8).



**Figura A.6. Anillo histerético para diferentes amplitudes del movimiento del ciclo aplicado para dispositivos tipo U.**

Los dispositivos tipo solera tienen una forma práctica y simple de ser reemplazados, esto tiene que realizarse cuando las placas U presentan ligeras fisuras, se recomienda hacer una inspección detallada sobre ellas, inmediatamente después de un evento sísmico.

Para probar el funcionamiento de este dispositivo se han aplicado marcos de carga en maquinas de prueba (figura A.7), para tal efecto, es necesario que el marco tenga un elemento estructural central conectado a una celda de carga, conectada a la viga transversal de la maquina, a ambos lados del elemento central, se tienen elementos que junto con 2 barras espaciadoras al frente y 2 atrás forman una estructura confinante, la cual va atornillada a un elemento transversal afianzando el émbolo hidráulico de la máquina.



**Figura A.7. Dispositivo para prueba de elementos en forma de U.**

Además se aplica un desplazamiento controlado sobre el dissipador U con un movimiento de tipo armónico, y las placas del dissipador tienen que desplazarse una con respecto a la otra, la prueba se detiene cuando alguno de sus elementos sufre alguna rotura parcial o total.

Cuando los dispositivos se colocan en un arreglo con contraventeos concéntricos (figura A.5.a), trabajan con mayor eficiencia en la misma dirección que las diagonales, es decir axialmente, mientras que en un arreglo con contraventeos tipo chevrón (figura A.5.b), trabajan en la dirección horizontal, oblicua a las diagonales.

La rigidez elástica inicial del dispositivo U es:

$$Kd = n(0.297\sigma_u b) \quad (\text{A.7})$$

Donde  $n$  es el número de placas en forma de U que forman parte del dispositivo,  $\sigma_u$  es el esfuerzo último del acero, con el cual se hace la solera,  $b$  es el ancho de cada solera,  $e$  es el espesor de cada solera.

La capacidad última  $F_u$  del dispositivo solera está dado por:

$$F_u = n(0.07\sigma_u be) \quad (\text{A.8})$$

El desplazamiento de fluencia del dispositivo, es:

$$\Delta_y = 0.1782e \quad (\text{A.9})$$

Pruebas experimentales realizadas, demuestran que el desplazamiento último del dispositivo debe limitarse a:

$$\Delta_u = 2e \quad (\text{A.10})$$

La fuerza de fluencia  $F_y$  y la rigidez posterior a la fluencia  $K_2$  del dispositivo que definen su comportamiento bilineal, son:

$$F_y = 0.756F_u \quad (\text{A.11})$$

$$K_2 = 0.032Kd \quad (\text{A.12})$$

Un cambio significativo en el periodo de ciclo de carga afecta sólo levemente la capacidad de carga y el número de ciclos a la falla. Esto implica que estos dispositivos se pueden usar en estructuras, sin importar el periodo natural de vibrar, la oxidación del material acorta sensiblemente el número de ciclos a la falla.

La figura A.8, relaciona la amplitud del ciclo de deformación con el número de ciclos a la falla por fatiga del material, en ella se aprecia que el número de ciclos para alcanzar la falla para un desplazamiento de 2.5 cm es de aproximadamente 100 ciclos, mientras que para un desplazamiento de 1.0 cm el número de ciclos crece notablemente, hasta alcanzar un valor aproximado de 1000.

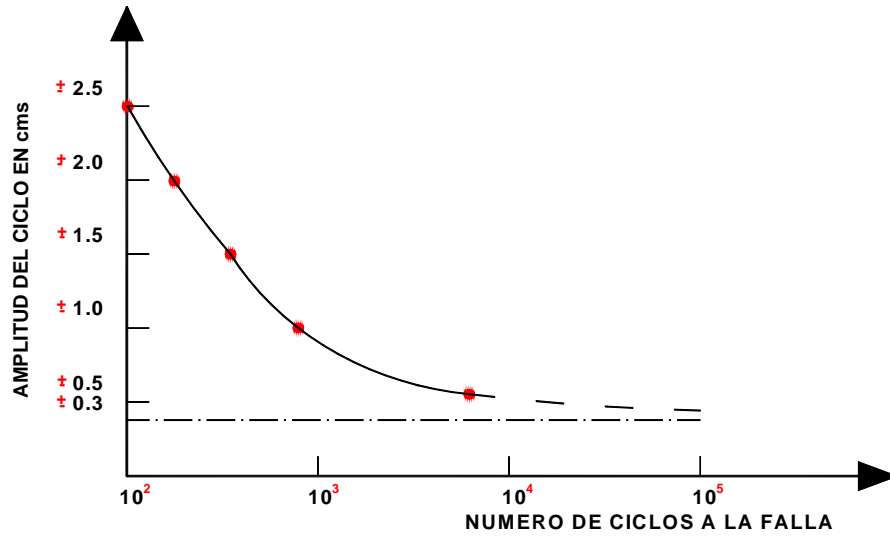


Figura A.8. Curva de fatiga de dispositivos tipo U.

#### A.4 Disipadores de energía tipo VISCOELÁSTICOS

Los disipadores de energía tipo viscoelástico, están clasificados como dispositivos de control pasivo, de material con comportamiento viscoelástico.

Un dispositivo viscoelástico típico por corte, consiste de capas viscoelásticas que son separadas por placas de acero (figura A.9a y figura A.9b) cuando se montan a una estructura, deformaciones por corte y consecuentemente la disipación de energía toman lugar, esto es, cuando ocurren movimientos relativos entre el centro de la placa y el extremo exterior, el resto de sus propiedades geométricas pueden ser observadas en la siguiente figura:

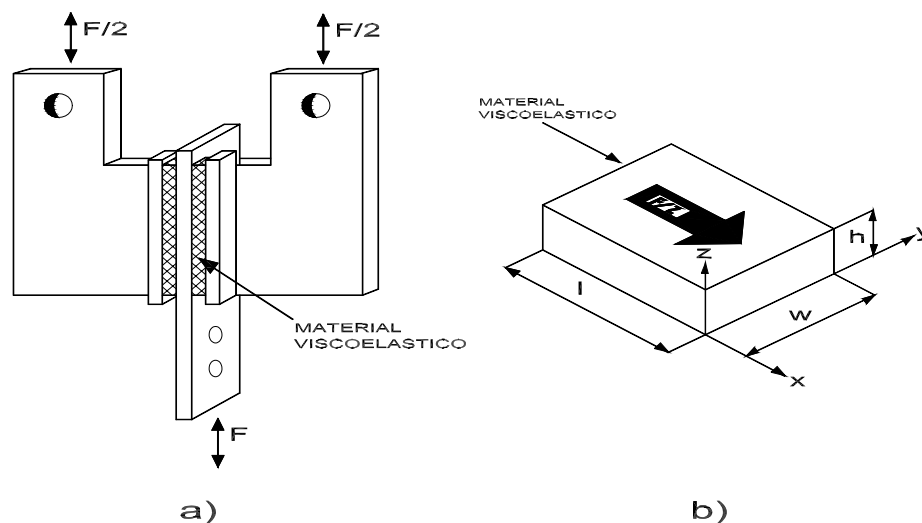


Figura A.9. Amortiguador viscoelástico típico.



Han sido desarrollados diferentes modelos con estos dispositivos, para determinar la dependencia de estos sobre la temperatura ambiental y la frecuencia de la excitación, basados en conceptos tales como el método de reducción de variables [Ferry. 1980], derivadas parciales [Tsai y Lee. 1993] y el principio de superposición de Boltzmann [Shen y Soong. 1995].

Un tipo de dispositivo, hecho de capas viscoelásticas separadas (polímeros acrílicos) ha sido desarrollado por la compañía estadounidense 3M para controlar las vibraciones de viento inducidas en edificios.

La forma de reemplazo de estos dispositivos se debe hacer cuando uno de los 2 siguientes casos se presente primero: cuando algunas de las placas del dispositivo falle, o bien, cuando el material VE debido al uso pierda sus propiedades.

Es decir, cuando al ser demandada por un sismo, no pueda recuperar su estado original.

Estos dispositivos han sido exitosamente aplicados en edificios muy altos para reducir la respuesta sísmica y las oscilaciones del viento, sin embargo, en años recientes se han empleado en estructuras, en las cuales se busca que la capa viscoelástica sufra deformaciones por corte, algunos autores han descrito estos dispositivos para reducir eficientemente la respuesta dinámica de estructuras.

El funcionamiento de este dispositivo implica la aplicación de fuerzas longitudinales (figura A.9.a) sobre las placas de acero del dispositivo, y debido al corte directo de las capas del material viscoelástico (figura A.9.b) disipan una cierta cantidad de energía como calor, tal material exhibe características de sólido elástico y líquido viscoso cuando se deforman, es decir, retornan a su forma original después de cada ciclo de deformación.

En pruebas realizadas se ha demostrado que los marcos de prueba son favorecidos si son colocados en contraventeos tipo chevrón.

Observaciones profesionales y experimentos de laboratorio han mostrado que, para viento y excitaciones sísmicas, el incremento de temperatura para un dispositivo viscoelástico, es usualmente menor a 10° C, el cual tiene un menor efecto en el desarrollo de los disipadores.

A continuación se describe un procedimiento de diseño de disipadores viscoelásticos.

a) *Análisis de la estructura.* Los resultados analíticos obtenidos con el programa de cómputo DRAIN – 2D muestran que se pueden formar articulaciones plásticas sobre la estructura convencional bajo la acción de ciertos sismos, siendo los disipadores viscoelásticos una opción para lograr el diseño esperado.

b) *Determinación de la relación de amortiguamiento.* La relación de amortiguamiento en general puede ser determinada del espectro de respuesta de los sismos de diseño, se puede aplicar una relación de amortiguamiento equivalente del 15% para el diseño de los disipadores viscoelásticos.

c) *Selección del sitio de colocación del dispositivo.* Los disipadores viscoelásticos pueden ser colocados en cualquier sitio sobre la estructura, siempre y cuando en esa misma zona ocurran deformaciones por corte, usualmente estos disipadores son colocados en los contraventeos, el ángulo entre los miembros varía dependiendo sus dimensiones.

d) *Diseño de los disipadores.* La selección de la rigidez amortiguada  $k'$ , y el factor de pérdida  $\eta$  pueden ser elegidos erróneamente.

Ellos se pueden determinar basados en el principio que la rigidez adicional es proporcional a la rigidez de entrepiso de la estructura primaria. Esta se obtiene de la modificación del método de energía modal para cada entrepiso, como:

$$K_d = \frac{2\varepsilon}{\eta - \varepsilon} k_s \quad (\text{A.13})$$

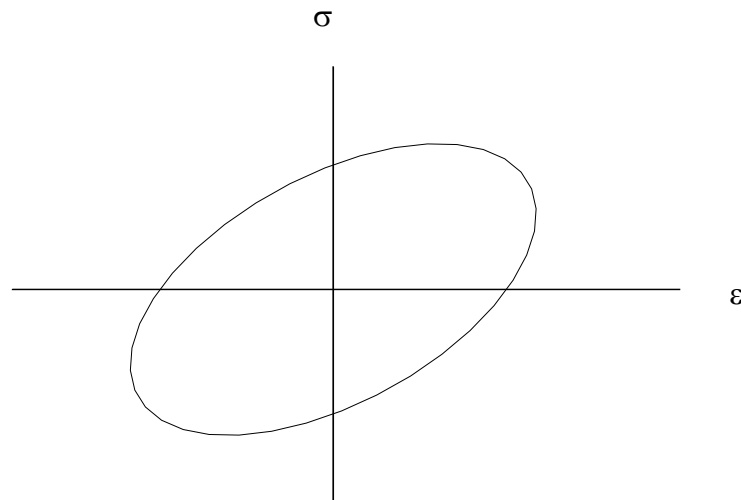
donde  $K_d$  y  $K_s$  son la contribución de rigidez amortiguada y la rigidez de entrepiso sin amortiguamiento en cada nivel respectivamente.

La capacidad de disipación de energía esta determinado por  $G'$  y  $G''$ , la primera, determina la rigidez acumulada del dispositivo, como:

$$k' = \frac{G' A}{h} \quad (\text{A.14})$$

donde  $A$  es el área de corte total y  $h$  es el espesor de las capas de los dispositivos, la relación de  $G''$  a  $G'$  es el factor de daño,  $\eta$ , como podría observarse más adelante,  $k'$  y  $\eta$  determinan el valor del dispositivo estructural equivalente de la estructura amortiguada viscoelásticamente.

El esfuerzo y deformación de los dispositivos viscoelásticos bajo carga armónica están desfasados, debido a esta característica, además considerando que la respuesta estructural es elástica, se forma el ciclo histerético (figura A.10), el área encerrada el ciclo histerético representa la energía disipada por el dispositivo durante un ciclo de oscilación.



**Figura A.10. Relación esfuerzo - deformación, ciclo histerético de dispositivo viscoelástico.**

Más allá de las propiedades de estos dispositivos están, la dependencia de la frecuencia de vibración y la temperatura ambiental, en general, de este modo la frecuencia de vibración se incrementa, los valores de  $G''$  y  $G'$  llegan a ser muy altos, la capacidad de disipación de energía también disminuye con incrementos de temperatura ambiental, el factor de daño, sin embargo, permanece un poco insensible a los cambios moderados en las frecuencias y en las temperaturas ambientales.

Resultados de algunas pruebas con estos dispositivos, promediando los primeros 20 ciclos muestran los efectos que se muestran en la tabla (A.2), en ella se puede ver que las propiedades permanecen más o menos constantes e independientes de la deformación, cuando la deformación está abajo del 20% para cada temperatura y frecuencia.

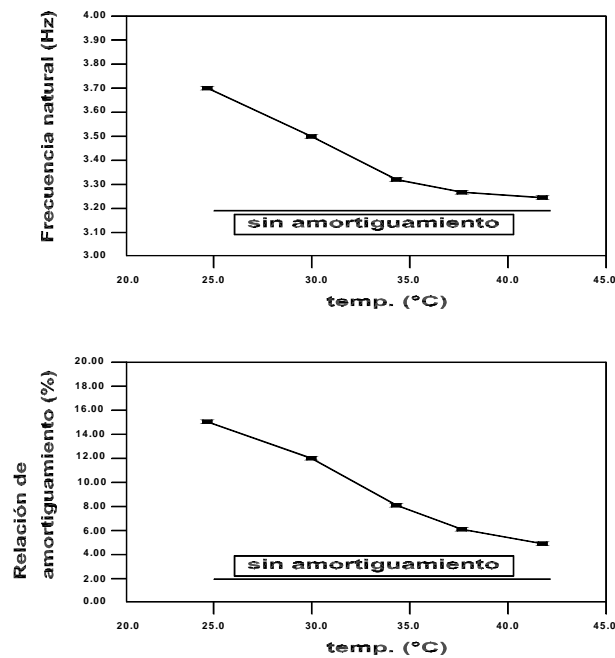
**Tabla A.2. Propiedades típicas de un dispositivo viscoelástico.**

Temp. (°C)	Frec. (Hz)	Deform. (%)	K' (Lb/pulg)	G' (psi)	G'' (psi)	$\eta$
24	1.0	5	2124	142	193	1.36
24	1.0	20	2082	139	192	1.38
24	3.0	5	4084	272	324	1.19
24	3.0	20	3840	256	306	1.20
25	3.5	20	3750	200	220	1.10
36	1.0	5	880	59	67	1.13
36	1.0	20	873	58	65	1.12
36	3.0	5	1626	108	119	1.10
36	3.0	20	1542	103	112	1.09

Estas propiedades son, para cierto grado, dependiendo el número de ciclos de carga y el rango de deformación, especialmente bajo largas excitaciones, porque la temperatura se incrementa con el material del dispositivo, sin embargo, estos efectos han sido mostrados para ser menos dominantes en aplicaciones sísmicas, esto es, porque un movimiento sísmico en la base, es típico que largas aceleraciones ocurran solo en pocos ciclos de excitación.

En general, las propiedades de estos dispositivos pueden ser obtenidas a través de modelos constitutivos, incluyendo el efecto de frecuencia, temperatura y deformación, para aplicaciones prácticas, ellas pueden también ser obtenidas del análisis de regresión de los datos de la prueba, incluyendo los efectos de frecuencia, temperatura ambiental y deformación.

Al incrementarse la temperatura ambiente de los dispositivos viscoelásticos, su material llega a ser más suave y su eficiencia se reduce, la figura A.11 muestra el efecto de la temperatura ambiental sobre la frecuencia natural de la estructura y la relación de amortiguamiento.



**Figura A.11. Efecto de la temperatura ambiente sobre la frecuencia natural y relación de amortiguamiento de dispositivos viscoelásticos.**

## APÉNDICE B

# PARÁMETROS DE DISEÑO

Los espectros de diseño que serán utilizados corresponden al acelerograma registrado en la estación SCT del 19 de Septiembre de 1985 en la dirección EW, cada espectro presentado en la figura II.1 es el promedio de cinco espectros de aceleraciones normalizados, en términos de la intensidad espectral definida por la ecuación (1) para un amortiguamiento crítico  $\xi = 0.05$

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{T_1} T Sa(T, \xi) dT \quad (\text{B.1})$$

Donde  $Sa(T, \xi)$  es la ordenada espectral de aceleraciones correspondiente al período  $T$ , para un amortiguamiento  $\xi$  y  $T_1 = 3.5 \text{seg.}$  para temblores correspondientes a terreno blando.

La normalización consiste en igualar las intensidades de los espectros elásticos de los sismos simulados con la intensidad del temblor registrado, lo que implica afectar las ordenadas de dichos espectros por un factor de reducción. Los espectros inelásticos normalizados, con una ductilidad especificada, son obtenidos afectando sus ordenadas espectrales por tales factores de reducción, y el promedio de ellos es el correspondiente espectro inelástico normalizado de diseño.

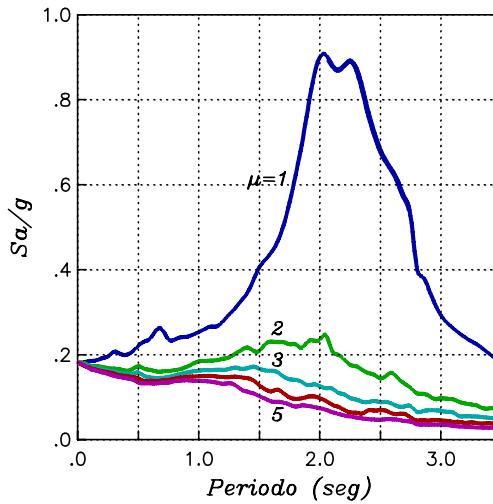


Figura B.1. Espectros de diseño.

A partir de las variables de control, se deduce el siguiente grupo de ecuaciones básicas:

$$\alpha = \frac{r_k}{1 - r_k} = \frac{k_d}{k_c} \quad (\text{B.2})$$

$$\beta = \psi\alpha = \frac{R_d}{R_c} \quad (\text{B.3})$$

Donde  $k_c$  y  $R_c$  son la rigidez y la resistencia lateral de entrepiso del marco de concreto respectivamente, con esto, se tendrá entonces:

$$k = k_c + k_d = k_c(1 + \alpha) \quad (\text{B.4})$$

$$R = R_c + R_d = R_c(1 + \beta) \quad (\text{B.5})$$

y para la superposición de ambos sistemas se debe lograr:

$$\mu = \frac{\delta_M}{\delta_Y} = \frac{\delta_M k}{R} \quad (\text{B.6})$$

donde  $\delta_Y$  y  $\delta_M$  son los desplazamientos relativos de fluencia y máximo del entrepiso respectivamente, para el sistema combinado (marco convencional + paquete disipador).

Con respecto a la sollicitación de diseño, se consideran espectros normalizados de aceleraciones, elástico e inelástico con ductilidad  $\mu$  (figura II.1). para un período especificado  $T$ , se encuentra que la ordenada correspondiente al espectro de aceleraciones elástico es  $S_e(T)$ , mientras que la ordenada correspondiente al espectro de aceleraciones inelástico es  $S(\mu, T)$ , y como factor reductivo  $Q(\mu, T)$ , de la ordenada espectral elástica que conduce a una ductilidad  $\mu$ , para estructuras con periodo natural  $T$ , se obtiene:

$$Q(\mu, T) = \frac{S_e(T)}{S(\mu, T)} \quad (B.7)$$

y una relación:

$$\gamma = \frac{Q}{\mu} \quad (B.8)$$

Para el diseño, se debe considerar los siguientes puntos:

- a) tomar como condiciones de diseño las variables de control  $r_k$  y  $\psi$  de las ecuaciones 1 y 2, y usando la ductilidad  $\mu$  del espectro de diseño, se obtiene los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  mediante las ecuaciones (B.2) y (B.3).
- b) se supone un desplazamiento relativo máximo de entrepiso  $\delta_M$  el cual deberá satisfacer la siguiente ecuación:

$$\delta_M \leq 0.012h \quad (B.9)$$

donde  $h$  es la altura de entrepiso.

- c) se calcula el período fundamental del edificio de  $n$  niveles, por ejemplo con  $T = 0.10n$ , y la correspondiente coordenada espectral  $S_e(T)$ ; según el método estático de diseño sísmico se obtienen las fuerzas sísmicas para cada nivel del edificio y la correspondiente fuerza cortante de diseño,  $R_e$ , sin reducir la ductilidad.

- d) al utilizar la ecuación (B.8), se obtiene el correspondiente cortante reducido por ductilidad ( $R$ ), de tal forma que se obtiene la siguiente expresión:

$$R = \frac{R_e}{Q} = \frac{R_e}{\gamma\mu} \quad (\text{B.10})$$

donde se reemplaza  $\mu$  de la ecuación (B.6), y se obtiene:

$$k = \frac{R_e}{\gamma\delta_M} \quad (\text{B.11})$$

- e) se reemplaza  $k$  de la ecuación (B.4) en la ecuación (B.11), y se despeja  $k_c$ , quedando:

$$k_c = \frac{R_e}{\gamma\delta_M(1+\alpha)} \quad (\text{B.12})$$

Por otra parte, combinando las ecuaciones (B.5) y (B.10), se determina:

$$R_c = \frac{R_e}{Q(1+\beta)} \quad (\text{B.13})$$

Las ecuaciones (B.12) y (B.13) definen las rigideces y las resistencias del marco de concreto requeridos en cada entrepiso, cuyos valores se mantienen hasta el diseño definitivo.

- f) mediante las ecuaciones de Wilbur, con las cuales se determina el valor de las rigideces laterales de los marcos planos, se obtienen las dimensiones preliminares de los elementos del marco de concreto, mediante una operación inversa, es decir, dada la rigidez lateral por entrepiso de un marco, se estiman las dimensiones de los elementos que la conforman.

Para el diseño definitivo es importante considerar que aún cuando se conocen las variables de diseño, no se puede definir directamente las propiedades de los miembros de cada uno de los sistemas, de tal forma, que se satisfagan los valores de rigideces y resistencias que se determinan con las ecuaciones antes mostradas, esto se debe a que las deformaciones axiales de las columnas modifican significativamente los valores que resultan de los modelos simplificados que se utilizan en la práctica y que ignoran tales deformaciones.



Cada entrepiso del edificio presentará 2 desplazamientos significativos, ante carga lateral, en primer lugar, un desplazamiento horizontal relativo de entrepiso ( $\delta H$ ) y en segundo lugar, una rotación como cuerpo rígido ( $\theta$ ), debido al alargamiento y acortamiento de las columnas, entonces se determina la deformación de entrepisos, por la siguiente expresión:

$$\delta = \delta_H - \theta h \quad (\text{B.14})$$

Donde  $h$  = la altura del entrepiso, a continuación se describe el procedimiento para obtener las dimensiones finales de los elementos:

- a) se estima la deformación del entrepiso como se indica en la ecuación (B.18).
- b) se obtiene una nueva rigidez lateral ( $k_a$ ) para cada entrepiso del marco de concreto, de tal forma que se deberá calcular la siguiente expresión:

$$k_a = \frac{R_c}{\delta} \quad (\text{B.15})$$

- c) se comparan las rigideces de cada entrepiso, usando para ello:

$$c_k = \frac{k_c}{k_a} \quad (\text{B.16})$$

si  $c_k$  está dentro de lo admisible, definido por:

$$|c_k - 1| \leq \varepsilon_t \quad (\text{B.17})$$

entonces las dimensiones de los elementos serían las adecuadas, el término  $\varepsilon_t$  indica la tolerancia especificada.

- d) si no se satisface la ecuación anterior, el procedimiento a seguir consiste en multiplicar las rigideces de cada elemento por el coeficiente  $c_k$ , con las nuevas dimensiones de los elementos se repiten los pasos anteriores.
- e) si se satisface el paso (c), se deberán incluir los elementos disipadores de energía con sus respectivas dimensiones y se procede al diseño, según el *Reglamento de Construcciones del Distrito Federal edición 93*. Los disipadores de energía serán diseñados exclusivamente para carga lateral.

# MODELOS PARA DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

## C.1 Modelos para las dimensiones de los elementos estructurales

Los modelos usados para dimensionar las vigas de los marcos estructurales son los siguientes:

Para el ancho  $b$ :

$$\mu_b = bn + 0.254cm \quad (C.1)$$

$$\sigma_b = 0.366cm \quad (C.2)$$

donde:  $bn$  es el ancho nominal (fdp normal) [Mirza y McGregor, 1979].

Para el peralte  $h$ :

$$\mu_h = hn - 0.279cm \quad (C.3)$$

$$\sigma_h = 0.544cm \quad (C.4)$$

donde:  $hn$  es el peralte nominal.

Para el recubrimiento superior  $r$ :

$$\mu_r = rn + 0.318cm \quad (C.5)$$

$$\sigma_r = 1.588cm \quad (C.6)$$

en donde  $rn$  es el recubrimiento nominal.

Para el recubrimiento inferior  $r$ :

$$\mu_r = rn + 0.159cm \quad (C.7)$$

$$\sigma_r = 1.111cm \quad (C.8)$$

En el caso de los modelos utilizados para obtener las dimensiones de las columnas de los marcos estructurales, se tiene que:

Para el ancho ó peralte  $d$ :

$$\mu_d = dn + .159cm \quad (C.9)$$

$$\sigma_d = 0.635cm \quad (C.10)$$

donde:  $dn$  es la dimensión nominal (fdp normal) [Mirza y McGregor, 1979].

Para el recubrimiento superior  $r$ :

$$\mu_r = rn + 0.635cm + 0.004d \quad (C.11)$$

$$\sigma_r = 0.42cm \quad (C.12)$$

donde  $rn$  es el recubrimiento nominal.

## C.2 Modelos para las resistencias

Los modelos para las resistencias de los componentes de los elementos estructurales (acero y concreto) son:

En el caso de acero, para la fluencia nominal de  $f_{yn} = 4200kg / cm^2$  (fdp normal) [Villanueva y Meli. 1984]:

$$\mu_{f_y} = 4682kg / cm^2 \quad (C.13)$$

$$\sigma_{f_y} = 450kg / cm^2 \quad (C.14)$$

Para el esfuerzo último:

$$\mu_{f_u} = 7600 \text{ kg} / \text{cm}^2 \quad (\text{C.15})$$

$$\sigma_{f_u} = 750 \text{ kg} / \text{cm}^2 \quad (\text{C.16})$$

En el caso del concreto y considerando un  $200 \text{ kg} / \text{cm}^2 < f'_{cn} < 300 \text{ kg} / \text{cm}^2$  (fdp normal).

$$\mu_{f'_c} = 0.75 f'_{cn} + 55.26 \text{ kg} / \text{cm}^2 \quad (\text{C.17})$$

$$\sigma_{f'_c} = 40 \text{ kg} / \text{cm}^2 \quad (\text{C.18})$$

### C.3 Modelos para las cargas

Se considera que en el caso de las cargas muertas, estas poseen un fdp Gamma independiente de la carga viva, con valores nominales de acuerdo a los valores empleados en el diseño, con valores medios [Meli. 1976], de tal forma que:

$$\mu_D = \frac{D_n}{(1 + 2V_D)} \quad (\text{C.19})$$

en donde:  $V_D = 0.8$ , y es el coeficiente de variación de la carga muerta,  $\mu_D$  es el valor medio de la carga muerta, y  $D_n$  es el valor nominal de la carga muerta.

La carga viva se considera como una variable aleatoria con valor medio y coeficiente de variación [Mitchel y Woodgate. 1971]:

$$\mu_L = 60 \text{ kg} / \text{m}^2 \quad (\text{C.20})$$

además,  $V_L = 0.8$ , es un coeficiente de correlación entre las cargas de  $\rho = 0.652$ , la variable buscada es:

$$l_i = \alpha x_i \quad (\text{C.21})$$

donde:  $\alpha$  es independiente de  $x_i$ , y  $x_i$  es independiente de  $x_j$ , Tanto  $\alpha$  como  $x_i$  tienen distribución lognormal.