

01161



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO  
DE ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA  
SUJETAS A CARGAS LATERALES**

**TESIS**

PRESENTADA POR

**FERNANDO RAMÓN APARICIO ENRÍQUEZ**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
(ESTRUCTURAS)

DIRIGIDA POR

**DR. OSCAR LÓPEZ BÁTIZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2003

TESIS CON  
FALLA EN ORIGEN

a



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

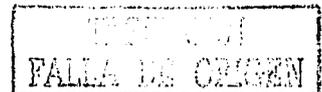
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**PAGINACION**

**DISCONTINUA**

**"Esta tesis corresponde a los estudios realizados  
con una beca otorgada por el Gobierno de México,  
a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores"**

*b*



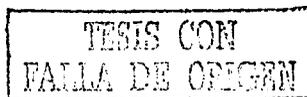
**A la memoria de mis abuelos, Fernando y Julia,**  
por todo el cariño que me dieron, inculcando en mí  
los principios para ser un hombre de bien.

**A mis padres, Álvaro y Ma. Dolores,**  
por su inmenso cariño, por impulsarme siempre a  
seguir adelante, y por el apoyo incondicional que  
me dieron para poder cumplir esta meta.

**A mi hermano, Juan Carlos,**  
por brindarme su ayuda siempre que la he  
necesitado.

**A mi novia, Andrea,**  
por estar siempre a mi lado sin importar las  
circunstancias, y sobre todo, por el amor, apoyo  
y comprensión que me brinda.

C



## AGRADECIMIENTOS

Al Gobierno de México, a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores, por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) por permitirme desarrollar este trabajo en sus instalaciones.

A mi familia mexicana por las atenciones que me brindaron durante mi estadía en este país, en especial a Rodolfo, Maricarmen y Karen.

Un agradecimiento especial al Dr. Oscar López Bátiz, director de esta tesis, por el tiempo dedicado a la orientación de la misma, por sus valiosos comentarios y sugerencias, pero sobre todo, por brindarme su apoyo y amistad en forma desinteresada.

A los profesores, Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez, M.I. Octavio García Domínguez, Dr. Arturo Tena Colunga y Dr. José Alberto Escobar Sánchez por su tiempo y dedicación en la revisión de esta tesis, así también, por las valiosas aportaciones que enriquecieron el contenido de la misma.

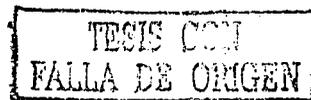
Al Sr. Pablo Olmos por su ayuda durante la preparación y ensaye de los modelos, ya que sin su ingenio y experiencia no hubiera sido posible la realización de las pruebas. También se agradece al Sr. Carlos Olmos por su colaboración durante el montaje de los modelos.

Al M.I. Leonardo Flores por su colaboración desinteresada durante el desarrollo de las pruebas.

Al Arq. Juan Carlos Aparicio por su apoyo en la elaboración de varias figuras de este documento.

Al Dr. Roberto Gómez Martínez por su colaboración para el encuadernado del documento.

d



# ÍNDICE GENERAL

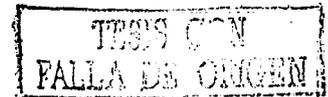
<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	3
<b>2</b>	<b>REVISIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN ESTRUCTURAL EXISTENTES</b>	<b>4</b>
2.1	Introducción	4
2.2	Disipación pasiva de energía	5
2.2.1	Antecedentes sobre la disipación de energía sísmica	5
2.2.2	Disipadores metálicos	8
2.2.3	Disipadores de fricción	13
2.2.4	Disipadores viscoelásticos	16
2.2.5	Amortiguadores de fluido viscoso	17
2.2.6	Osciladores resonantes	19
2.3	Aislamiento sísmico	20
2.4	Control activo y semiactivo	22
<b>3</b>	<b>TRABAJO EXPERIMENTAL</b>	<b>24</b>
3.1	Modelo seleccionado y tipo de disipador	24
3.1.1	Descripción del marco	25
3.1.2	Descripción de los disipadores	28
3.2	Procedimiento y metodología de prueba	29
3.2.1	Dispositivo de carga	29
3.2.2	Instrumentación	29
3.2.3	Lectura de datos	31
3.2.4	Procedimiento de prueba	32
3.2.5	Historia de carga	32
3.3	Resultados generales	34
3.3.1	Marco solo	34
3.3.2	Marco con DPC-SA	35
3.3.3	Marco con DPC-AH	39
3.3.4	Marco con DPC-AV	42
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>46</b>
4.1	Conceptos generales del diseño por desempeño	46
4.1.1	Niveles de desempeño	49
4.1.1.1	Nivel de desempeño de servicio	49
4.1.1.2	Nivel de desempeño de falla	49
4.1.2	Parámetros de comparación	49

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

4.2	Comportamiento del conjunto marco-disipador .....	50
4.2.1	Resistencia y Rigidez .....	50
4.2.1.1	Cálculo analítico .....	50
4.2.1.1.1	Marco solo (MS) .....	51
4.2.1.1.2	Conjunto marco-disipador (M+DPC) .....	55
4.2.1.2	Resistencia .....	57
4.2.1.3	Rigidez inicial .....	58
4.2.1.4	Rigidez pico a pico .....	59
4.2.1.5	Curvas de capacidad .....	64
4.2.2	Disipación de Energía .....	66
4.2.3	Amortiguamiento viscoso equivalente .....	70
4.2.4	Ductilidad .....	72
4.3	Comportamiento del dispositivo disipador .....	73
4.3.1	Resistencia .....	75
4.3.1.1	Teoría clásica para placas en cortante puro .....	75
4.3.1.2	Esfuerzo cortante último en uniones viga-columna .....	79
4.3.1.3	Cálculo de la resistencia .....	81
4.3.2	Rigidez .....	83
4.3.2.1	Rigidez inicial .....	83
4.3.2.2	Rigidez pico a pico .....	84
4.3.3	Curvas de capacidad .....	88
4.3.4	Disipación de Energía .....	89
4.3.5	Ductilidad .....	92
4.3.6	Amortiguamiento viscoso equivalente .....	93
4.4	Comportamiento en condiciones de servicio .....	96
4.5	Comportamiento a la falla .....	101
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>104</b>
5.1	Conclusiones .....	104
5.2	Recomendaciones .....	106
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>102</b>
	<b>APÉNDICE A .....</b>	<b>106</b>

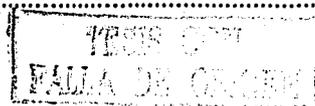
## ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Sistemas de protección estructural .....	4
3.1	Instrumentación .....	30
3.2	Historia de carga o de desplazamientos .....	33
4.1	Propiedades mecánicas y geométricas de los elementos del modelo .....	51
4.2	Resultados del cálculo de la curva de capacidad del marco solo.....	54
4.3	Valores analíticos de rigidez, resistencia y desplazamiento para los cuatro modelos ensayados .....	57
4.4	Comparación de la resistencia teórica y experimental del conjunto marco-disipador.....	58
4.5	Comparación de la rigidez inicial teórica y experimental del conjunto marco-disipador .....	58
4.6	Valores de ductilidad del conjunto marco-disipador.....	73
4.7	Resistencia calculada mediante la formulación de Basler .....	82
4.8	Resistencia calculada mediante la formulación del Eurocódigo.....	82
4.9	Resistencia calculada mediante el método de Krawinkler.....	82
4.10	Comparación de la resistencia teórica y experimental de los dispositivos disipadores. ....	83
4.11	Comparación de la rigidez inicial teórica y experimental de los dispositivos disipadores .....	83
4.12	Valores de ductilidad de los dispositivos disipadores .....	93
4.13	Comparación de los valores de Heq entre el modelo Marco + DPC y DPC solo.....	95
4.14	Energía disipada normalizada para el nivel de desempeño de servicio .....	97
4.15	Rigidez pico a pico para el nivel de desempeño de servicio.....	99
4.16	Amortiguamiento viscoso equivalente para el nivel de desempeño de servicio .....	100
4.17	Energía disipada normalizada para el nivel de desempeño de falla.....	101
4.18	Rigidez pico a pico para el nivel de desempeño de falla .....	102
4.19	Amortiguamiento viscoso equivalente para el nivel de desempeño de falla .....	102

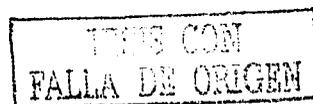


## ÍNDICE DE FIGURAS

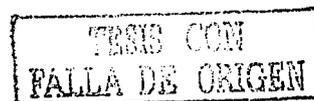
2.1	Respuesta de energía de una estructura tradicional; a) Estado límite de daño, b) Estado límite de colapso (Uang y Bertero, 1986) .....	7
2.2	a) Curva típica esfuerzo-deformación; b) Modelo elasto-plástico (Soon y Dargush, 1997) .....	8
2.3	Dispositivo en cantiliver (Skinner <i>et al</i> , 1993) .....	9
2.4	Dispositivo en cantiliver (Kelly, 1988) .....	9
2.5	Disipador por torsión (Skinner <i>et al</i> , 1993) .....	9
2.6	Disipador de momento uniforme (Skinner <i>et al</i> , 1993) .....	10
2.7	Dispositivo fabricado con soleras en forma de U (Soon y Dargush, 1997) .....	10
2.8	Dispositivos ADAS (Whitaker <i>et al</i> , 1989) y TADAS (Tsal <i>et al</i> , 1993) .....	11
2.9	Dispositivo tipo panal (Kobori <i>et al</i> , 1992) .....	11
2.10	Disipadores panel de cortante a) de una celda (Seki <i>et al</i> , 1988) b) de tres y cinco celdas (Midorikawa <i>et al</i> , 1994) .....	12
2.11	Disipador panel de cortante de nueve celdas (Nakashima <i>et al</i> , 1994) .....	12
2.12	Representación de la extrusión de un metal, mostrando los cambios en la microestructura (Robinson, 1976) .....	12
2.13	Disipadores de energía por extrusión de plomo a) Tipo tubo estrecho b) Tipo eje ensanchado (Robinson, 1976) .....	13
2.14	Dispositivo de fricción para contravientos en forma de X (Pall y Marsh, 1982) .....	14
2.15	Puntal antiadherible (Watanabe <i>et al</i> , 1988) .....	14
2.16	Disipador de fricción Sumitomo (Aiken y Kelly, 1990) .....	15
2.17	Dispositivo de fricción (Nims <i>et al</i> , 1993) .....	15
2.18	Conexión atornillada con agujeros oblongos (FitzGerald <i>et al</i> , 1989) .....	15
2.19	a) Dispositivo viscoelástico típico, b) Ubicación del dispositivo (Soon y Dargush, 1997) .....	16
2.20	Dispositivo desarrollado por Oiles Industry Co., Ltd. (Scholl, 1984) .....	17
2.21	Amortiguador GERB de contenedor cilíndrico (Makris y Constantinou, 1990) .....	18
2.22	Muro de amortiguamiento viscoso (Arima <i>et al</i> , 1988) .....	18
2.23	Amortiguador de fluido, tipo Taylor (Constantinou <i>et al</i> 1993) .....	19
2.24	Formas diversas de osciladores resonantes (Soon y Dargush, 1997) .....	20
2.25	Representación esquemática de edificios con y sin aislamiento sísmico (Skinner <i>et al</i> , 1993) .....	21
2.26	Aislador de base de hule con corazón de plomo (Skinner <i>et al</i> , 1993) .....	21
2.27	Aislador de base tipo péndulo de fricción (Zayas <i>et al</i> , 1990) .....	22
2.28	Esquema del aislador usado en el puente Mortaiolo (Parducci y Mezzi, 1991) .....	22
2.29	Sistema de tendones activos .....	23
2.30	Esquema del sistema de control activo del edificio Hankyu Chayamashi (Soon y Dargush, 1997) .....	23
3.1	Esquema del marco .....	25
3.2	Viga de cimentación .....	26
3.3	Columnas .....	26
3.4	Viga cabezal .....	27
3.5	Sistema de contraventeo .....	27



3.6	Características geométricas de los dispositivos disipadores panel de cortante .....	28
3.7	Gato hidráulico .....	29
3.8	Instrumentación colocada en el marco .....	30
3.9	Instrumentación colocada en los dispositivos disipadores .....	31
3.10	Equipo de adquisición de datos .....	31
3.11	Respuesta inelástica de desplazamiento de un sistema de 1GDL ante el registro de SCT-EW .....	33
3.12	Historia de carga o de desplazamientos .....	34
3.13	Curva histerética del modelo marco solo .....	35
3.14	Curva histerética del modelo Marco + DPC-SA.....	36
3.15	Secuencia de daño del dispositivo DPC-SA .....	37
3.16	Estado final de daño del dispositivo DPC-SA .....	38
3.17	Curva histerética del modelo Marco + DPC-AH .....	39
3.18	Secuencia de daño del dispositivo DPC-AH .....	40
3.19	Estado final de daño del dispositivo DPC-AH.....	41
3.20	Curva histerética del modelo Marco + DPC-AV .....	42
3.21	Secuencia de daño del dispositivo DPC-AV .....	43
3.22	Estado final de daño del dispositivo DPC-AV.....	44
4.1	Daño no estructural en hospitales (Fotos cortesía de NISEE) .....	47
4.2	Objetivos de diseño acorde al Comité Visión 2000 (Terán, 2002) .....	48
4.3	Idealización de la curva esfuerzo-deformación unitaria.....	51
4.4	Idealización del marco solo .....	52
4.5	Mecanismo de colapso del marco .....	53
4.6	Distribución de momentos flexionates y curvaturas en las columnas (criterio 1) .....	53
4.7	Distribución de momentos flexionates y curvaturas en las columnas (criterio 2) .....	54
4.8	Idealización del conjunto marco-disipador.....	55
4.9	Deformación del sistema de contraventeo .....	56
4.10	Definición de rigidez pico a pico .....	59
4.11	Degradación de rigidez pico a pico del modelo Marco Solo .....	60
4.12	Degradación de rigidez pico a pico del modelo Marco + DPC-SA.....	61
4.13	Degradación de rigidez pico a pico del modelo Marco + DPC-AH .....	61
4.14	Degradación de rigidez pico a pico del modelo Marco + DPC-AV.....	62
4.15	Comparación de la rigidez pico a pico de cada modelo .....	63
4.16	Comparación de la degradación de rigidez pico a pico de cada modelo .....	63
4.17	Curvas de capacidad teóricas y experimentales de los cuatro modelos .....	64
4.18	Comparación de las curvas de capacidad experimentales de cada modelo.....	65
4.19	Definición de energía disipada .....	66
4.20	Energía disipada por ciclo para el modelo Marco Solo .....	67
4.21	Energía disipada por ciclo para el modelo Marco + DPC-SA .....	68
4.22	Energía disipada por ciclo para el modelo Marco + DPC-AH.....	68
4.23	Energía disipada por ciclo para el modelo Marco + DPC-AV .....	69
4.24	Comparación de la energía disipada acumulada de cada modelo .....	70
4.25	Definición de amortiguamiento viscoso equivalente .....	70



<b>4.26</b>	Comparación del amortiguamiento viscoso equivalente de cada modelo.....	71
<b>4.27</b>	Criterio de igualación de energía .....	72
<b>4.28</b>	Curva histerética del dispositivo DPC-SA .....	73
<b>4.29</b>	Curva histerética del dispositivo DPC-AH .....	74
<b>4.30</b>	Curva histerética del dispositivo DPC-AV .....	74
<b>4.31</b>	Panel del alma sometido a esfuerzo cortante en los bordes .....	76
<b>4.32</b>	Límites de pandeo de un tablero en cortante puro .....	78
<b>4.33</b>	Formación del campo de tensión diagonal.....	78
<b>4.34</b>	Fuerzas actuando en un nudo .....	79
<b>4.35</b>	Modelo matemático del nudo .....	80
<b>4.36</b>	Degradación de rigidez pico a pico del dispositivo DPC-SA.....	84
<b>4.37</b>	Degradación de rigidez pico a pico del dispositivo DPC-AH .....	85
<b>4.38</b>	Degradación de rigidez pico a pico del dispositivo DPC-AV .....	85
<b>4.39</b>	Comparación de la rigidez pico a pico de cada disipador .....	86
<b>4.40</b>	Comparación de la degradación de rigidez pico a pico de cada disipador.....	87
<b>4.41</b>	Curvas de capacidad teóricas y experimentales de los tres dispositivos .....	88
<b>4.42</b>	Comparación de las curvas de capacidad experimentales normalizadas de cada dispositivo .....	89
<b>4.43</b>	Energía disipada por ciclo para el dispositivo DPC-SA.....	90
<b>4.44</b>	Energía disipada por ciclo para el dispositivo DPC-AH .....	91
<b>4.45</b>	Energía disipada por ciclo para el dispositivo DPC-AV.....	91
<b>4.46</b>	Comparación de la energía disipada acumulada de cada dispositivo.....	92
<b>4.47</b>	Comparación del amortiguamiento viscoso equivalente de cada dispositivo .....	93
<b>4.48</b>	Relación entre el Heq del DPC solo y Heq del conjunto marco + DPC.....	94
<b>4.49</b>	Ajuste de los datos de energía normalizada por ciclo .....	96
<b>4.50</b>	Variación de la energía normalizada por ciclo (curvas ajustadas) .....	97
<b>4.51</b>	Ajuste de los datos de rigidez pico a pico .....	98
<b>4.52</b>	Variación de la rigidez pico a pico (curvas ajustadas).....	99
<b>4.53</b>	Estabilidad de la rigidez pico a pico.....	100



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Una gran parte de la población mundial vive en zonas de alto peligro sísmico, sujetas a terremotos de severidad y periodo de retorno variable. Los terremotos causan pérdidas humanas significativas y cuantiosos daños a las propiedades cada año, por este motivo, a partir del siglo XX, el hombre ha prestado especial interés a este fenómeno de la naturaleza tratando de conocer sus causas, predecir eventos futuros y sobre todo construir estructuras que tengan un comportamiento adecuado ante dichos eventos.

Los criterios actuales de diseño sismorresistente buscan como resultado estructuras que tengan un desempeño óptimo ante la ocurrencia de los eventos sísmicos considerados en su diseño. El desempeño óptimo hace referencia a que la estructura se comporte de la manera prevista por el diseñador, tratando de reducir los daños durante eventos moderados y preservando la seguridad de vida de sus ocupantes durante eventos extraordinarios. Como resultado de este punto de vista, nuevos e innovadores conceptos de protección estructural se han ido desarrollando en los últimos años a fin de construir estructuras cada vez más seguras.

Durante un sismo, éste transmite una gran cantidad de energía a la estructura, la cual tiene que ser disipada por ésta de alguna manera. Si el sismo es pequeño la energía será absorbida por la deformación elástica de la estructura, pero esperar que esto mismo ocurra en el caso de eventos

severos llevaría a construir estructuras excesivamente costosas y poco funcionales. Por este motivo, según las filosofías de diseño actuales, se diseñan las estructuras de tal forma que durante un sismo intenso, la mayor parte de la energía incidente sea disipada por amortiguamiento viscoso (mecanismo generador de calor intramolecular) y por comportamiento inelástico de algunos de sus elementos estructurales, esto último generalmente denominado comportamiento histerético. El permitir que ciertos elementos estructurales incursionen en el intervalo de comportamiento inelástico tiene un precio, que es el daño estructural, el cual puede ser significativo después de un evento de gran magnitud, pero siempre tratando de evitar el colapso parcial o total de la estructura.

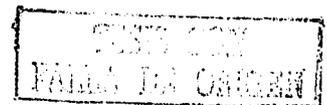
Dentro de este contexto como una forma de incrementar la resistencia y rigidez, además de mejorar la capacidad de deformación y de disipación de energía en estructuras que necesitan refuerzo, o bien, en el diseño de construcciones nuevas, una de las técnicas desarrolladas sugiere incorporar dispositivos pasivos de disipación de energía, los cuales tienen como rol principal absorber parte de la energía incidente durante un sismo, lo cual reduce la demanda de disipación de energía en los miembros estructurales primarios y se minimiza el posible daño estructural de los mismos. Además, dependiendo del tipo de dispositivo, estos pueden actuar a manera de fusibles sísmicos concentrando en ellos la mayor parte de los daños, de modo que puedan ser sustituidos fácilmente y a un costo económico razonable.

Las investigaciones y el desarrollo de dispositivos pasivos de disipación de energía para aplicaciones estructurales tienen aproximadamente 30 años de historia, estos dispositivos además de ser usados para contrarrestar las fuerzas inducidas por sismos, también pueden ser eficaces en contra de los movimientos debidos al viento.

En este estudio se muestra una recopilación bibliográfica de algunos tipos de dispositivos disipadores de energía que se han desarrollado hasta la fecha, clasificándolos de acuerdo a la manera en que controlan la respuesta dinámica de una estructura y haciendo una breve descripción de cada uno.

La parte principal de la investigación se refiere al ensaye en laboratorio y análisis de resultados de tres disipadores de energía tipo *panel de cortante*, cuyo principio básico es que el alma del disipador, orientada en la dirección de aplicación de la carga, alcance la fluencia por cortante para niveles de desplazamiento relativamente pequeños, mientras que los demás elementos de la estructura permanecen dentro del intervalo de comportamiento elástico.

Este tipo de disipador fue desarrollado originalmente en el Japón por Seki *et al* (1988), quienes en esa ocasión probaron ante carga lateral cíclica un marco plano de acero (de una crujía y dos entresijos) reforzado con un contraviento en forma de Y invertida en cada entresijo. En la unión del contraviento con cada trabe del marco se colocó un disipador de energía tipo panel de cortante, en el entresijo inferior se utilizó un dispositivo fabricado a partir de un perfil I laminado de alma gruesa, mientras que en el superior se usó un dispositivo fabricado con placas soldadas con alma esbelta y rigidizada por un atiesador horizontal.



## **1.2 OBJETIVOS**

Mediante el presente trabajo se pretende presentar la viabilidad del uso de un tipo de dispositivo disipador de energía económico y de fácil fabricación, así como información para el diseño de los mismos, considerando las filosofías de diseño por desempeño y los comportamientos deseados.

El principal objetivo es estudiar experimentalmente tres dispositivos disipadores de energía tipo panel de cortante (DPC), con características geométricas distintas. A partir del ensaye de los mismos se intenta analizar el comportamiento de los diferentes modelos de dispositivo, a fin de poder establecer las ventajas y desventajas que presentan; además, se desea estudiar la influencia que tuvieron los mismos en el desempeño del conjunto marco-disipador para las condiciones de servicio y de falla.

Con los datos obtenidos se calcularon varios parámetros como son: resistencia, rigidez, energía disipada, amortiguamiento y ductilidad; tanto para el conjunto marco-disipador, como para el disipador únicamente, de modo que se pueda llevar a cabo una comparación y evaluación cuantitativa de los diferentes DPC probados.

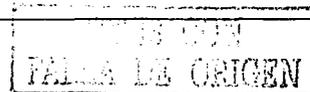
## 2 REVISIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN ESTRUCTURAL EXISTENTES

### 2.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas varias investigaciones se han ido desarrollando con el fin de encontrar sistemas de protección estructural efectivos y confiables para reducir la respuesta dinámica de las estructuras producto de la acción que tienen sobre ellas las fuerzas de la naturaleza como pueden ser el viento, las olas o los temblores. Los sistemas de protección estructural modernos pueden dividirse en tres grupos según se muestra en la tabla 2.1, estos grupos pueden distinguirse principalmente por la forma en que los dispositivos empleados absorben la energía asociada a los eventos naturales transitorios que actúan sobre una estructura (Soong y Dargush, 1997).

**Tabla 2.1** Sistemas de protección estructural

Aislamiento Sísmico	Disipación Pasiva de Energía	Control Activo y Semi-activo
Aisladores elastoméricos	Disipadores metálicos	Sistemas de tendones activos
Aisladores de hule y plomo	Disipadores de fricción	Sistemas de masa activa
Péndulos de fricción	Disipadores viscoelásticos	Sistemas de rigidez y amortiguamiento variable
	Disipadores de fluido viscoso	Materiales inteligentes
	Osciladores Resonantes	



En el presente capítulo se hace una revisión general de los sistemas de protección estructural desarrollados hasta la fecha, según la clasificación mostrada en la tabla anterior, haciendo énfasis en los sistemas de disipación pasiva de energía.

## **2.2 DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA**

En años recientes varios esfuerzos se han emprendido para desarrollar el concepto de disipación de energía o amortiguamiento suplementario como una tecnología factible, así varios tipos de dispositivos disipadores de energía han sido diseñados y algunos de ellos se han instalado en estructuras en todo el mundo. Paralelamente, las instituciones de investigación han dedicado cada vez mayor tiempo al estudio analítico y experimental de la respuesta de estructuras con estos sistemas (Jara, 1994).

Una de las características de los dispositivos pasivos de disipación de energía es que responden al movimiento de la estructura de una manera propia, es decir, sin hacer uso de sistemas adicionales que los accionen.

A continuación se presenta una explicación sencilla del concepto de disipación de energía a fin de poder valorar y comprender completamente los beneficios de esta tecnología y más adelante se hace una descripción de algunos de los dispositivos disipadores más representativos que se han desarrollado de acuerdo al principio de funcionamiento mostrado en la tabla 2.1.

### **2.2.1 ANTECEDENTES SOBRE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA**

Un sismo incide energía a una estructura, y ésta a su vez la absorbe y disipa. La energía absorbida se manifiesta como energía cinética y energía de deformación elástica. La primera se pone en evidencia como movimiento de la masa de la estructura y la segunda como la deformación temporal de los elementos estructurales de un edificio. Una estructura disipa energía de dos maneras: por medio del amortiguamiento propio de la estructura, denominada energía de amortiguamiento; y a través del amortiguamiento hysterético, propio del comportamiento no lineal de los elementos estructurales, y que recibe el nombre de energía hysterética (López Bátiz *et al*, 1996).

La relación de energías mencionada en el párrafo anterior puede representarse con la siguiente expresión:

$$E_I = E_K + E_D + E_C + E_H \quad (2.1)$$

donde :

- $E_I$  = energía incidente producida por el sismo
- $E_K$  = energía cinética
- $E_D$  = energía de deformación elástica
- $E_C$  = energía de amortiguamiento
- $E_H$  = energía hysterética

De la ecuación anterior es fácil observar que para minimizar las demandas de energía cinética y de deformación elástica, y con ellas los daños estructurales durante un temblor, se buscará incrementar la disipación de energía (ya sea por amortiguamiento viscoso o por medio de histéresis), ya que al incrementarse la energía disipada, la demanda en los elementos estructurales generalmente se verá reducida.

La energía disipada por amortiguamiento viscoso se puede incrementar mediante el aumento del amortiguamiento mismo en la estructura; éste amortiguamiento está asociado a la viscosidad del material y es proporcional a la velocidad de aplicación de carga, de manera que el amortiguamiento se incrementa en proporción de la frecuencia natural de la estructura. Varios estudios han demostrado que el incremento del amortiguamiento en una estructura reduce la respuesta de la misma ante un sismo, especialmente para periodos cercanos al periodo dominante del terreno. En el diseño de estructuras, generalmente se usan valores empíricos del porcentaje de amortiguamiento: 2% para estructuras de acero y de 3% a 5% para estructuras de concreto reforzado, dependiendo estos valores del nivel de agrietamiento del concreto.

La energía histerética es independiente de la velocidad de carga y está en función del ciclo de histéresis que puede desarrollar la estructura; llámese ciclo de histéresis a un ciclo completo en el que se carga el material en una dirección, se descarga en la dirección opuesta y se recarga a la posición original de desplazamiento nulo. El término histerético se refiere al desfaseamiento de las curvas de carga y descarga bajo carga cíclica. En cada ciclo el material disipa energía histerética, la cual es proporcional al área dentro de la curva carga-deformación, es decir, se disipa mayor cantidad de energía entre mayor sea el área dentro de la curva.

Debido a que la disipación de energía histerética es producto de la deformación inelástica de varios de los miembros estructurales durante un sismo intenso, el daño que se genera en la estructura puede resultar tan serio que sea necesario demoler la estructura. Por este motivo, una alternativa para incrementar la energía histerética y controlar el daño estructural consiste en separar la función de transmisión de carga de la estructura de la función de disipación de energía, lo cual se puede lograr al incorporar en la estructura dispositivos especiales para disipar la energía generada en la estructura por los movimientos predominantemente laterales producidos por el sismo.

En la figura 2.1 se muestra la respuesta de energía de una estructura de acero ensayada en mesa vibradora por Uang y Bertero (1986), la misma fue construida a escala 1:3, contaba con seis niveles y contravientos concéntricos. Se utilizó para la prueba el temblor de Miyagi-Ken-Oki de 1978, escalando la señal para producir una aceleración máxima en la mesa de 0.33g, la cual se estimó para representar el estado límite de daño del modelo. Como se puede ver en la figura 2.1a, para este nivel de carga el amortiguamiento viscoso y el comportamiento histerético contribuyen substancialmente en la disipación de energía, pero si la intensidad de la señal se eleva, incluso una porción mayor de energía es disipada por medio de la deformación inelástica de la estructura. Finalmente para el estado límite de colapso, a una aceleración de 0.65g, aproximadamente el 90% de la energía es disipada por

comportamiento histerético como se muestra en la figura 2.1b. Evidentemente la disipación de esta cantidad de energía ha destruido la estructura.

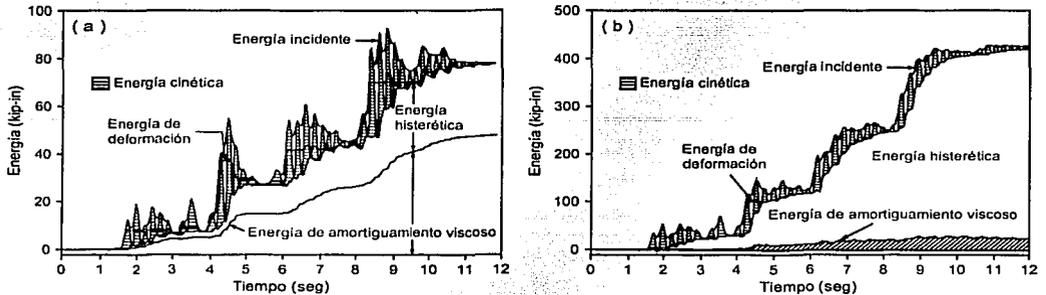


Figura 2.1 Respuesta de energía de una estructura tradicional; a) Estado límite de daño, b) Estado límite de colapso (Uang y Bertero, 1986)

El objetivo principal de los disipadores de energía que se instalan en una estructura consiste en que éstos actúen como su primera línea de defensa contra los sismos, de tal forma que al accionarse liberen a la misma de gran parte de la energía incidente al disiparla mediante su comportamiento mecánico, aportándole un incremento importante de amortiguamiento histerético, producto del daño localizado en el dispositivo disipador únicamente. De esta forma, la estructura original o primaria del edificio se encuentra sometida sólo a una parte de la energía sísmica incidente, la cual podrá manejar con mayor facilidad si se acepta que debido al amortiguamiento histerético las respuestas de la estructura se reducen y, por lo tanto, los elementos permanecen dentro de su comportamiento elástico. De esta manera, se supone que la estructura original sufrirá deformaciones menores para un cierto nivel de energía de entrada, comparadas con las que sufriría si no incluyera los disipadores de energía.

En la literatura reciente se ha mencionado que un dispositivo disipador deberá cumplir con las siguientes condiciones para poder tener un comportamiento idóneo:

- Después de un sismo, la estructura debe tender a regresar a su posición original (no deberán permitirse deformaciones permanentes grandes).
- No debe alterarse la vida cotidiana de los ocupantes de la estructura durante un proceso de revisión y reparación estructural.
- Con el empleo de mecanismos de este tipo, se debe poder reducir el costo inicial de construcción, así como el de refuerzo estructural de una edificación existente.
- Las propiedades mecánicas de los dispositivos no deben variar substancialmente con el tiempo.
- No deben requerir mantenimiento e inspección importante, salvo después de la ocurrencia de un sismo severo, y las operaciones requeridas deben ser suficientemente sencillas.

Para cumplir con estos requisitos, un dispositivo complicado resulta inútil, mientras que es deseable un dispositivo sencillo, económico y de comportamiento estable bajo acciones del tipo sísmico.

### 2.2.2 DISIPADORES METÁLICOS

En este tipo de dispositivos el mecanismo fundamental de disipación resulta de la deformación inelástica de un metal, usualmente ese metal es acero suave, aunque a veces se utiliza plomo o algún otro tipo de aleación. El principio básico de funcionamiento se puede entender a partir de la figura 2.2a en la que se muestra una curva esfuerzo-deformación típica, en ella se observa que para cargas correspondientes a esfuerzos menores al esfuerzo de fluencia  $\sigma_y$ , la respuesta del material es completamente elástica con  $\sigma_n$  proporcional a  $\epsilon$ , en este intervalo el estado inicial O es completamente recuperable al remover la carga aplicada, no existiendo en este caso disipación de energía. Por otro lado, cuando el esfuerzo de fluencia se sobrepasa produce una deformación plástica irreversible en conjunción con una disipación de energía inelástica.

La energía se puede medir como el área bajo la curva esfuerzo-deformación desde O hasta B. Parte de esta energía se recupera mientras la remanente se disipa, esta última está asociada con la deformación inelástica  $\epsilon_{in}$  y se identifica como la porción achurada en la figura 2.2a. Una significativa parte de la energía disipada se convierte en calor. La disipación de energía se puede conseguir sometiendo el material a cualquiera de los siguientes tipos de deformación: compresión, tensión, torsión, flexión y/o cortante.

Un modelo matemático que permite idealizar de manera sencilla el comportamiento de este tipo de disipadores es el elasto-plástico, el cual supone que el dispositivo tiene comportamiento elástico lineal hasta alcanzar el punto de fluencia, y a partir de ahí se deforma plásticamente con una rigidez nula. En la figura 2.2b se muestra una curva elastoplástica obtenida al aplicar una carga cíclica reversible, en este caso la energía disipada es igual al área dentro de la curva.

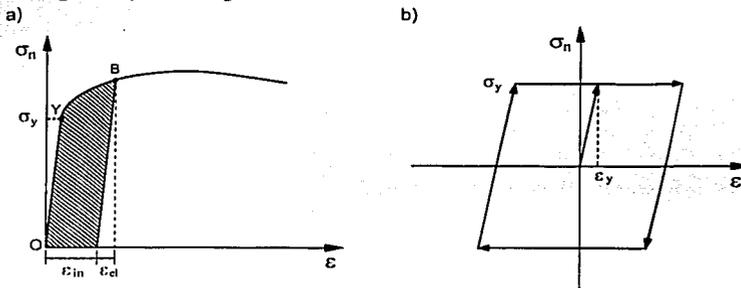


Figura 2.2 a) Curva típica esfuerzo-deformación; b) Modelo elasto-plástico (Soon y Dargush, 1997)

La idea de utilizar dispositivos metálicos con comportamiento histerético para disipar gran parte de la energía sísmica empezó con el trabajo conceptual y experimental realizado por Kelly *et al* (1972) y Skinner *et al* (1975) en la década del 70. A continuación se mencionan alguno de los dispositivos más representativos.

En la figura 2.3 se muestra el dispositivo estudiado por Skinner *et al* (1975) y Skinner y McVerry (1975), dicho dispositivo consiste en una barra delgada de acero colocada en cantiliver, su extremo libre termina en una zona esférica que embona en una funda cilíndrica, debido al desplazamiento relativo entre la funda y la base de la barra ésta se deforma por flexión y así disipa energía. Estos elementos se colocan en la cimentación y se pretende que trabajen combinados con aisladores de base. Un dispositivo similar es el usado por Kelly (1988) en un edificio en Japón (figura 2.4).

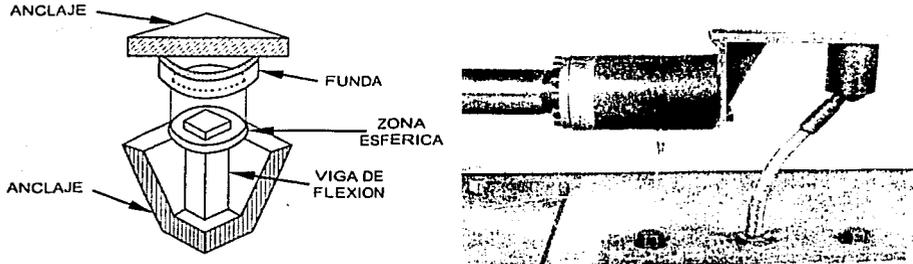


Figura 2.3 Dispositivo en cantiliver (Skinner *et al*, 1993)

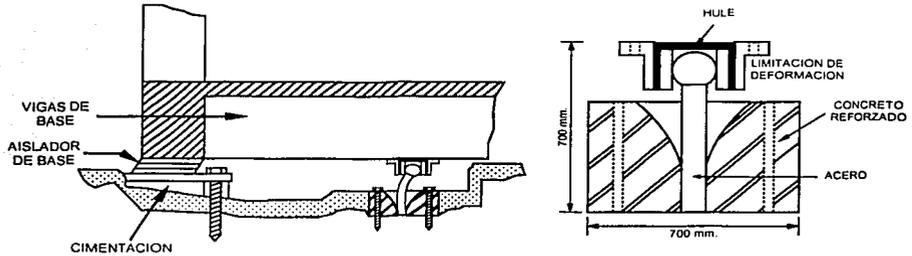


Figura 2.4 Dispositivo en cantiliver (Kelly, 1988)

Otra forma de conseguir un comportamiento elasto-plástico es sometiendo una barra de acero a torsión (figura 2.5) (Skinner *et al*, 1975 y Skinner y McVerry, 1975). En este dispositivo se alcanza el esfuerzo de fluencia al mismo tiempo en casi todo su volumen, la torsión se genera sobre la placa 5 al conectar los elementos 1 y 2 a la base de la estructura y los brazos 3 y 4 a la cimentación. Este dispositivo se utilizó junto con aislamiento de base en el viaducto Rangitikei en Nueva Zelanda.

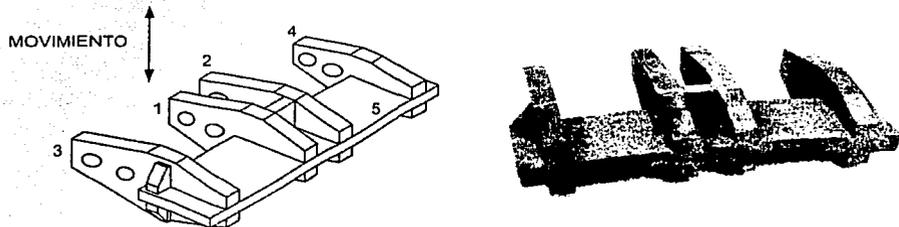


Figura 2.5 Disipador por torsión (Skinner *et al*, 1993)

En la figura 2.6 se muestra el dispositivo denominado disipador de momento uniforme desarrollado por Skinner *et al* (1980) y utilizado en la construcción de un puente, está formado por una barra circular de acero que se deforma, por la acción de dos brazos, hacia arriba y hacia abajo disipando energía por flexión, los ciclos histeréticos que presenta son casi rectangulares, por lo que resulta un dispositivo muy eficiente en cuanto la disipación de energía.

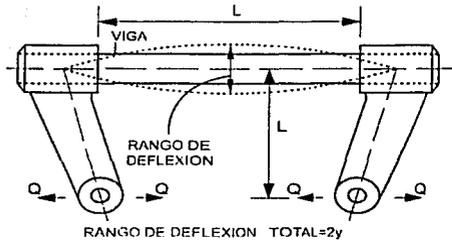


Figura 2.6 Disipador de momento uniforme (Skinner *et al*, 1993)

En la figura 2.7 se muestra el dispositivo formado por soleras de acero en forma de U, el cual fue estudiado por Skinner *et al* (1975), Aguirre y Sánchez (1989) y Aguirre (1993). Este disipador opera bajo el concepto denominado rolado por flexión, el dispositivo consiste en dos placas en forma de U, la parte central del dispositivo se une a un nivel de la estructura y las partes extremas al nivel inmediato superior mediante contravientos. La disipación de energía ocurre cuando fluye el material de la parte curva de la U, al existir desplazamiento relativo de una cara con respecto a la otra.

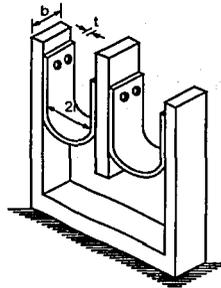


Figura 2.7 Dispositivo fabricado con soleras en forma de U (Soon y Dargush, 1997)

Alonso (1989), Whitaker *et al* (1989), Scholl (1990), Su y Hanson (1990-a y 1990-b) y Bergman y Hanson (1990) estudiaron un dispositivo compuesto por placas de acero con sección transversal en forma de X (figura 2.8a), llamado ADAS (Added Damping and Stiffness). La variación de la sección transversal obedece a que al desplazarse un nivel respecto al otro, las placas se deforman en doble curvatura, así que, si se empotran las placas, se genera un estado de esfuerzos casi uniforme en toda la altura del dispositivo que cambia de signo en el punto de inflexión, generalmente a media altura del dispositivo. Esto ocasiona que el esfuerzo de fluencia se pueda alcanzar prácticamente en todo el volumen del material al mismo tiempo.

Tsai *et al* (1993) estudiaron una placa triangular (similar a la mitad de una placa de ADAS) llamada TADAS. Las placas se empotran en uno de sus lados a otra placa de acero que se conecta al nivel superior del entrepiso. En el vértice del triángulo se colocan pernos que se conectan a contravientos que parten del nivel inferior del entrepiso (figura 2.8b), de modo que las placas que conforman el TADAS tiendan a deformarse en curvatura simple.

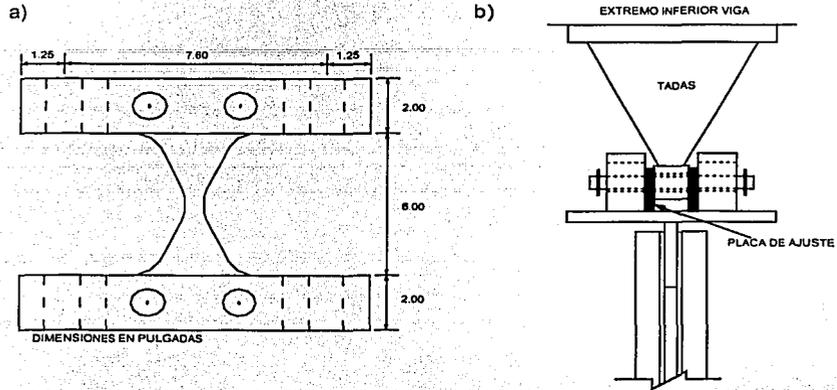


Figura 2.8 Dispositivos ADAS (Whitaker *et al*, 1989) y TADAS (Tsai *et al*, 1993)

Otro dispositivo con placas de acero de sección transversal similar al tipo ADAS es el estudiado por Kobori *et al* (1992), con la diferencia de que se encuentran unidas entre sí. Por el espacio que quedan entre ellas se las nombró del tipo panal (figura 2.9a).

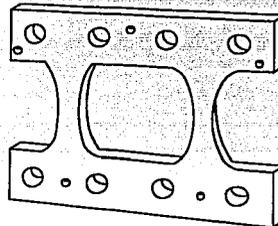


Figura 2.9 Dispositivo tipo panal (Kobori *et al*, 1992)

Otro tipo de disipador que aprovecha la deformación inelástica del acero es el denominado panel de cortante cuyo principio básico es que el alma del disipador, orientada en la dirección de aplicación de la carga, alcance la fluencia por cortante para niveles de desplazamiento relativamente pequeños. Seki *et al* (1988) desarrollaron el dispositivo mostrado en la figura 2.10a, éste se conecta por medio de un sistema de contraventeo en forma de Y invertida con la parte inferior del claro medio de las vigas. En López Bátiz *et al* (1996) y Aguilar (1998) se describen las pruebas experimentales realizadas en México de este tipo de dispositivos.

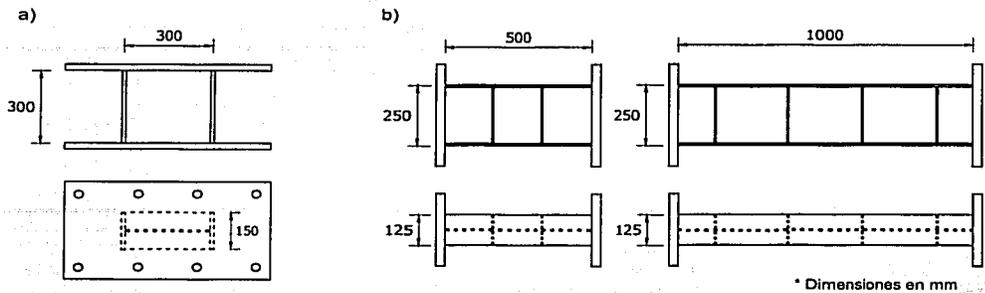


Figura 2.10 Disipadores panel de cortante a) de una celda (Seki *et al*, 1988) b) de tres y cinco celdas (Midorikawa *et al*, 1994)

Una variante de este tipo de disipadores son las estudiadas por Midorikawa *et al* (1994) y Nakashima *et al* (1994), las mismas que se muestran en las figuras 2.10b y 2.11 respectivamente.

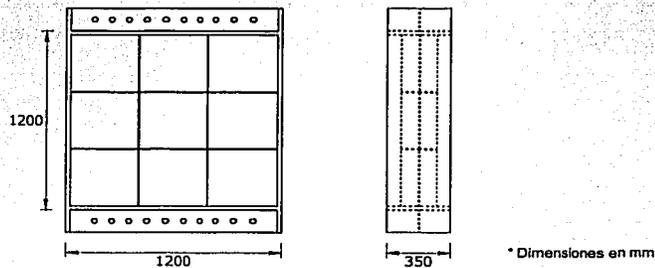


Figura 2.11 Disipador panel de cortante de nueve celdas (Nakashima *et al*, 1994)

Otro tipo de disipador que utiliza la propiedad de los metales de disipar energía por histéresis es el disipador por extrusión de plomo, el cual fue inventado por Robinson en 1971. El proceso de extrusión consiste en forzar o extruir un material a través de un agujero u orificio de manera que se produce un cambio en su forma (figura 2.12) y por consiguiente una disipación de energía.

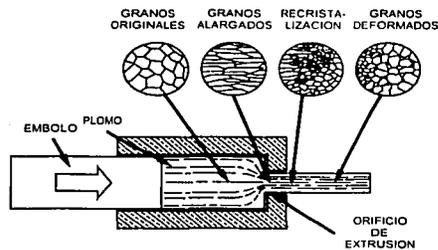


Figura 2.12 Representación de la extrusión de un metal, mostrando los cambios en la microestructura (Robinson, 1976)

Robinson y Greenbank (1975 y 1976), y Robinson y Cousins (1987 y 1988) desarrollaron y ensayaron dos dispositivos, el primero consiste en un tubo de pared delgada con dos pistones en su interior unidos por un eje delgado (figura 2.13a). Existe un estrechamiento en la sección del tubo entre ambos pistones y el espacio libre entre ellos está relleno de plomo. El plomo se mantiene separado del tubo por una delgada capa de lubricante y para evitar una fuga de la misma existen sellos hidráulicos en cada pistón. En el segundo dispositivo (figura 2.13b) está formado por un tubo de sección constante con un eje en su interior que tiene un ensanchamiento en su parte central, este eje está sujeto mediante cojinetes en cada extremo. Como existe movimiento relativo entre el eje y el tubo, el plomo debe ser extruído a través del orificio formado por el tubo y el ensanchamiento del eje.

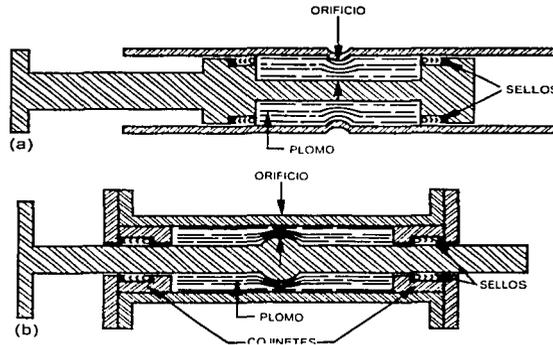


Figura 2.13 Disipadores de energía por extrusión de plomo a) Tipo tubo estrecho b) Tipo eje ensanchado (Robinson, 1976)

### 2.2.3 DISIPADORES DE FRICCIÓN

Estos dispositivos disipan energía al aprovechar la fricción que se desarrolla entre dos cuerpos rígidos que se deslizan relativamente uno del otro, así el trabajo irre recuperable es realizado por la fuerza tangencial necesaria para que ocurra el deslizamiento. En virtud de que se busca maximizar la disipación de energía, no es deseable colocar materiales lubricantes en la superficie de contacto, la cual más bien debe permanecer seca durante la operación. La teoría básica del funcionamiento de estos dispositivos se fundamenta en tres hipótesis (Soon y Dargush, 1997)

1. La fuerza de fricción total que puede ser desarrollada es independiente del área de la superficie de contacto.
2. La fuerza de fricción total que puede ser desarrollada es proporcional a la fuerza normal total actuando a través de la superficie de contacto.
3. Para el caso en que la velocidad de deslizamiento es baja, la fuerza total de fricción es independiente de dicha velocidad.

Pall y Marsh (1982) desarrollaron el dispositivo mostrado en la figura 2.14, el cual consiste en contravientos diagonales con una zona de traslape de fricción en su punto de intersección, dichas diagonales se encuentran además unidas por medio de miembros de enlace horizontales y verticales.

Estos miembros de enlace aseguran que cuando el valor de la fuerza, aplicada por medio de los contravientos, sea suficiente para iniciar el desplazamiento en la diagonal a tensión, asegurando también se deslice la diagonal de compresión en igual cantidad en la dirección opuesta. La resistencia a la fricción del dispositivo depende de una fuerza normal sobre la zona de deslizamiento, lo que se logra a través de un perno o tornillo en el cruce de los elementos diagonales.

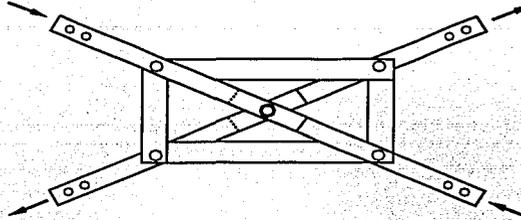


Figura 2.14 Dispositivo de fricción para contravientos en forma de X (Pall y Marsh, 1982)

A mediados de la década del 80, Watanabe *et al* (1988) desarrollaron el dispositivo por fricción mostrado en la figura 2.15, el mismo está compuesto por un puntal formado de placas soldadas de acero, generalmente de baja fluencia, con sección transversal en forma de cruz, dicho puntal se coloca dentro de un tubo de acero de sección circular o rectangular, y posteriormente se rellena el espacio libre entre el tubo y el puntal con un material similar al concreto. El puntal se recubre de un material especial para que no exista adherencia entre el material de relleno y el acero. El puntal en forma de cruz se asegura a un nivel de la estructura y del tubo al otro nivel, de modo que exista desplazamiento relativo entre ambos elementos y se disipe energía por fricción con el material de relleno.

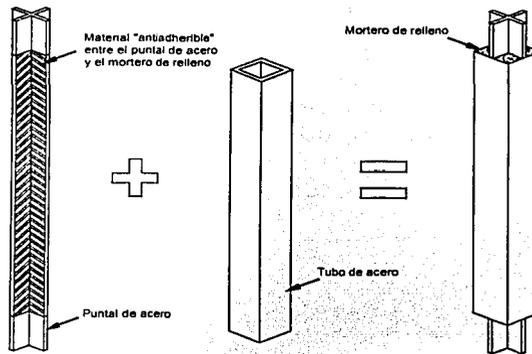


Figura 2.15 Puntal antiadherible (Watanabe *et al*, 1988)

Dos dispositivos de fricción más modernos se muestran en las siguientes figuras. El primero de estos es el dissipador de fricción Sumitomo (figura 2.16) el cual fue utilizado en Japón (Aiken y Kelly, 1990), el mismo está formado por una cubierta cilíndrica de acero en cuyo interior se deslizan unos cojinetes

de fricción hechos de una aleación de cobre. La fuerza normal requerida es proporcionada a través de la acción de un resorte contra las cuñas internas y externas.

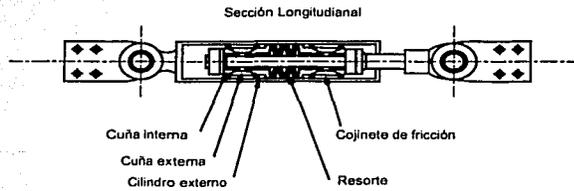


Figura 2.16 Dissipador de fricción Sumitomo (Aiken y Kelly, 1990)

En la figura 2.17 se muestra un dissipador más sofisticado descrito por Nims *et al* (1993). En este diseño la disipación de energía ocurre en la superficie entre las cuñas de fricción de bronce y la pared del cilindro de acero. La combinación de cuñas, topes y resortes internos produce una fuerza de fricción proporcional al desplazamiento relativo entre sus extremos.

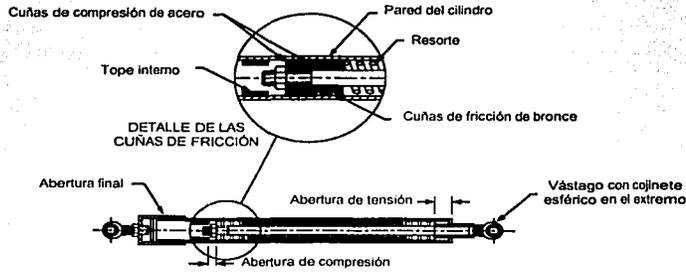


Figura 2.17 Dispositivo de fricción (Nims *et al*, 1993)

La figura 2.18 muestra una típica conexión atornillada con agujeros oblongos proyectada para su uso en marcos con contravientos concéntricos. Varias versiones han aparecido en la literatura. FitzGerald *et al* (1989) emplearon acero estructural para todos los componentes, mientras que Grigorian *et al* (1993) se inclinaron por insertar placas de latón. En ambos casos, arandelas tipo Belleville son utilizadas para mantener la tensión inicial de los pernos.

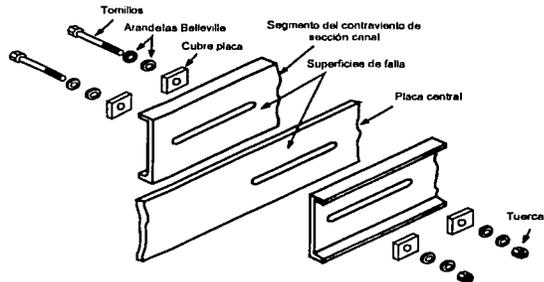


Figura 2.18 Conexión atornillada con agujeros oblongos (FitzGerald *et al*, 1989)

## 2.2.4 DISIPADORES VISCOELÁSTICOS

La aplicación de materiales viscoelásticos para el control de vibraciones se remonta desde la década del 50 cuando se usaron por primera vez en la industria aeronáutica para controlar las vibraciones que inducían fatiga en la estructura de las aeronaves. Su uso en la ingeniería civil tiene comienzo en 1969 cuando se instalan 10,000 amortiguadores viscoelásticos en cada una de las torres gemelas del extinto World Trade Center en Nueva York, para ayudar a resistir las cargas de viento. Las aplicaciones sísmicas de disipadores viscoelásticos tienen un origen más reciente, para éste uso generalmente se requieren mayores incrementos de amortiguamiento en comparación con los requeridos para mitigar las vibraciones inducidas por el viento. Además, la energía inducida a la estructura tiene un intervalo de frecuencias más amplio, requiriéndose de materiales viscoelásticos más efectivos (Soon y Dargush, 1997).

Existen dos tipos de dispositivos viscoelásticos: sólidos y de fluido. En los primeros, los materiales viscoelásticos usados son generalmente polímeros, los cuales disipan energía cuando son sujetos a deformaciones por cortante. A diferencia de los disipadores descritos anteriormente, las propiedades mecánicas de estos dispositivos dependen de la temperatura además de la frecuencia y amplitud del movimiento. Así, por ejemplo, bajo una carga sinusoidal de cierta frecuencia, las deformaciones y esfuerzos por cortante de una material viscoelástico lineal oscilarán con la misma frecuencia pero generalmente fuera de fase.

Un típico disipador viscoelástico sólido se muestra en la figura 2.19, éste consiste en varias capas viscoelásticas unidas con placas de acero. Cuando la vibración estructural induce movimientos relativos entre los patines exteriores y la placa central del dispositivo, ocurren en el mismo, deformaciones por cortante y con ello la disipación de energía tiene lugar.

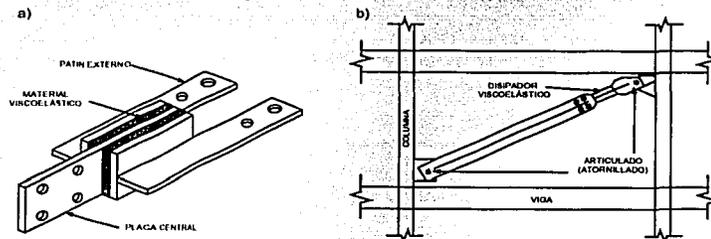


Figura 2.19 a) Dispositivo viscoelástico típico, b) Ubicación del dispositivo (Soon y Dargush, 1997)

Los dispositivos viscoelásticos de fluido, operan bajo el principio de deformación (por cortante) del fluido, tienen un comportamiento similar al de los dispositivos viscoelásticos sólidos; sin embargo, tienen una rigidez efectiva nula bajo condiciones de carga estática y variable en función de la velocidad demandada en los componentes del dispositivo.

Ambos dispositivos se distinguen por la relación de pérdida de rigidez a rigidez efectiva. Conforme la frecuencia de la carga se aproxima a cero esta relación se aproxima al infinito en dispositivos de fluido y a cero en dispositivos sólidos (Whittaker *et al*, 1999).

Otro dispositivo que puede mencionarse en este grupo, aunque su principio de funcionamiento es un tanto diferente al mencionado en los párrafos anteriores, es el desarrollado por Oiles Industry Co., Ltd. of Tokio, Japón, y estudiado por Scholl (1984). Este dispositivo se instala en la intersección de los contravientos, mecánicamente consiste en dos discos giratorios y cuatro conexiones (figura 2.20), las cuales son el vínculo entre el dispositivo y los contravientos. Cuando se presenta un desplazamiento relativo en el entrepiso, los discos son forzados a girar en sentido contrario uno del otro, produciéndose dos tipos de fuerzas: 1) una fuerza elástica proporcional al desplazamiento y 2) una fuerza de amortiguamiento proporcional a la velocidad.

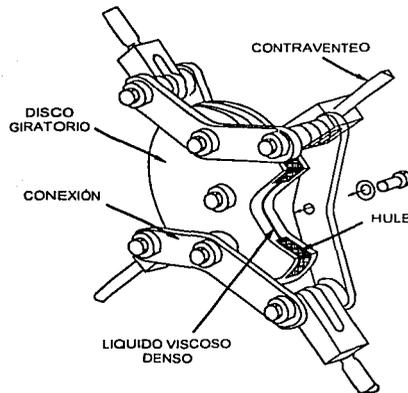


Figura 2.20 Dispositivo desarrollado por Oiles Industry Co., Ltd. (Scholl, 1984)

### 2.2.5 AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO

Todos los disipadores vistos hasta el momento utilizan la acción de materiales sólidos para mejorar el desempeño de estructuras sujetas a fuerzas naturales transitorias; sin embargo, los fluidos también pueden ser empleados para lograr el nivel deseado de control activo. El concepto de amortiguador de fluido para reducir vibraciones y movimientos es bien conocido, un claro ejemplo son los amortiguadores de automóvil.

En este tipo de dispositivos, la disipación de energía ocurre por medio de la conversión de la energía mecánica en calor cuando un pistón deforma una sustancia gruesa y muy viscosa, semejante al gel de silicón.

La figura 2.21 describe un amortiguador particular fabricado por GERB Vibration Control para ser usado como componente en sistemas de aislamiento de base (Huffman, 1985; Makris y Constantinou, 1990). El dispositivo está formado por un pistón de gran diámetro colocado dentro de un recipiente cilíndrico que contiene algún fluido viscoso, algunas veces se incluyen costillas u otros detalles geométricos en el pistón para mejorar su desempeño. Su configuración axisimétrica provee movimiento, y con ello disipación de energía, en los seis grados de libertad.

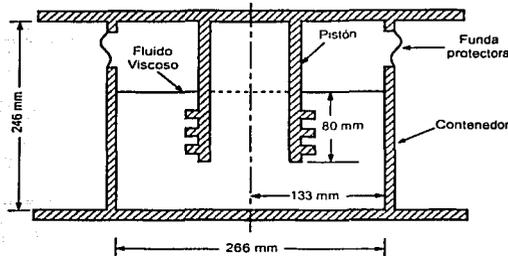


Figura 2.21 Amortiguador GERB de contenedor cilíndrico (Makris y Constantinou, 1990)

Otro dispositivo de este tipo es el muro de amortiguamiento viscoso (figura 2.22), descrito por Arima *et al* (1988), en este diseño el pistón es simplemente una placa de acero restringida a moverse en su plano dentro de un contenedor de acero, estrecho y de forma rectangular relleno con un fluido viscoso. En una instalación típica el pistón se sujeta al piso superior y el contenedor al inferior, de manera que el desplazamiento relativo entre ambos produce que el pistón corte el fluido y de esta manera se disipa energía.

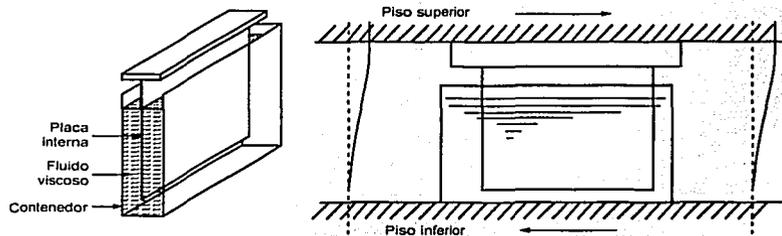


Figura 2.22 Muro de amortiguamiento viscoso (Arima *et al*, 1988)

Los dos dispositivos descritos anteriormente cumplen sus objetivos a través de la deformación de un fluido viscoso residente en un contenedor abierto; sin embargo, existe otra clase de amortiguadores en el que tiene lugar un flujo dentro de un contenedor cerrado. En estos diseños, el pistón actúa ahora no sólo deformando el fluido localmente sino que obliga al mismo a pasar a través de pequeños orificios, dando como resultado grandes niveles de disipación de energía. Sin embargo, el diseño interno del dispositivo requiere un alto nivel de complejidad.

Un Dispositivo Taylor, típico amortiguador de fluido para aplicaciones sísmicas se ilustra en la figura 2.23 (Constantinou *et al* 1993; Constantinou y Symans, 1993). Este dispositivo cilíndrico contiene aceite de silicón compresible el cual es forzado a fluir por medio de un pistón de acero con cabeza de bronce, en la cual existe un orificio de control de flujo diseñado con un termostato bimetálico pasivo para compensar los cambios de temperatura. Adicionalmente se tiene una cámara de acumulación para compensar los cambios de volumen debido a la posición del pistón.

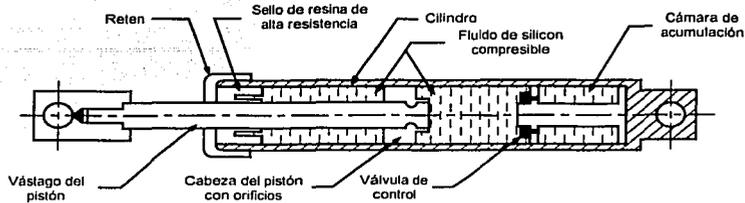


Figura 2.23 Amortiguador de fluido, tipo Taylor (Constantinou *et al*/1993)

### 2.2.6 OSCILADORES RESONANTES

El objetivo de incorporar un oscilador resonante en una estructura es básicamente el mismo que está asociado a cualquiera de los disipadores de energía descritos anteriormente, es decir, reducir la demanda de disipación de energía en los miembros estructurales primarios. En este caso la reducción se logra por la transferencia de una parte de la energía vibratoria de la estructura al oscilador resonante, el cual en forma simple consiste en una masa adicional con propiedades dinámicas establecidas. Esta masa generalmente se adiciona en una estructura como un apéndice o un tanque de agua.

Uno de los primeros investigadores en abordar el tema de los osciladores resonantes fue Den Hartog (1956), quien demostró que con ciertos parámetros dinámicos del sistema conjunto pueden obtenerse reducciones importantes en la respuesta. En un sistema de dos grados de libertad, si la frecuencia de la carga coincide con la frecuencia de vibrar de la segunda masa (oscilador resonante), el movimiento de la masa principal es nulo, mientras que el oscilador se ve sometido a una fuerza de igual magnitud y sentido contrario a la fuerza de excitación.

Muchos de los primeros desarrollos de amortiguadores dinámicos estuvieron limitados a la ingeniería mecánica, donde una frecuencia de operación está en resonancia con la frecuencia fundamental de la máquina. Sin embargo, las estructuras están sujetas a cargas de viento o sismo las cuales poseen muchas componentes de frecuencia, además las edificaciones tienen cierto amortiguamiento y gran número de ellas poseen múltiples y complejos grados de libertad. Por lo tanto, el diseño e implantación de un oscilador resonante que tenga un comportamiento óptimo para un amplio intervalo de eventos resulta una tarea bastante compleja.

A continuación se presentan algunas de las configuraciones de osciladores resonante que se han desarrollado. En la figura 2.24a se muestra esquemáticamente un oscilador resonante del tipo péndulo simple, en el cual el periodo de vibración depende únicamente de su longitud. Este tipo de dispositivo tiene el inconveniente de requerir frecuentemente de un gran espacio para alcanzar la frecuencia de resonancia. Una alternativa a esta situación es modificar el péndulo básico de tal manera que el periodo dependa tanto de su longitud como de su masa.

Por ejemplo Grossman (1990) propone diseñar el brazo del péndulo como una barra rígida con contrapesos (figura 2.24b). Otra forma descrita en Soon y Dargush (1997) es utilizar dos masas, una

de las cuales se desliza en el piso del edificio y la otra actúa como péndulo (figura 2.24c). En ambos casos se puede ajustar con facilidad su frecuencia natural hasta que entre en resonancia con la frecuencia de la estructura. Una alternativa que soluciona los problemas de espacio es el péndulo de rodillos propuesto por Okumura Co. (1991) y mostrado en la figura 2.24d. En este caso el peso del equipo es menor o igual al de un péndulo simple.

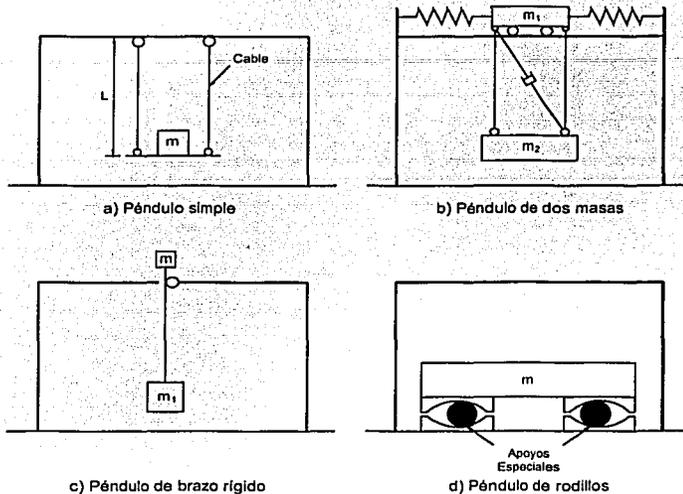


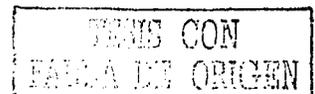
Figura 2.24 Formas diversas de osciladores resonantes (Soon y Dargush, 1997)

### 2.3 AISLAMIENTO SÍSMICO

El aislamiento sísmico consiste esencialmente en la instalación de mecanismos que desacoplen ésta y/o sus contenidos, del movimiento del suelo durante un temblor. Este desacoplamiento se consigue con el incremento de la flexibilidad del sistema junto con proporcionar un adecuado amortiguamiento. En muchas, pero no en todas las aplicaciones, los sistemas de aislamiento sísmico se instalan debajo de la estructura y son llamados "aisladores de base" (Skinner *et al*, 1993).

La característica más importante del aislamiento sísmico es el aumento de la flexibilidad de la estructura con lo cual el periodo natural de la misma también se incrementa. Esto ocasiona un aumento de los desplazamientos horizontales, los cuales son contrarrestados proporcionando a la estructura algún tipo de amortiguamiento adicional. Para lo cual se pueden utilizar disipadores metálicos o amortiguadores viscosos los cuales además disipan la energía inducida por un sismo.

En la figura 2.25 se ilustra esquemáticamente el concepto de aislamiento sísmico. El edificio de la izquierda tiene un diseño antisísmico convencional, mientras que el de la derecha ha sido montado sobre un sistema de aislamiento sísmico. En la figura se puede ver como la acción de grandes fuerzas sísmicas sobre el edificio de la izquierda han causado deformaciones considerables y agrietamiento en



su estructura. En la estructura aislada de la derecha, las fuerzas son mucho menores y la mayoría de los desplazamientos ocurren en el sistema de aislamiento, con pequeñas deformaciones en la estructura misma, la cual se movió casi como un cuerpo rígido. La disipación de energía en el sistema con aislamiento es proporcionada por disipadores hysteréticos o viscosos, mientras que en el sistema sin aislamiento la disipación de energía resulta principalmente del daño estructural.

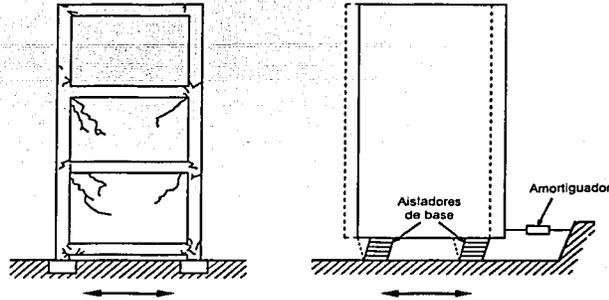


Figura 2.25 Representación esquemática de edificios con y sin aislamiento sísmico (Skinner *et al*, 1993)

Entre los primeros aisladores de base fabricados comercialmente se encuentran los apoyos rectangulares o circulares formados con placas de hule o neopreno intercaladas con placas más delgadas de acero. Este sistema es muy flexible horizontalmente pero tiene gran rigidez vertical. Robinson y Tucker (1977) y Robinson (1982) estudiaron un aislador al cual se le insertó un corazón de plomo (figura 2.26), la principal ventaja de este aislador respecto a los mencionados anteriormente fue el incremento sustancial de la disipación de energía y, con la presencia del corazón de plomo, el incremento del amortiguamiento viscoso que permite contrarrestar las demandas de movimiento por efecto ambiental.

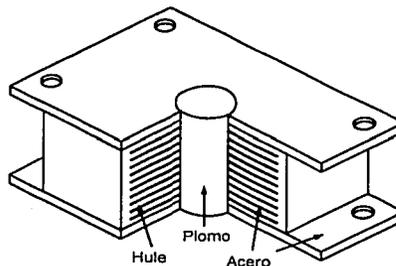


Figura 2.26 Aislador de base de hule con corazón de plomo (Skinner *et al*, 1993)

Otro tipo de aislador es el propuesto por Zayas *et al* (1990) y Bozzo *et al* (1990), éste consiste en un sistema de aislamiento de superficie cóncava basado en el movimiento de un péndulo. La fuerza restitutiva es proporcionada por la forma del dispositivo. El material con que se fabrica es acero y en la zona de deslizamiento cromo (figura 2.27). Por la geometría del aislador, el período no depende de la carga vertical aplicada, y su rigidez es directamente proporcional a la carga. lo que hace que las

torsiones provocadas por concentraciones de masa en la estructura disminuyan en el nivel de aislamiento. Su principal desventaja es que el cromo se adhiere con el tiempo.

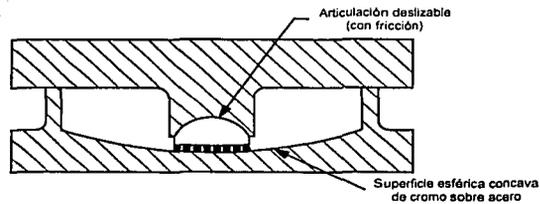


Figura 2.27 Aislador de base tipo péndulo de fricción (Zayas *et al*, 1990)

Un dispositivo similar al anterior pero que incluye dispositivos disipadores de energía se utilizó en la construcción del puente Mortaiolo en Italia (Parducci y Mezzi, 1991). Este dispositivo tiene un apoyo esférico que absorbe los desplazamientos relativos entre los estribos y la superestructura. El amortiguamiento y disipación de energía se produce por comportamiento histerético en flexión de numerosas barras de acero en cantiliver colocadas sobre un anillo. (figura 2.28).

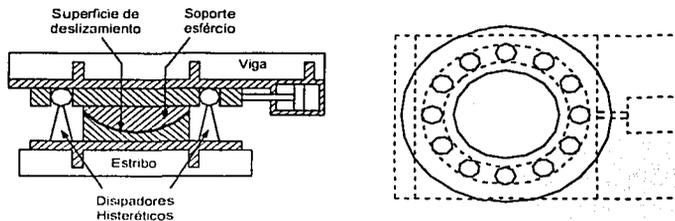


Figura 2.28 Esquema del aislador usado en el puente Mortaiolo (Parducci y Mezzi, 1991)

## 2.4 CONTROL ACTIVO Y SEMIACTIVO

El control activo de la respuesta dinámica de una estructura consiste en un mecanismo que se ajusta a la excitación presente durante un sismo y que se retroalimenta con la respuesta que está ocurriendo. Este principio se basa en contrarrestar el movimiento de la estructura mediante la aplicación de fuerzas externas.

El movimiento se detecta mediante la inclusión de sensores en varias partes de la estructura, los cuales se conectan a una computadora. Ésta procesa la información y mediante un algoritmo previamente programado calcula la respuesta de la estructura, en función de la cual envía señales a actuadores que aplican desplazamientos y fuerzas a la misma con el propósito de reducir el movimiento generado por el sismo.

Otro sistema para reducir la respuesta estructural es el control semiactivo, el cual reúne casi las mismas ventajas que un sistema activo pero no paga las penalidades asociadas a éste, como son el consumo elevado de energía y la complejidad del mismo.

Algunos de los sistemas de control activo desarrollados son: tendones activos y masa activa.

Los tendones activos son contravientos colocados diagonalmente en forma de X, que abarcan uno o varios niveles de la estructura (figura 2.29). Cada tendón cuenta con un actuador que regula la fuerza de tensión que se aplica a cada uno de ellos. El objetivo de estos tendones es modificar la rigidez de la estructura tratando de alejar el periodo fundamental de la misma de las frecuencias dominantes del sismo para cada instante, y así impedir amplificaciones grandes del movimiento debidas al fenómeno de la resonancia.

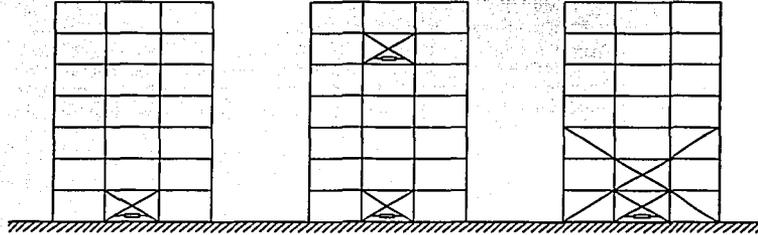


Figura 2.29 Sistema de tendones activos

El sistema de masa activa es una extensión del sistema pasivo de osciladores resonantes y consiste en una masa adicional colocada por lo general en el último nivel de un edificio, dicha masa no se encuentra fija sino por el contrario puede ser movida mediante actuadores controlados por una computadora, los mismos que aplican en cada instante, movimientos correctivos a la masa adicional con el fin de reducir la respuesta de la estructura.

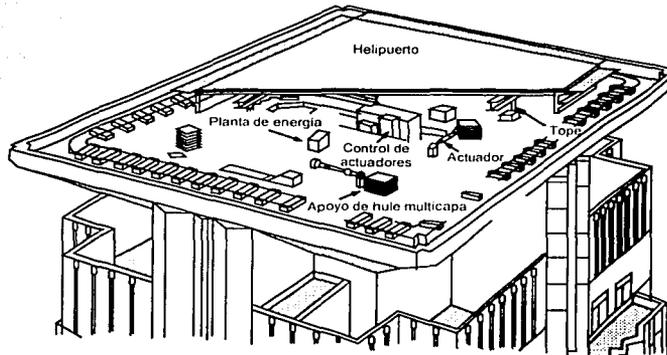


Figura 2.30 Esquema del sistema de control activo del edificio Hankyu Chayamashi (Soon y Dargush, 1997)

Uno de estos sistemas está instalado en el edificio Hankyu Chayamashi en Osaka, Japón. En este caso se utiliza el helipuerto de 480 toneladas de peso como la masa móvil del sistema. El nivel donde se encuentran los diferentes dispositivos se muestra en la figura 2.30. Para mover la masa se utilizan dos actuadores de 5 t de capacidad, colocados ortogonalmente, que empujan dos de los seis apoyos elastoméricos sobre los cuales se encuentra el helipuerto (Soon y Dargush, 1997).

### **3 TRABAJO EXPERIMENTAL**

La gran mayoría de los dispositivos mencionados en el capítulo anterior tienen un gran apoyo analítico y experimental, muchos de estos desarrollos se encuentran patentados, lo cual encarece su costo y los coloca en una posición difícil de alcanzar para la ingeniería estructural de escasos recursos.

El dispositivo tipo panel de cortante por su sencillez de fabricación y al no contar con patentes de desarrollo tecnológico se constituye en una opción sencilla, económica y viable de ser implantada por el profesional del diseño estructural; sin embargo, no se cuenta con amplia información acerca del comportamiento del mismo. Con base en estos aspectos, se optó por hacer un estudio analítico-experimental sobre este tipo de dispositivo.

En este capítulo se presenta el modelo seleccionado para llevar a cabo las pruebas de los DPC, el equipo de aplicación de carga, la instrumentación del modelo y un análisis de los resultados básicos generales del sistema estructura-dispositivo disipador de energía.

#### **3.1 MODELO SELECCIONADO Y TIPO DE DISIPADOR**

Para realizar el ensaye de los disipadores, se utilizó un marco plano de un nivel y una crujía, construido en acero, que puede idealizarse como un sistema de un grado de libertad dinámico. Las pruebas experimentales de este trabajo contemplaron la utilización de tres dispositivos disipadores de energía tipo panel de cortante (DPC) de diferentes características geométricas como se mencionará más adelante.

El principio básico de comportamiento del sistema estructural es que el panel alcance la fluencia por cortante para niveles de desplazamiento relativo pequeños, mientras que los demás elementos de la estructura permanezcan dentro del intervalo elástico ante la demanda de fuerzas y desplazamientos laterales. Es decir, se demanda disipar energía por medio del panel a niveles de desplazamiento en que la estructura que lo contiene permanece en comportamiento elástico.

### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MARCO

El marco plano utilizado para el ensaye tiene 1.80 m. de altura y 3.60 m. de claro (figura 3.1), ambas medidas son a ejes de los elementos. El acero utilizado para los diferentes elementos estructurales es A-50, con un esfuerzo nominal a la fluencia de  $3500 \text{ Kg/cm}^2$ .

El modelo está formado por una viga de acero estructural de gran rigidez y resistencia (figura 3.2) que hace las veces de cimentación, dicha viga está colocada sobre dos placas ( $1.15 \times 1.15 \times 0.13 \text{ m}$  y  $1.0 \times 0.40 \times 0.08 \text{ m}$ ) en cada extremo, dichas placas se encuentran soldadas entre sí, la placa mayor se ancló a la losa de reacción del laboratorio mediante seis barras de alta resistencia de 38 mm ( $1\frac{1}{2}$  pulg) de diámetro, para transmitir, por fricción, a la losa de reacción las fuerzas laterales que se aplican al marco; estas barras se postensaron a 50 t.

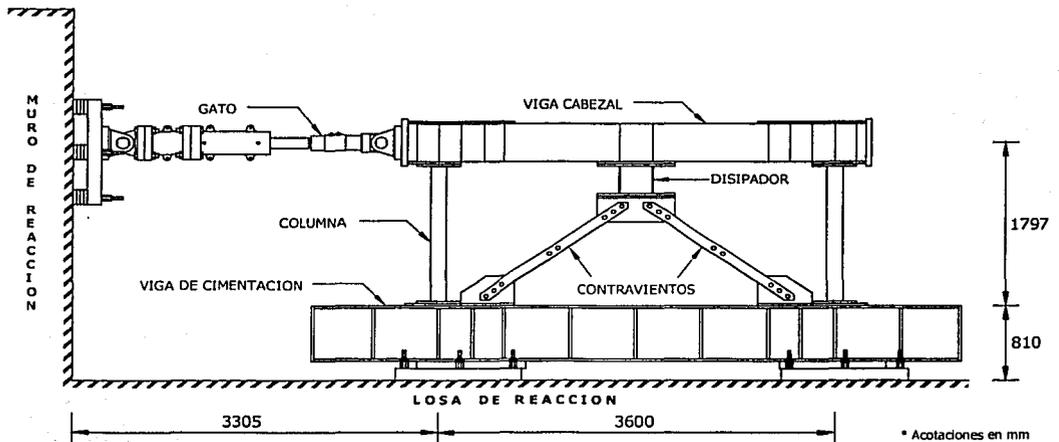


Figura 3.1 Esquema del marco

Sobre la viga de cimentación se fijaron las columnas del marco (figura 3.3), que son de sección H  $262 \times 147 \times 6.6 \times 11.2$  y con una altura de 1.54 m. Con el fin de que el DPC adquiera una mayor participación en resistencia y rigidez, y que las columnas tengan una contribución menor a cortante, éstas se orientaron con su inercia menor en el sentido de aplicación de la carga; además, al estar orientadas en este sentido dan una mayor estabilidad al marco en el sentido perpendicular a su plano, permitiendo que no se requiera dispositivos adicionales para lograr la estabilidad fuera del plano del mismo durante el proceso de aplicación de carga.

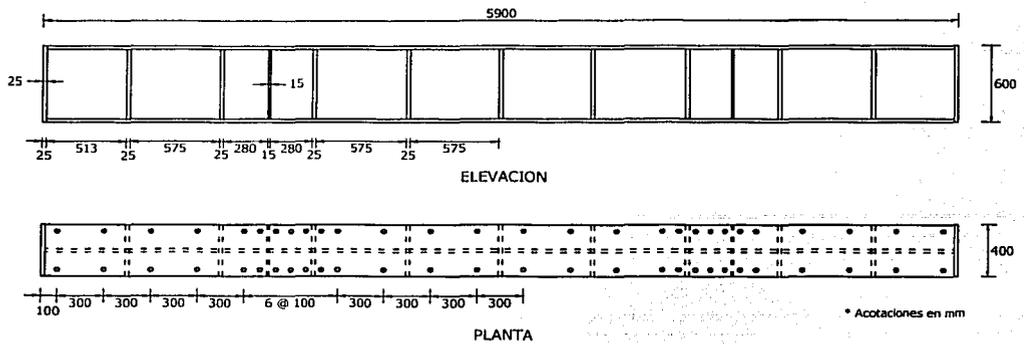


Figura 3.2 Viga de cimentación

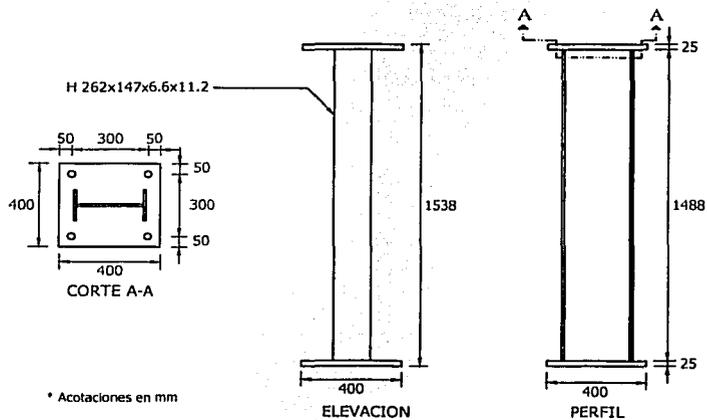


Figura 3.3 Columnas

Sobre las columnas se fijó la viga cabezal (figura 3.4) de sección H 413x180x9.7x16 y de una longitud de 4.27 m, orientada con su mayor momento de inercia en el plano del marco. Todas las uniones entre los diferentes elementos son atornilladas, utilizándose en las mismas tornillos de alta resistencia de 30 mm de diámetro.

Los dispositivos disipadores se instalaron en la parte inferior del claro medio de la viga mediante un sistema de contraventeo en forma de Y invertida (figura 3.5), compuesto de dos perfiles laminados de sección canal 102x40.13x4.57x7.52 (espalda con espalda). El sistema se sujetó al DPC y a la viga de cimentación, mediante uniones en forma de T, formadas por una placa de 26 mm de espesor a la que se unió perpendicularmente, mediante soldadura de filete, una placa de 9.5 mm de espesor, la primera se atornilló al DPC o a la viga de cimentación y la segunda a cada elemento del contraventeo.

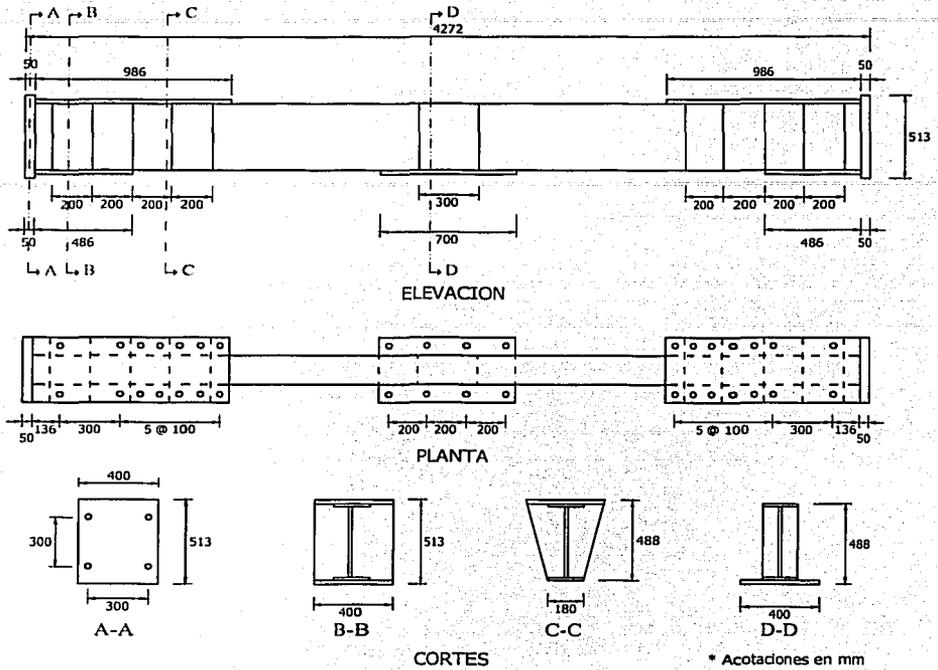


Figura 3.4 Viga cabezal

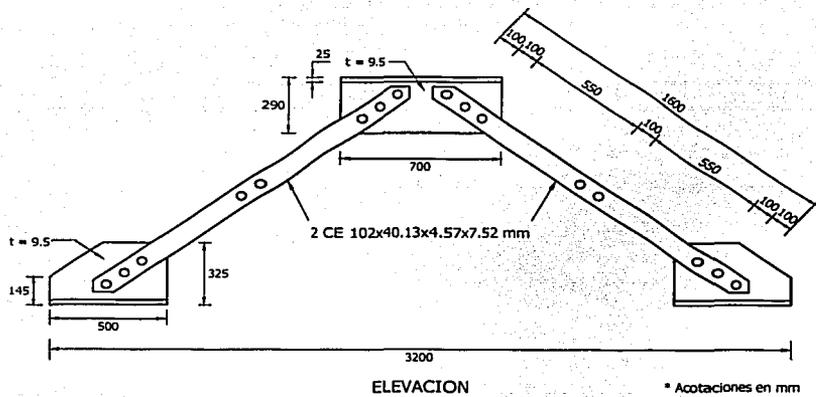


Figura 3.5 Sistema de contraventeo

### 3.1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DISIPADORES

Los DPC que se utilizaron fueron de sección transversal I, contruidos con placas de acero A-50 ( $F_y=3500 \text{ kg/cm}^2$ ), las cuales se unieron mediante soldadura de filete. Para la sujeción de los mismos al marco de prueba y al sistema de contraventeo se soldaron en sus extremos superior e inferior dos placas base de  $700 \times 400 \times 26 \text{ mm}$ , las cuales se unieron mediante tornillos de alta resistencia con los elementos mencionados.

Las diferencias entre los tres tipos de disipadores fueron el espesor de la placa que formaba el alma y la existencia o no de un atiesador (horizontal o vertical) en la parte media del alma para restringir su pandeo. Para facilitar el reconocimiento de los mismos se denominaron de la siguiente manera:

1. Disipador panel de cortante sin atiesador en el alma, DPC-SA
2. Disipador panel de cortante con atiesador horizontal en el alma, DPC-AH
3. Disipador panel de cortante con atiesador vertical en el alma, DPC-AV

Las dimensiones de los dispositivos, en el siguiente orden: alto, largo, ancho, espesor del alma y espesor de los patines fueron de  $297 \times 296.3 \times 150 \times 7.5 \times 13.3 \text{ mm}$ ,  $300 \times 313.3 \times 150 \times 5.4 \times 13.3 \text{ mm}$  y  $298 \times 298.3 \times 150 \times 3.9 \times 13.3 \text{ mm}$  para los especímenes DPC-SA, DPC-AH y DPC-AV respectivamente. Las características geométricas completas de los tres tipos de disipadores se presentan en la figura 3.6

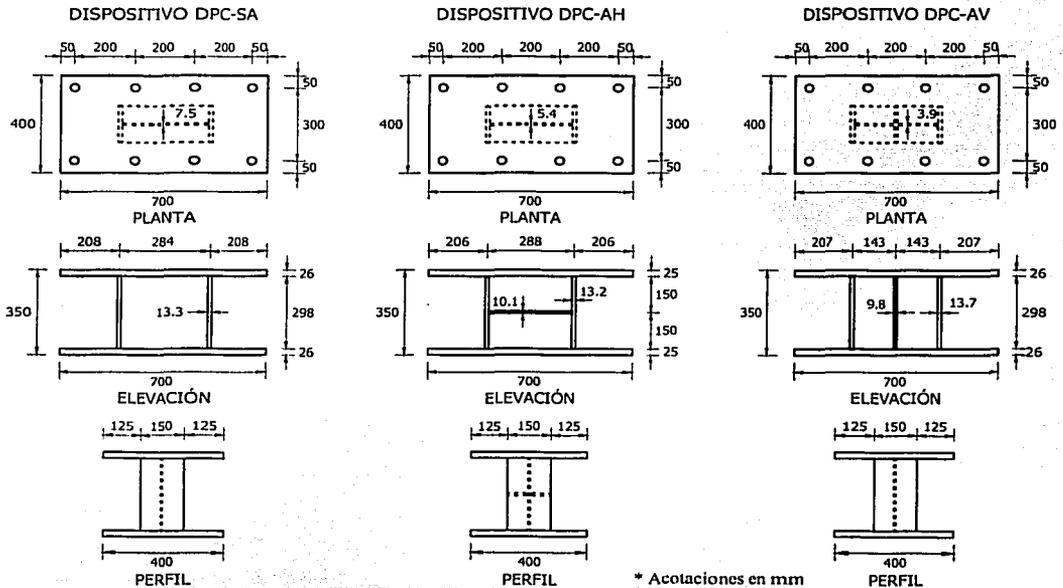


Figura 3.6 Características geométricas de los dispositivos disipadores panel de cortante

## 3.2 PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA DE PRUEBA

### 3.2.1 DISPOSITIVO DE CARGA

El dispositivo que se utilizó para aplicar la carga al modelo durante el ensaye fue un gato hidráulico de doble acción (figura 3.7), que es controlado por una bomba eléctrica manual. El gato es capaz de aplicar fuerzas de compresión y de tensión, simulando los efectos de carga horizontal que incide en la estructura por efecto de un sismo (la capacidad máxima del mismo es de 100 toneladas, con un desplazamiento de  $\pm 200$  mm). Un extremo del gato se fijó a una placa de acero ( $1.15 \times 1.15 \times 0.13$  m) mediante tornillos de 30 mm de diámetro, dicha placa se sujetó al muro de reacción a través de seis barras de alta resistencia de 38 mm ( $1\frac{1}{2}$  pulg) de diámetro, post-tensadas a 50 t. El otro extremo del gato se conectó directamente al extremo de la viga cabezal del modelo mediante tornillos.

### 3.2.2 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación que se utilizó se diseñó para medir, simultáneamente, la respuesta del modelo en diversos puntos, siendo las variables sujetas a medición las siguientes: la carga lateral aplicada por el gato, el desplazamiento lateral de la viga cabezal del modelo, el desplazamiento relativo del dispositivo disipador, el estado de esfuerzos por flexión en las columnas del marco, el estado de esfuerzos axiales en los contravientos, las deformaciones por cortante en el panel del disipador y el estado de esfuerzos por flexión en los patines del mismo.

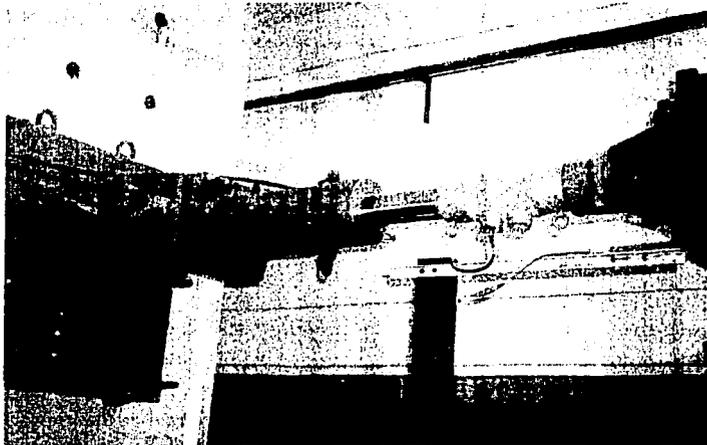


Figura 3.7 Gato hidráulico

Para medir la carga lateral se empleó una celda de carga interna en el gato, el desplazamiento lateral se midió mediante transductores de desplazamiento, el estado de esfuerzos por flexión se obtiene indirectamente de la medición de las deformaciones unitarias por flexión, las cuales, al igual que las de corte, se miden con deformímetros eléctricos (tipo adhesivo).

En la tabla 3.1 se muestra un resumen de la instrumentación utilizada, así como el canal al que se asociaron dentro del proceso de prueba.

Tabla 3.1 Instrumentación

No. Canal	Descripción
00	Celda de carga interna del gato
01 - 02	Transductor de desplazamiento (200 mm)
03 - 04	Transductor de desplazamiento (100 mm)
05 -08	Micrómetro de carátula
09	Libre
10 - 57	Deformímetro (en columnas)
58 - 61	Deformímetro (en contravientos)
62 - 81	Deformímetro (en DPC)

Un esquema completo de la colocación de los diferentes instrumentos y elementos de medición se muestra en las figuras 3.8 y 3.9.

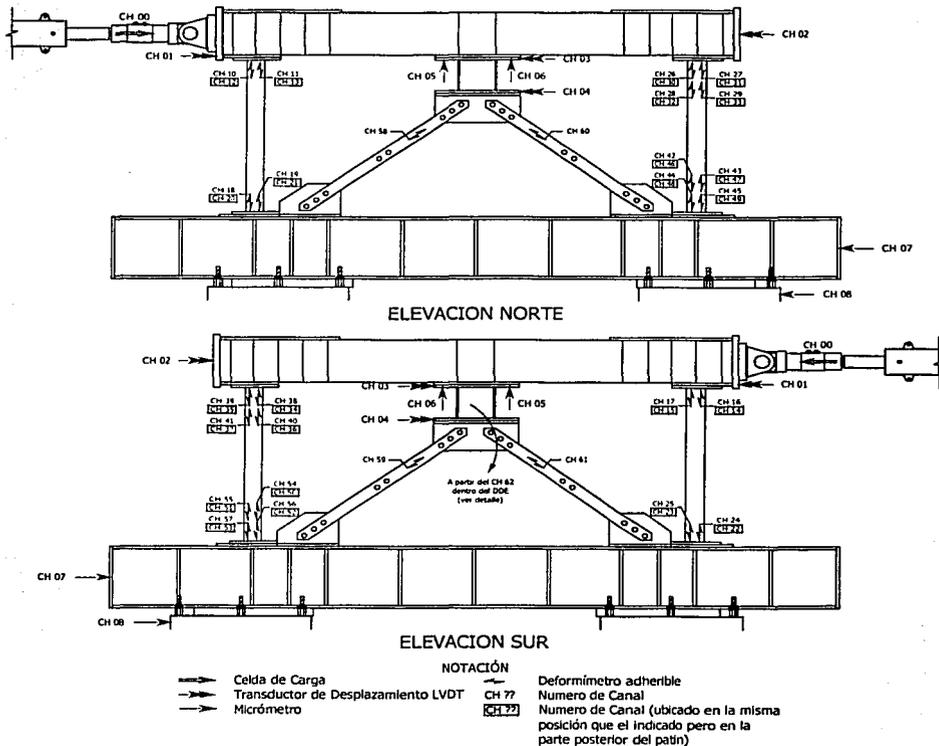


Figura 3.8 Instrumentación colocada en el marco

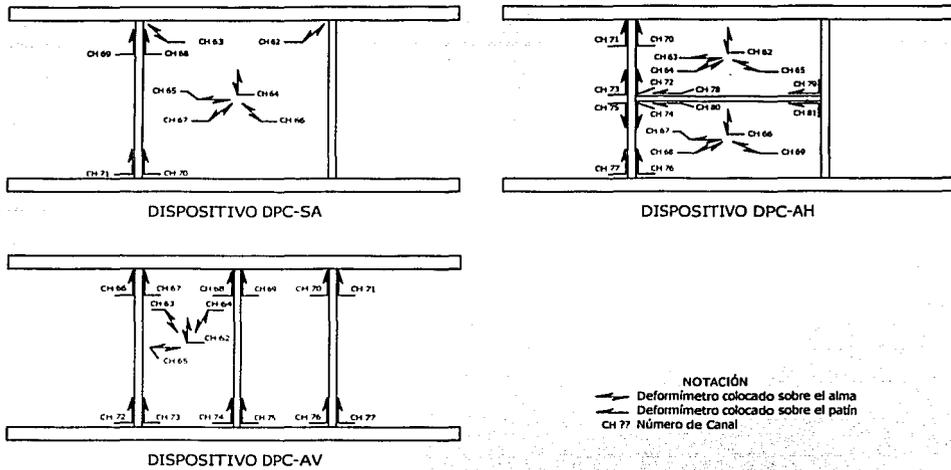
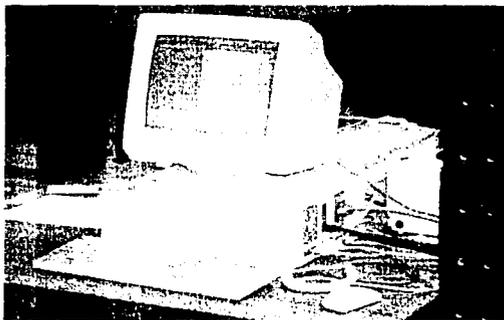


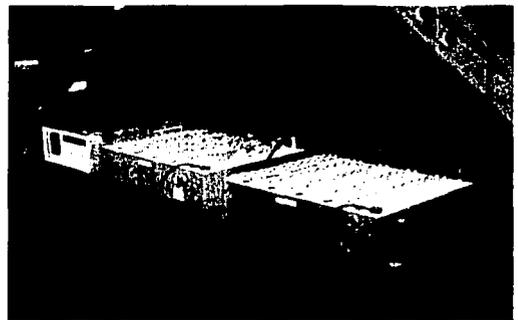
Figura 3.9 Instrumentación colocada en los dispositivos disipadores

### 3.2.3 LECTURA DE DATOS

La lectura de datos se realizó mediante una caja de interruptores automática en la cual fueron conectados los transductores y deformímetros en su respectivo canal, y posteriormente programados mediante un generador multicanal de funciones TDS-301. En este generador se pueden programar manualmente cada instrumento según su escala de medición, pero en este caso, al estar conectado a una computadora personal, se utilizó el programa ADD 1.0 (Flores, 1996).



a) Computadora Personal



b) TDS-301 y cajas de interruptores

Figura 3.10 Equipo de adquisición de datos

Además de la programación, este programa permite leer la información de los diferentes canales que conforman el sistema, pudiendo mostrar en pantalla, durante la ejecución del ensayo, varias gráficas

de las diferentes mediciones, así como almacenar los datos en archivos de disco y/o imprimirlos en papel. La figura 3.10 muestra el equipo usado en la adquisición de datos.

### **3.2.4 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA**

El ensaye de los dispositivos disipadores de energía se llevó a cabo en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, y contempló la ejecución de cuatro ensayos, en el orden que se detalla a continuación.

- Marco sin disipador o marco solo
- Marco con DPC-SA
- Marco con DPS-AH
- Marco con DPC-AV

Todos los ensayos realizados consistieron en pruebas estáticas, en las cuales se aplica la carga lateral en forma cíclica y monótona, permaneciendo temporalmente en un estado de desplazamiento prefijado. Este tipo de pruebas permiten conocer el comportamiento del modelo hasta el nivel máximo de su capacidad de carga y deformación horizontal de acuerdo al programa de carga que se requiera.

### **3.2.5 HISTORIA DE CARGA**

La historia de carga se escogió considerando similar la historia de desplazamientos aplicable al modelo, con los resultados obtenidos de un análisis no lineal de la respuesta de un sistema de un grado de libertad dinámico, con un periodo fundamental de 0.85 s. Se consideraron tres casos de resistencia lateral (representada por el coeficiente de diseño por sismo  $C=0.1, 0.2$  y  $0.4$ ), todos sujetos al registro del sismo de Caleta de Campos de 1985, en SCT, México D.F., para la componente este-oeste. Para el análisis se tomó únicamente los 35 segundos de mayor intensidad del registro, que corresponde al 95% de la energía total, determinada con base en el criterio de la Intensidad de Arias.

Observando las características de la respuesta de desplazamientos (figura 3.11) para los sistemas diseñados con diferentes niveles de resistencia lateral, se distingue la existencia de un patrón de ciclos de grandes desplazamientos no superior a tres. Además, considerando las tres historias de desplazamiento calculadas, se puede afirmar que el número de ciclos promedio por nivel de desplazamiento, para un registro de las características del SCT-EW, es del orden de dos o tres ciclos, y éstos no necesariamente son subsecuentes.

Para el caso de los dispositivos del tipo panel de cortante, dado que en la filosofía de diseño de éstos se parte del hecho de que después de la incidencia del sismo máximo probable los dispositivos sean remplazados por unos nuevos, se acepta que únicamente estarán sujetos a un patrón de carga o desplazamiento correspondiente a la incidencia de un solo evento.

El presente trabajo se centra en edificaciones dentro de la República Mexicana, específicamente en la zona metropolitana del Distrito Federal, motivo por el cual se seleccionó el patrón de desplazamientos

a aplicar en los modelos de prueba, de modo que se trate de representar pares o tercias de ciclos de desplazamiento a niveles alternados de amplificación del mismo, hasta llevarlo al desplazamiento asociado a la falla del sistema completo, o del dispositivo en particular.

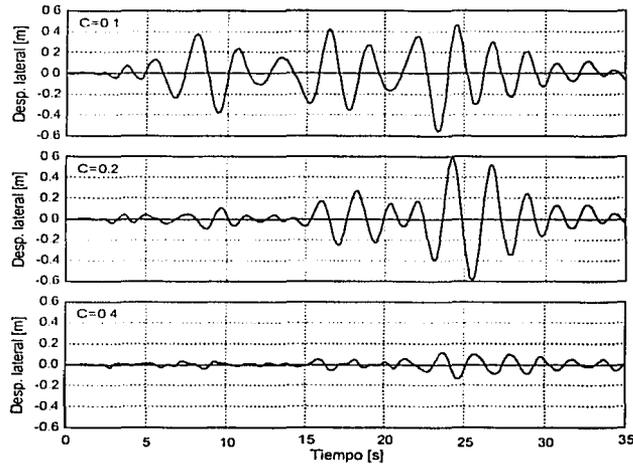


Figura 3.11 Respuesta inelástica de desplazamiento de un sistema de 1GDL ante el registro de SCT-EW

Las pruebas se controlaron totalmente por desplazamiento y se tenía previsto aplicar 28 ciclos de desplazamiento a todos los especímenes, lo cual no fue posible con los disipadores DPC-SA y DPC-AV porque presentaron daño crítico y comportamiento inestable antes de llegar al número de ciclos prefijado y la prueba se dio por concluida. En la tabla 3.2 se muestra la historia de desplazamientos aplicada, ciclo por ciclo, así como las distorsiones de entrepiso del marco asociadas, se define la distorsión de entrepiso del marco ( $\psi_M$ ) como el cociente entre el desplazamiento lateral y la altura libre de entrepiso (altura libre de columnas).

Tabla 3.2 Historia de carga o de desplazamientos

No. de Ciclo	Desplazamiento [mm]	Distorsión del Marco [%]
1,2	± 4	0.25
3,4,5,6	± 7.5	0.48
7,8,9,10	± 15	0.96
11,12	± 7.5	0.48
13,14	± 15	0.96
15,16,17,18	± 20	1.27
19,20	± 7.5	0.48
21,22	± 15	0.96
23,24	± 20	1.27
25,26	± 30	1.92
27,28	± 7.5	0.48

En la figura 3.12 se puede apreciar gráficamente toda la historia de carga, en la misma se puede observar que el desplazamiento se incrementa gradualmente hasta  $\pm 15$  mm en el ciclo 10, en los ciclos 11 y 12 la amplitud decrece a  $\pm 7.5$  mm, para incrementarse hasta  $\pm 20$  mm en el ciclo 18. Posteriormente en los ciclos 19 y 20 se reduce el desplazamiento a  $\pm 7.5$  mm y nuevamente se incrementa gradualmente hasta alcanzar  $\pm 30$  mm en el ciclo 26 para finalmente concluir con  $\pm 7.5$  mm en el ciclo 28. El aumento y reducción de desplazamientos durante la prueba tuvo como objetivo contemplar en alguna forma que los desplazamientos impuestos por un sismo son de carácter aleatorio además de permitir observar el comportamiento del modelo a pequeños desplazamientos después de haber sido sujeto a grandes desplazamientos. Para el desplazamiento de  $\pm 4$  mm se aplican dos ciclos para obtener el comportamiento del modelo en el intervalo elástico, para los desplazamientos de  $\pm 7.5$  mm,  $\pm 15$  mm y  $\pm 20$  mm (ciclos 3 a 6, 7 a 10 y 15 a 18, respectivamente) se aplican cuatro ciclos con el fin de observar la estabilidad de los lazos de histéresis, ya que se considera que a estos niveles de desplazamientos el modelo incursiona en el intervalo de comportamiento inelástico. Los dos ciclos para desplazamiento  $\pm 30$  mm se realizan para observar el comportamiento del modelo ante grandes niveles de deformación.

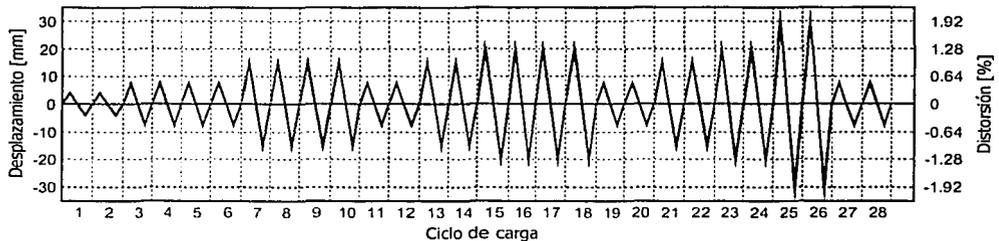


Figura 3.12 Historia de carga o de desplazamientos

No se pudo tener una precisión alta en los desplazamientos impuestos al modelo porque se utilizó una bomba eléctrica de control manual para mover el gato hidráulico; sin embargo, esta situación sirvió para observar que el modelo llegaba a inestabilizarse cuando el alma del dissipador tenía un daño severo, situación que no se había observado en pruebas similares (Aguilar, 1998), en las que se aplicó la carga lateral mediante un actuador hidráulico, controlado electrónicamente mediante servo válvulas, las cuales si bien permiten un control muy preciso de los desplazamientos, proporcionan niveles de estabilidad ficticios debido a que tienen compensadores que evitan que el actuador se desplace más allá del límite preestablecido aún cuando la estructura así lo demande.

### 3.3 RESULTADOS GENERALES

#### 3.3.1 MARCO SOLO

De la curva carga lateral vs. desplazamiento (figura 3.13), se pudo observar, que el marco presenta un comportamiento elástico lineal durante los primeros seis ciclos de carga, es decir para un desplazamiento máximo del entrepiso de  $\pm 7.5$  mm ( $\psi_M = 0.48\%$ ). En el séptimo ciclo, a desplazamientos de  $\pm 15$  mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ) el marco empieza a incursionar en la no-linealidad, pudiendo apreciarse histéresis en la curva carga lateral-desplazamiento del cabezal, comportamiento

que se mantiene de forma similar en los subsecuentes tres ciclos de igual desplazamiento. En este punto, la rigidez pico a pico ( $K_{pp}$ ) del modelo presenta una degradación del 11% respecto de la rigidez inicial ( $K_0$ ). A partir del ciclo 15, para un desplazamiento de  $\pm 20\text{mm}$  ( $\psi_M = 1.27\%$ ), el comportamiento no-lineal del marco es evidente, existiendo una degradación de  $K_{pp}$  del orden del 17 % respecto a  $K_0$ . Al llegar al desplazamiento máximo de  $\pm 30\text{ mm}$  ( $\psi_M = 1.92\%$ ), en los ciclos 25 y 26, la curva presenta lazos de histéresis amplios, con una degradación de  $K_{pp}$  de alrededor de 37 % respecto a  $K_0$ . El comportamiento del marco para todos los niveles de distorsión fue estable, lo que se observa claramente al comparar ciclos de igual distorsión, donde no existe pérdida de resistencia o rigidez. También se observa que para las repeticiones de los ciclos de  $\pm 7.5\text{ mm}$  ( $\psi_M = 0.48\%$ ), después de llevar el modelo a desplazamientos mayores, la rigidez  $K_{pp}$  no varía significativamente respecto a las repeticiones anteriores, encontrándose la mayor variación alrededor del 3%, entre la rigidez obtenida en el ciclo 4 y en el ciclo 19. La resistencia máxima del modelo se alcanzó en el pico negativo del ciclo 25 y fue de 11.72 t para un desplazamiento de -30.025 mm.

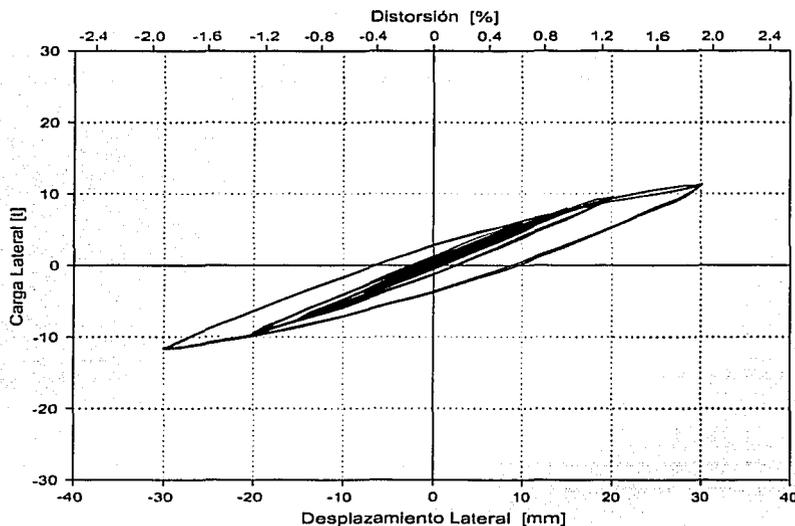


Figura 3.13 Curva histéretica del modelo marco solo

### 3.3.2 MARCO CON DPC-SA

El dispositivo utilizado en este ensaye no tiene ningún atiesador en la placa del alma, por lo que se tiene una celda única de  $297 \times 270\text{ mm}$  de dimensión. El espesor de la placa es de 7.5 mm. El comportamiento histéretico del conjunto marco-disipador se muestra en la figura 3.14 y la secuencia de daño del disipador en la figura 3.15.

El modelo del marco reforzado con los contraventeos y el DPC-SA, presentó un notable incremento en la rigidez del conjunto marco-disipador, siendo su rigidez inicial 16 veces superior a la rigidez del

marco sin refuerzo. Durante los primeros dos ciclos de carga, desplazamiento de  $\pm 4$  mm ( $\psi_M = 0.25\%$ ), el modelo muestra comportamiento elástico-lineal. A partir del tercer ciclo, con un desplazamiento máximo del cabezal de  $\pm 7.5$  mm ( $\psi_M = 0.48\%$ ), el modelo empieza a mostrar comportamiento no lineal, presentándose histéresis en la curva carga lateral-desplazamiento. Al llegar al pico durante este ciclo, se observa que la pintura del alma del disipador muestra algunas fisuras horizontales, probablemente debido al inicio del pandeo, el cual sin embargo no se aprecia a simple vista, por lo que de existir, sería mínimo.

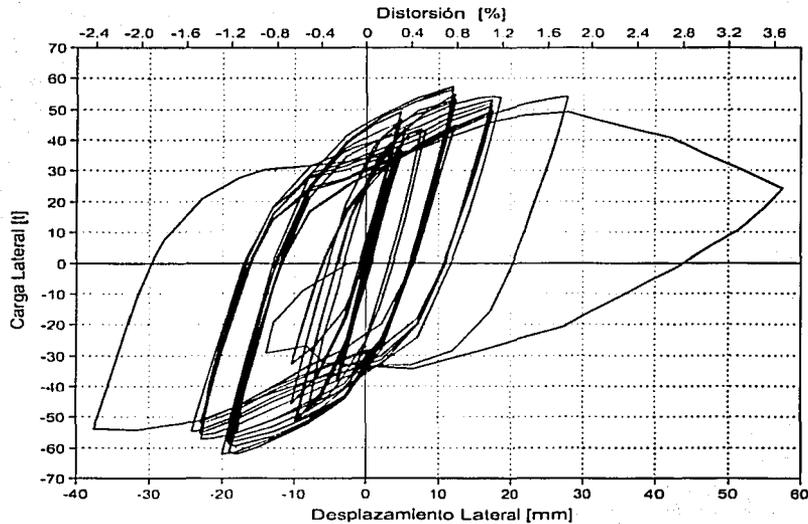


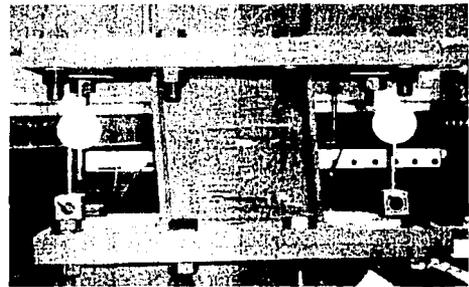
Figura 3.14 Curva histéretica del modelo Marco + DPC-SA

Por lo mencionado anteriormente y por que los valores de deformación unitaria medida en el alma del disipador están por debajo del punto de fluencia del acero, se supone que el comportamiento no lineal es más bien atribuible al pandeo elástico del panel y al deslizamiento por fricción, que se observó durante el ciclo 4, en las uniones del sistema de contraventeo con el disipador por falta de ajuste en las tuercas. La ocurrencia del fenómeno se ve claramente al analizar los valores de  $K_{pp}$ , la cual tuvo una disminución drástica en el mencionado ciclo. En los siguientes dos ciclos de igual desplazamiento (ciclos 5 y 6), después de haber realizado un reajuste en el apriete y fijación de las tuercas, existe una recuperación de la rigidez. Al llegar al pico negativo, durante el sexto ciclo se puede apreciar fisuras en la pintura de los patines del disipador, como resultado del estado de flexión al cual se ven sometidos. Tomando un promedio de los valores de  $K_{pp}$  a esté desplazamiento, se tiene una degradación del 41 % respecto a  $K_0$ . Debido al deslizamiento en la tornillería de fijación mencionado anteriormente, se tuvo que realizar un ajuste en la curva Carga-Desplazamiento, por lo que la misma a partir del ciclo 4, muestra asimetría entre los desplazamientos positivos y negativos.

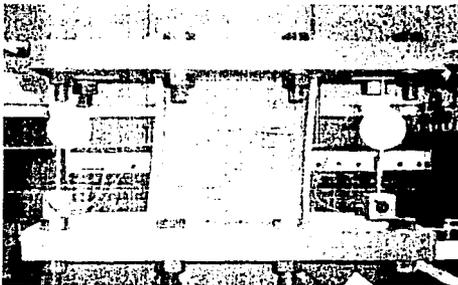
Durante el ciclo 7, desplazamiento de  $\pm 15$  mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ), se hace visible el pandeo de la placa del alma, ocurriendo alternadamente sobre las diagonales del alma, mostrando una forma característica de X y se va acrecentando durante las siguientes repeticiones a esta deformación (ciclos 8, 9 y 10). Durante estos cuatro ciclos el comportamiento es bastante estable en lo referente a rigidez, no existiendo degradación entre uno y otro ciclo, pero no se puede afirmar lo mismo de la resistencia. Al observar la rama negativa de la curva carga lateral-desplazamiento, por su mayor homogeneidad, se ve claramente que la resistencia disminuye con cada repetición, existiendo una pérdida de resistencia de 6% entre los ciclos 7 y 10. La degradación acumulada de  $K_{pp}$  a este nivel de desplazamiento es de 63% respecto de  $K_0$ .



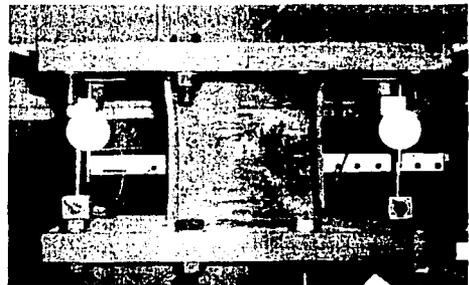
Ciclo +5



Ciclo -8



Ciclo +15



Ciclo +19

**Figura 3.15** Secuencia de daño del dispositivo DPC-SA

En los ciclos 13 y 14, desplazamiento de  $\pm 15$  mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ), posteriores a dos ciclos de menor desplazamiento ( $\pm 7.5$  mm), resulta evidente la pérdida de resistencia respecto a la anterior incursión del modelo a este mismo nivel de deformación, en tanto que la rigidez no presenta mayor degradación. Al llegar el modelo a un desplazamiento de  $\pm 20$  mm ( $\psi_M = 1.27\%$ ), durante los ciclo 15, 16, 17 y 18, se observó un incremento considerable del pandeo de la placa del alma, cuya deformación permanece aun cuando el modelo se encuentra en la posición de cero desplazamiento. En estos cuatro ciclos se mantiene el comportamiento observado anteriormente, la resistencia disminuye en cada repetición, en tanto que la rigidez muestra poca variación, al final del ciclo 18 el modelo presenta una degradación de 12% y 75%, en resistencia y rigidez  $K_{pp}$ , respectivamente. Estos valores

están calculados respecto la resistencia máxima ( $R_{max}$ ) de 62.00 t, alcanzada en el pico negativo del ciclo 8 a un desplazamiento de  $-19.866$  mm, y la rigidez inicial del modelo. Por el nivel de pandeo que presenta el disipador, el modelo tiende a inestabilizarse al pasar por las inmediaciones de cero desplazamiento, lo cual se aprecia al observar el estrangulamiento que presenta la curva carga-desplazamiento en esa zona. Este fenómeno podría explicarse por el cambio, un tanto brusco, del sentido del pandeo en la placa.

En los ciclos 19 y 20, se llevó nuevamente el modelo a pequeños desplazamientos ( $\pm 7.5$  mm), al contrario de lo ocurrido con el marco solo, se puede apreciar una significativa variación de la rigidez respecto a las dos repeticiones anteriores para este nivel de desplazamiento, lo cual muestra el nivel de daño que se infringe al disipador al llevarlo a grandes desplazamientos y la repercusión del mismo en el daño general del sistema. Durante los ciclos 21 y 22, desplazamiento de  $\pm 15$  mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ), la caída en la resistencia respecto al anterior ciclo de igual desplazamiento es drástica, en este punto se tiene una degradación de 75 % respecto  $R_{max}$ . Es de notar, que a diferencia de lo ocurrido en las anteriores repeticiones para un mismo nivel de desplazamiento, el comportamiento se muestra mas estable, no existiendo prácticamente degradación de resistencia o rigidez entre un ciclo y otro.

Al llegar nuevamente a un desplazamiento de  $\pm 20$  mm (ciclos 23 y 24), el modelo presenta una degradación de resistencia de 83 % respecto de  $R_{max}$  y de rigidez  $K_{pp}$  de 75 % respecto de  $K_0$ ; durante las dos repeticiones, el modelo no muestra degradación adicional en resistencia ni en rigidez, manteniéndose el estrangulamiento de la curva en las inmediaciones de cero desplazamiento. En el ciclo 25, se llevó el modelo al desplazamiento máximo,  $\pm 30$  mm ( $\psi_M = 1.92\%$ ), al llegar al pico negativo, apareció una grieta en la placa del alma, de alrededor de 3.5 cm de longitud sobre una de las diagonales, a este nivel de deformación la degradación de la rigidez alcanza casi el 84%.

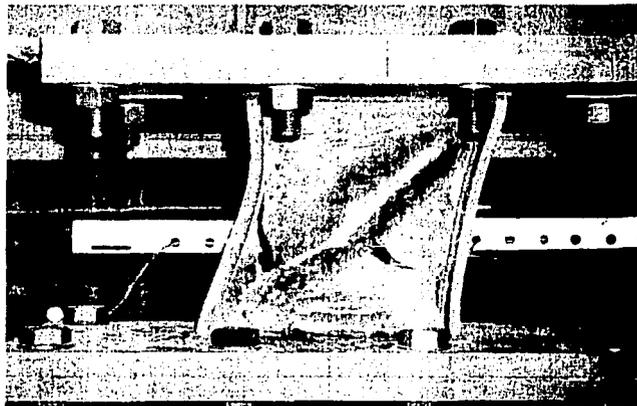


Figura 3.16 Estado final de daño del dispositivo DPC-SA

En el ciclo 26 se produce el colapso del disipador, la grieta con pendiente positiva que se presentó en el anterior ciclo, se propaga hacia abajo hasta llegar casi al borde del patín izquierdo para luego

ascender paralela al mismo, en la otra dirección corre en forma ascendente hasta llegar al centro del alma, para luego extenderse hacia abajo siguiendo aproximadamente sobre la diagonal hasta llegar al patín derecho y terminar descendiendo paralela al mismo. En el momento de la falla, el sistema se inestabilizó súbitamente, lo cual se ve claramente al observar la pendiente negativa que presenta la curva carga-desplazamiento, en este momento se da por concluida la prueba. En la figura 3.16 se observa el estado final de daño de este disipador, pudiendo observarse como los patines se deforman hacia el interior del panel debido a la acción del campo de tensión diagonal que se genera en el alma del dispositivo, también se observa claramente la forma de X en que se pandea la placa del alma.

### 3.3.3 MARCO CON DPC-AH

Este modelo difiere del anterior únicamente en la geometría de disipador utilizado, el cual cuenta con un atiesador colocado en posición horizontal a la mitad de su altura, entre los patines, con lo cual se forman dos celdas idénticas de 145 x 287 mm de dimensión, siendo el espesor de la placa que forma el alma de 5.4 mm. El comportamiento histerético del conjunto marco-disipador se muestra en la figura 3.17 y la secuencia de daño del disipador en la figura 3.18.

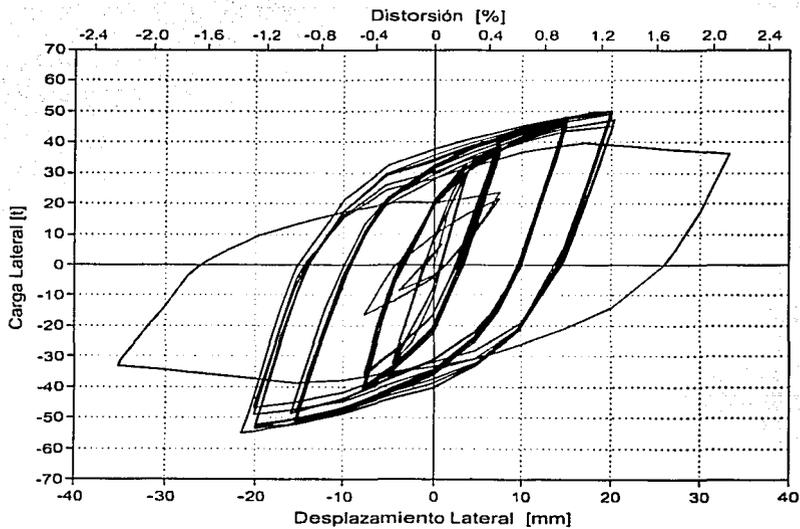
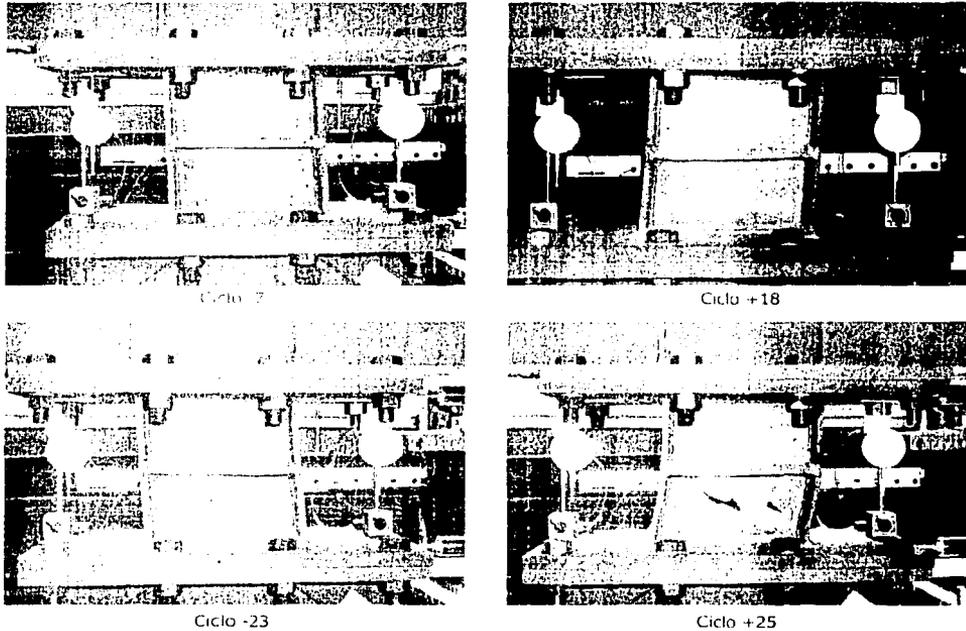


Figura 3.17 Curva histerética del modelo Marco + DPC-AH

Debido al menor espesor del alma que presenta este disipador, la rigidez inicial que presenta el conjunto Marco con DPC-AH es mucho menor que en el anterior caso; sin embargo, es del orden de siete veces superior a la del marco sin refuerzo. Desde el inicio de la prueba el modelo presentó un comportamiento no lineal, aún a pequeños desplazamientos laterales,  $\pm 4$  mm ( $\psi_M = 0.25\%$ ), en los ciclos 1 y 2. Al no observarse ningún deslizamiento en las uniones y menos aún, pandeo en la placa del alma, este comportamiento puede atribuirse en su totalidad al inicio de la fluencia en la placa del

alma, lo cual es corroborado al revisar las mediciones de deformación unitaria registradas en la misma. El presentarse la fluencia para un nivel bajo de deformaciones, hace pensar en la existencia de esfuerzos residuales grandes en la placa, lo cual es muy probable al tratarse de una sección construida mediante un proceso de soldadura, el cual generalmente induce esfuerzos residuales complejos en las tres direcciones (Brockenbrough y Barsom, 1992).



**Figura 3.18** Secuencia de daño del dispositivo DPC-AH

En el ciclo 3,  $\pm 7.5$  mm ( $\psi_M = 0.48\%$ ), la curva carga lateral-desplazamiento presenta lazos de histéresis amplios, mostrando un comportamiento estable en los siguientes tres ciclos de igual desplazamiento, sin degradación de rigidez o resistencia entre uno y otro. A este nivel de deformación  $K_{PP}$  presenta una degradación de 45% respecto de  $K_0$ . Durante los ciclos 7, 8, 9 y 10, se lleva el modelo a un desplazamiento lateral de  $\pm 15$  mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ), todavía no se observa pandeo en la placa del alma, al igual que en los ciclos anteriores el comportamiento es estable en cada repetición.  $K_{PP}$  se degradó un 66% de  $K_0$ .

En el ciclo 11, cuando nuevamente se desplaza el modelo  $\pm 7.5$  mm, comienza a apreciarse el pandeo, muy leve de la placa del alma correspondiente a la celda inferior del disipador. Al llegar al ciclo 15, primero a un desplazamiento de  $\pm 20$  mm ( $\psi_M = 1.27\%$ ), el pandeo ya está bastante avanzado en la celda inferior, mientras que en la celda superior el pandeo recién se hace visible en el ciclo 16. El comportamiento que mostró el modelo durante los cuatro ciclos a este nivel de desplazamiento, fue

todavía bastante estable, aunque se puede apreciar una tendencia de degradación de resistencia, esto debido probablemente al pandeo de la placa del alma. La degradación de  $K_{pp}$  en este punto es de 73% respecto a  $K_0$ , aunque a diferencia del anterior espécimen no se observa estrangulamiento en la curva carga lateral-desplazamiento al pasar por cero desplazamiento.

Al llegar al pico positivo (20 mm) del ciclo 23, aparece una grieta en la parte izquierda de la celda inferior, la misma tiene una forma de línea quebrada, que toma la forma de X al invertir la carga y llegar el pico negativo. En el ciclo 24, la grieta se agranda ligeramente, pero manteniéndose todavía en el área central de la celda. Durante estos dos ciclos, producto del daño de la celda, el dispositivo tiende a inestabilizarse al pasar por la región de desplazamiento nulo, lo cual provoca estrangulamiento moderado en la zona correspondiente de la curva carga lateral-desplazamiento. En este momento la degradación de la rigidez  $K_{pp}$  es de 76% respecto de  $K_0$ .

En el ciclo 25, desplazamiento  $\pm 30$  mm ( $\psi_M = 1.92\%$ ), al llegar al primer tercio del desplazamiento positivo, aparecen dos grietas más en la celda inferior, una sobre la placa del alma, a la derecha de la anterior y otra sobre el borde izquierdo del atiesador muy próxima a la soldadura. Cuando se rebasó los +18 mm de desplazamiento, el modelo se inestabilizó y fue necesario reducir la carga para evitar que el marco se siguiera deformando, esto debido al rápido incremento del daño en el disipador, las grietas centrales se alargan sin llegar todavía a los bordes de la celda. Al empezar el desplazamiento negativo, aparece otra grieta en la celda inferior, ahora en el borde derecho del atiesador, también paralela al borde de la soldadura. De manera similar a lo ocurrido en la parte positiva del ciclo, al pasar de los -17 mm de desplazamiento, se presenta inestabilidad. Las grietas del alma se propagan hasta juntarse, mostrando un configuración de XX, solo un extremo de las misma llega hasta el borde inferior derecho de la celda, sin propagarse por el mismo. La prueba se dio por concluida al finalizar este ciclo, por el elevado daño que tiene el disipador. La resistencia máxima fue de 54.74 t y se alcanzó en el pico negativo del ciclo 15 a un desplazamiento de -21.52mm.

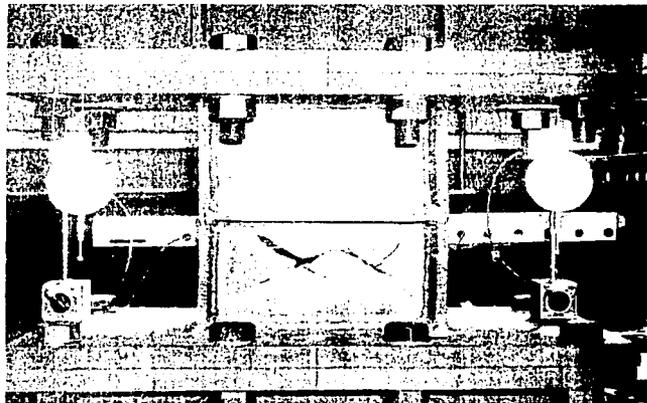


Figura 3.19 Estado final de daño del dispositivo DPC-AH

A diferencia del anterior espécimen, éste mostró una recuperación de la rigidez cuando se sometió el modelo a pequeños desplazamientos después de sujetarlo a desplazamientos mayores, observándose poca variación de la rigidez en las diferentes repeticiones para estos desplazamientos. También es de interés mencionar que el daño se concentró solamente en la celda inferior del disipador. Una vez que apareció la segunda grieta en la placa del alma, el pandeo en la celda superior prácticamente no se incrementó, esto resulta lógico al observar que a partir de este momento la distorsión del disipador se concentró en la celda inferior.

El estado de daño final del disipador se muestra en la figura 3.19, pudiendo apreciarse las grietas en forma de doble X en la celda inferior. A diferencia del anterior disipador, los patines de éste presentan una deformación casi nula, debido a la presencia del atiesador horizontal el cual reduce a la mitad la longitud de los mismos, con lo cual su rigidez a flexión se incrementa notablemente. Por lo mencionado anteriormente las condiciones de borde de la placa del alma resultan más favorables.

### 3.3.4 MARCO CON DPC-AV

El dispositivo empleado en este modelo cuenta, al igual que el anterior, con un atiesador para restringir el pandeo de la placa del alma, dicho atiesador está colocado en forma vertical, a la mitad de la distancia entre patines, formando de esta manera dos celdas de 298 x 131 mm de dimensión, la placa del alma tiene un espesor de 3.9 mm. El comportamiento histéretico del conjunto marco-disipador se muestra en la figura 3.20 y la secuencia de daño del disipador en la figura 3.21.

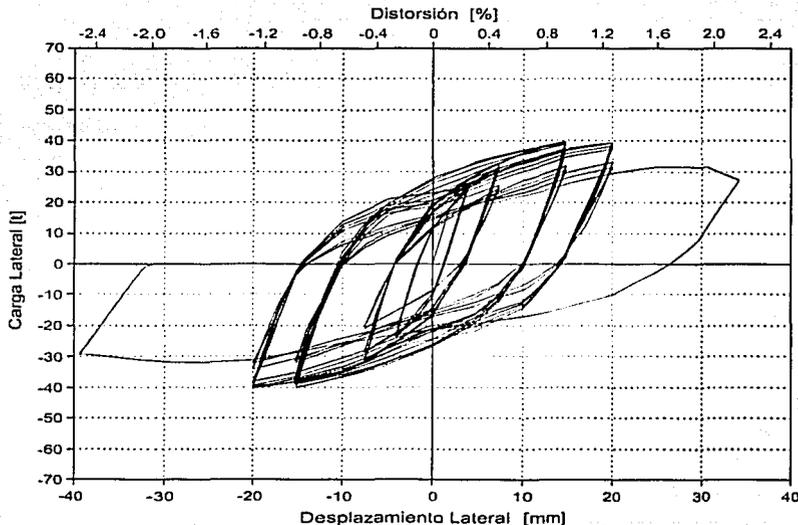
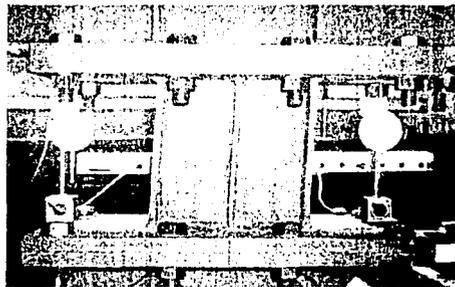
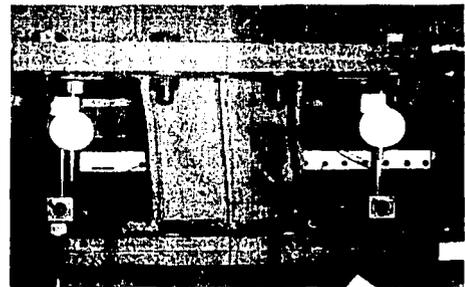


Figura 3.20 Curva histéretica del modelo Marco + DPC-AV

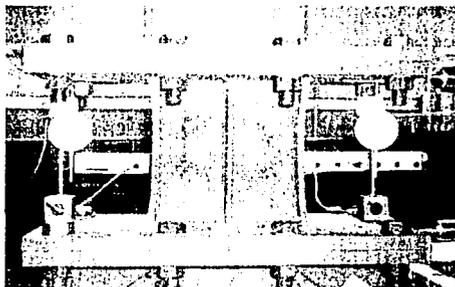
Debido a que la placa que forma el alma del dissipador es la de menor espesor de los tres especímenes, la rigidez inicial resultó también la menor, siendo aproximadamente seis veces superior a la del marco sin refuerzo. Al igual que en el caso del modelo Marco con DPC-AH, el modelo incurrió en el intervalo de comportamiento no lineal desde los ciclos 1 y 2, desplazamiento  $\pm 4$  mm ( $\psi_M = 0.25\%$ ), muy probablemente por las mismas razones expuestas anteriormente; es decir, el inicio de la fluencia del panel a pequeñas distorsiones debido a la existencia de esfuerzos residuales producto del proceso de soldadura. Al alcanzar un desplazamiento de  $\pm 7.5$  mm ( $\psi_M = 0.48\%$ ), durante los ciclos 3, 4, 5 y 6,  $K_{pp}$  presenta una degradación de 53% respecto a  $K_0$ . Los lazos de histéresis de la curva carga lateral-desplazamiento son amplios y el comportamiento es estable sin degradación de ningún tipo.



Ciclo +7



Ciclo -16



Ciclo +22



Ciclo +25

Figura 3.21 Secuencia de daño del dispositivo DPC-AV

En el ciclo 9, tercer ciclo de desplazamiento  $\pm 15$  mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ), se inicia el pandeo de la placa del alma, en ambas celdas simultáneamente, tomando una forma de X. Durante los cuatro ciclos que se efectuaron a este nivel de desplazamiento el comportamiento es en general estable, pero a partir del inicio del pandeo se presentó una ligera degradación de resistencia entre las dos últimas repeticiones. La degradación de  $K_{pp}$  es de 71% respecto de  $K_0$ .

En los ciclos 13 y 14, desplazamiento  $\pm 15$  mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ), la curva carga lateral-desplazamiento comienza a mostrar estrangulamiento en las zonas de cero desplazamiento, el comportamiento es prácticamente igual al de los ciclos 7 al 10. Cuando se llegó al desplazamiento de  $\pm 20$  mm ( $\psi_M =$

1.27%), durante los ciclos 15, 16, 17 y 18, el estrangulamiento que presenta la curva carga lateral-desplazamiento en la zona de desplazamiento nulo tiende a ser mayor, durante las cuatro repeticiones que se hicieron, el modelo empezó a experimentar degradación de resistencia en cada ciclo, al llegar a este nivel de distorsión  $K_{pp}$  se encuentra degradada un 78% respecto de  $K_0$ . En el último ciclo de esta serie de cuatro, se originan dos grietas en la parte central de la celda derecha, una a 2/3 de la altura y la otra a 1/3, la primera se originó en el pico positivo y la segunda en el negativo. En la celda izquierda aparece una tercera grieta al centro y a 2/3 de la altura, en el pico negativo.

En el ciclo 21, desplazamiento  $\pm 15$  mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ), al llegar al pico positivo aparece una cuarta grieta en la parte central y a 1/3 de la altura de la celda izquierda, en el siguiente ciclo a este desplazamiento se observó degradación de resistencia. Durante los ciclos 23 y 24, en los cuales se llevó nuevamente el modelo a desplazamientos de  $\pm 20$  mm, las grietas se agrandan, teniendo cada una la forma de una X. En este punto la degradación de resistencia entre un ciclo y otro también aumenta, siendo este incremento alrededor de 6%, mientras la degradación de  $K_{pp}$  respecto de  $K_0$  es de 82%.

En el ciclo 25, desplazamiento  $\pm 30$  mm ( $\psi_M = 1.92\%$ ), al pasar los +25 mm de desplazamiento, al igual que lo ocurrido con los dos especímenes anteriores, el modelo se inestabilizó debido al daño que presentaba el disipador. De la misma manera la inestabilidad se presenta con el desplazamiento negativo, donde al llegar al pico la grieta inferior de la celda izquierda se extiende hasta el borde izquierdo y se propaga sobre el mismo hacia abajo llegando casi al borde inferior. La grieta superior de esta celda se extiende hacia la derecha hasta unirse con la inferior, en la celda derecha la grieta superior se extiende hasta tocar el borde derecho, extendiéndose ligeramente hacia arriba. En este punto el nivel de daño del disipador es severo y con tendencia a comportamiento inestable del sistema, por lo que se da por concluida la prueba. La resistencia máxima del modelo fue de 40.30 t alcanzada en el pico negativo del ciclo 15 a un desplazamiento de  $-20.03$  mm.

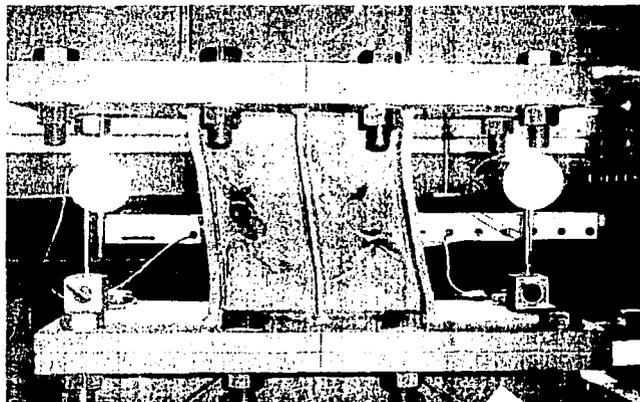
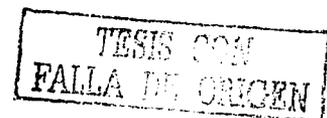


Figura 3.22 Estado final de daño del dispositivo DPC-AV

El estado final de daño del disipador se muestra en la figura 3.22, apreciándose las cuatro zonas de daño que se mencionan. Al igual que con el primer disipador los patines se deforman hacia el interior de la celda, claro que en este caso la deformación es menor debido al atiesador vertical, por lo que el campo de tensión diagonal que se forma es menor.



## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta una comparación de la influencia que tienen en la respuesta del modelo los tres tipos de disipadores ensayados, para diferentes niveles de desempeño estructural. La comparación se realizará a través de diferentes parámetros que permitirán observar el comportamiento de los modelos probados.

### 4.1 CONCEPTOS GENERALES DEL DISEÑO POR DESEMPEÑO

El comportamiento observado en los últimos años en estructuras alrededor del mundo durante sismos de diversas características, ha puesto en evidencia el mal desempeño estructural de las mismas. Como ejemplo se puede mencionar los daños importantes e incluso el colapso de algunas estructuras producto de sismos moderados, que no correspondían al sismo de diseño en el lugar donde ocurrió el movimiento. También es de interés mencionar que aunque en otras estructuras los daños se concentraron en elementos no estructurales, los mismos fueron de tal magnitud que impidieron el uso de la edificación por un tiempo considerable mientras duraron las reparaciones (Rodríguez, 2002). Otro claro ejemplo son los daños ocurridos en varios hospitales de la ciudad de Los Ángeles, California durante el sismo de Northridge de 1994. Aunque las estructuras presentaron un buen desempeño desde el punto de vista estructural, su respuesta dinámica amplificó considerablemente las aceleraciones del terreno lo que provocó daños en el contenido y equipamiento de los inmuebles (figura 4.1), de manera que no pudieron permanecer en condiciones de operación y tuvieron que ser evacuados parcial y temporalmente.

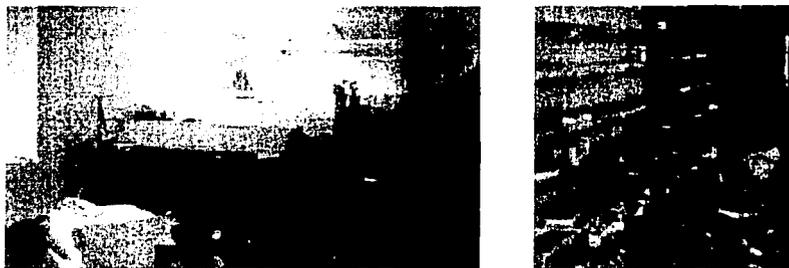


Figura 4.1 Daño no estructural en hospitales (Fotos cortesía de NISEE)

Por las razones expuestas anteriormente, surgió la necesidad de replantear las metodologías de diseño sísmico, las cuales se deberían ver reflejadas en mejores reglamentos de diseño que tomaran en cuenta de una manera más amplia la gama de movimientos que ocurrirán durante la vida útil de las estructuras.

Dentro de este contexto, la filosofía de diseño por desempeño se ha constituido como la alternativa más viable para el planteamiento de metodologías de diseño sísmico que den lugar a estructuras que satisfagan las necesidades de las sociedades modernas (Terán, 2002). En 1992, la Sociedad de Ingeniería Estructural de California, formó un comité destinado a estudiar y plantear los lineamientos para implantar las metodologías numéricas del diseño por desempeño. Para este comité, conocido como el Comité Visión 2000 (SEAC, 1995) el diseño por desempeño contempla tres fases: Conceptual, Numérica y de Implantación.

La *Fase Conceptual* se refiere a la concepción de una solución estructural y no estructural al problema de diseño, en ella se deberán definir los objetivos de diseño, así como conocer la sismicidad del sitio escogido para emplazar la edificación. Sobre la base de lo anterior se deben establecer la configuración global de la construcción, la configuración estructural, los sistemas y materiales estructurales, el sistema de cimentación y el tipo de elementos no estructurales.

La *Fase Numérica* contempla dos etapas: Diseño Preliminar y Diseño Final, en ellas se deberá realizar el dimensionado y detallado de los sistemas estructurales y no estructurales. La metodología numérica planteada debe ser transparente para permitir un diseño eficiente de manera simple y práctica.

La *Fase de Implantación* en la cual se debe garantizar la calidad del diseño, mediante un control adecuado durante la construcción, además de supervisar a lo largo de la vida útil el mantenimiento, ocupación y función de la edificación.

El comité Visión 2000 describe el concepto de diseño por desempeño como: *la selección de los objetivos de diseño, sistemas estructurales y configuración apropiados; el dimensionado y detallado de una estructura, así como de sus elementos no estructurales y contenido; y la garantía del control de la*

calidad durante la construcción y del mantenimiento a largo plazo, de manera que a niveles especificados de movimiento sísmico y, con niveles predefinidos de confiabilidad, la estructura no se dañe más allá de ciertos estados límite de daño u otros estados de utilidad.

Del anterior concepto se puede ver que el primer paso a seguir dentro del diseño por desempeño es la selección de los objetivos de diseño, los cuales no son más que una expresión del comportamiento deseado para una edificación de acuerdo a su ocupación e importancia. Estos objetivos están constituidos por el conjunto de los estados límite de daño, para todos los niveles sísmicos de diseño relevantes.

El comité Visión 2000 define a un estado límite de daño o nivel de desempeño como el máximo daño permisible en una estructura cuando un nivel sísmico de diseño lo afecta. Éste es independiente de la intensidad de los movimientos sísmicos y, para su definición, se debe tomar en cuenta el estado de los elementos estructurales, no estructurales y el contenido de la edificación.

El mismo comité define como nivel sísmico de diseño, a aquel evento discreto tomado del espectro completo de eventos sísmicos que pudieran ocurrir en el lugar donde se ubica la construcción. Los niveles sísmicos de diseño se plantean en función del periodo de retorno de los movimientos sísmicos o en función de la probabilidad de excedencia en un intervalo de tiempo dado.

En la figura 4.2 se muestra un resumen de los objetivos de diseño para diferentes tipos de estructuras, producto de realizar la correlación entre los cuatro niveles de desempeño y los cuatro niveles sísmicos que propone el comité Visión 2000.

Nivel Sísmico \ Nivel de Desemp.	Ocupación Completa	Ocupación Inmediata	Seguridad de Vida	Colapso Incipiente
Frecuente	◆	◆	◆	◆
Ocasional	◆	◆	◆	◆
Raro	◆	◆	◆	◆
Muy Raro	✘	◆	◆	◆

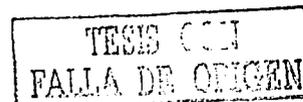
Diagrama de correlación de objetivos de diseño:

- Una línea diagonal superior indica "Estructuras de Ocupación Estándar" que cubre los niveles de ocupación completa e inmediata para los niveles sísmicos frecuente, ocasional y raro.
- Una línea diagonal inferior indica "Estructuras Esenciales / Peligrosas" que cubre los niveles de ocupación completa e inmediata para los niveles sísmicos raro y muy raro.
- Una línea diagonal inferior más pronunciada indica "Estructuras Críticas" que cubre el nivel de ocupación completa para el nivel sísmico muy raro.
- El área superior derecha del cuadro (ocupación completa e inmediata para niveles sísmicos frecuente y ocasional) está etiquetada como "Desempeño Inaceptable".

Figura 4.2 Objetivos de diseño acorde al Comité Visión 2000 (Terán, 2002)

En la propuesta de modificación a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, en su Apéndice A (NTCS, 2002) se establecen dos niveles de desempeño a cumplir, el nivel de desempeño de servicio y el nivel de desempeño de falla, y dos niveles sísmicos, donde el primer nivel sísmico está asociado a un periodo de recurrencia pequeño (10 años), y el segundo a uno grande (125 años)(Ruiz, 2002).

En el presente documento, todas las comparaciones que se hagan sobre el desempeño de los distintos disipadores ensayados se harán para los niveles de desempeño de servicio y de falla que establecen las NTCS en su Apéndice A, para mantener una concordancia con éste.



#### 4.1.1 NIVELES DE DESEMPEÑO

##### 4.1.1.1 Nivel de desempeño de servicio

De acuerdo al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) vigente, el nivel de desempeño de servicio o estado límite de servicio, es aquel en el que no debe presentarse alteraciones en el correcto funcionamiento de la estructura después de haber ocurrido un sismo; debido, por ejemplo, a objetos caídos, desprendimiento de acabados, plafones y recubrimientos, agrietamientos en muros no estructurales, etcétera (Ruiz, 2002)

Para poder dar una definición cuantitativa de éste estado límite es necesario asociarlo a ciertos parámetros susceptibles de ser medidos, como pueden ser las distorsiones máximas de entrepiso, el límite del comportamiento elástico lineal de elementos estructurales o las aceleraciones y velocidades máximas que eviten la caída o vuelco de objetos.

En el Apéndice A de las NTCS (2002) el estado límite de servicio está asociado a la máxima distorsión de entrepiso, permitida de manera que en general la estructura responda con comportamiento elástico lineal y se limite el daño a elementos no estructurales. Los valores límite recomendados para edificios convencionales son de 0.002 para marcos con muros ligados y de 0.004 para marcos con muros desligados. En el caso de edificios con disipadores de energía se considera que también deben cumplir los límites mencionados anteriormente, debido a que dichos límites buscan controlar el nivel de daño en los elementos no estructurales.

##### 4.1.1.2 Nivel de desempeño de falla

El nivel de desempeño de falla o estado límite de falla corresponde al agotamiento de la capacidad de carga de la estructura o que su comportamiento estructural ponga en peligro su estabilidad total o parcialmente. De igual forma que para el nivel de desempeño de servicio; existen varios parámetros para poder definir el nivel de desempeño de falla. Para estructuras con disipadores algunos de estos parámetros son (Ruiz, 2002):

- Demanda de ductilidad global
- Distorsión máxima tolerable de entrepiso
- Demanda de ductilidad que es capaz de desarrollar el sistema disipador

El Apéndice A de las NTCS (2002) asocia el estado límite de falla a la distorsión de entrepiso, presentando una serie de distorsiones permisibles de acuerdo al sistema estructural empleado y a la ductilidad. En el presente documento en particular, se aceptará como distorsión máxima permisible el valor de 0.015, correspondiente a marcos de acero o concreto con contravientos concéntricos por su similitud con el modelo ensayado.

#### 4.1.2 PARÁMETROS DE COMPARACIÓN

La determinación de la influencia que tuvo la utilización de los diferentes disipadores de energía en el desempeño estructural del modelo de marco probado, es estudiada a través del análisis de ciertos

parámetros que permiten evaluar las características de la respuesta, en primera instancia del conjunto marco-disipador y luego del dispositivo disipador en particular.

A partir de la información obtenida del ensaye del marco solo, y después reforzado con los diferentes dispositivos, se pudo calcular diversos parámetros ligados a la respuesta inelástica del modelo como son degradación de rigidez y resistencia, energía disipada, amortiguamiento viscoso equivalente y ductilidad.

## **4.2 COMPORTAMIENTO DEL CONJUNTO MARCO-DISIPADOR**

El cálculo de los diferentes parámetros para analizar el comportamiento del conjunto marco-disipador se realizó a partir de las curvas carga lateral-desplazamiento lateral, obtenidas de las mediciones experimentales de los cuatro modelos ensayados. Cabe mencionar que el análisis del conjunto marco-disipador y también del disipador solo, se realizó de los datos obtenidos hasta el ciclo de carga número 24, descartándose los datos registrados en los ciclos 26 al 28 por no tener registros completos para todos los modelos y porque debido al elevado daño que presentaron los mismos en esos ciclos su comportamiento puede considerarse atípico.

### **4.2.1 RESISTENCIA Y RIGIDEZ**

Una adecuada elección de la resistencia y rigidez durante la etapa de diseño proveerá a una estructura de suficiente nivel de seguridad para soportar de manera adecuada las diferentes cargas que actuarán en ella durante su vida útil y no sufrir, durante un movimiento sísmico, de desplazamientos laterales que puedan producir sensación de inseguridad en sus ocupantes o producir daños en los elementos no estructurales que la componen, como pueden ser: vidrios, muros de relleno, instalaciones y otros. Por lo tanto, se deberá buscar la mejor relación entre resistencia y rigidez de manera de conseguir un costo óptimo de la edificación.

Debido a la importancia que tienen estos dos parámetros se efectuará un análisis de los valores experimentales obtenidos, además de una comparación con los valores teóricos calculados previamente.

#### **4.2.1.1 Cálculo analítico**

Para el cálculo de la curva de capacidad del marco solo y reforzado con los diferentes dispositivos se supuso que la curva esfuerzo-deformación unitaria del acero a tensión uniaxial era del tipo elasto-plástica (figura 4.3).

Las propiedades mecánicas (esfuerzo de fluencia y módulo de elasticidad) de los elementos del marco se tomaron de pruebas de tensión uniaxial realizadas anteriormente (Aguilar, 1998). Con el fin de corroborar el tipo de acero usado en la fabricación de los dispositivos panel de cortante utilizados en este trabajo, se realizó el mismo tipo de pruebas, en probetas obtenidas del patín de los disipadores, así como de las zonas no fracturadas del alma. Los resultados de estas pruebas se presentan en el apéndice A.

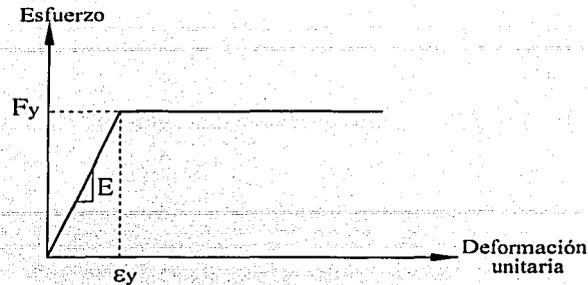


Figura 4.3 Idealización de la curva esfuerzo-deformación unitaria

La tabla 4.1 muestra el resumen de las propiedades mecánicas y geométricas de los diferentes elementos del marco.

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas y geométricas de los elementos del modelo

Elemento	$E$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$F_y$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$G$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$L$ [cm]	$A$ [cm <sup>2</sup> ]	$A_c$ [cm <sup>2</sup> ]	$I$ [cm <sup>4</sup> ]
Columnas	$2.0 \times 10^6$	3500	$7.69 \times 10^5$	149.0	49.1	27.3	586.9
Diagonales	$2.0 \times 10^6$	2500	$7.69 \times 10^5$	165.7	20.16	12.07	318.2
Dispositivo DPC-SA	$2.0 \times 10^6$	3500	$7.69 \times 10^5$	29.7	59.0	20.9	9177.4
Dispositivo DPC-AH	$2.0 \times 10^6$	3500	$7.69 \times 10^5$	30.0	54.5	16.2	9171.1
Dispositivo DPC-AV	$2.0 \times 10^6$	3500	$7.69 \times 10^5$	29.8	51.9	11.7	9031.6

#### 4.2.1.1.1 Marco solo (MS)

Para obtener la curva de capacidad del marco solo se idealizó éste como un modelo de cortante, es decir se supuso que la viga cabezal era infinitamente rígida y que las columnas estaban perfectamente empotradas en su base (figura 4.4).

La rigidez elástica del marco solo, es la contribución de las rigideces a flexión y corte que proporcionan las dos columnas, la misma esta dada por la siguiente expresión:

$$K_{MS} = \frac{1}{\frac{1}{K_{MS_f}} + \frac{1}{K_{MS_c}}} \quad (4.1)$$

donde:

$$K_{MS_f} = 2 \left( \frac{12EI}{L^3} \right) = \text{rigidez del MS a la flexión}$$

$$K_{MS_c} = 2 \left( \frac{GA_c}{L} \right) = \text{rigidez del MS al corte}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \text{módulo de elasticidad al corte}$$

$E =$  módulo de elasticidad de la columna

$I =$  momento de inercia de la columna

$L =$  longitud libre de la columna

$A_c =$  área de corte de la columna

$\mu =$  relación de Poisson

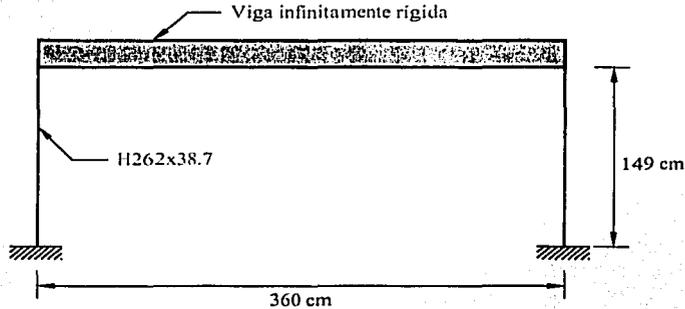


Figura 4.4 Idealización del marco solo

La fuerza cortante que produce la fluencia del marco es aquella asociada al instante en se produce el momento de fluencia en los extremos de ambas columnas y se calcula como:

$$V_{MS_y} = 2 \left( \frac{2M_y}{L} \right) \quad (4.2)$$

donde:

$M_y = S F_y =$  momento flexionante de una columna al inicio de la fluencia

$S =$  módulo de sección elástico

El desplazamiento en el instante de la fluencia puede calcularse con:

$$\delta_{MS_y} = \frac{V_{MS_y}}{K_{MS}} \quad (4.3)$$

La fuerza cortante última que puede soportar el marco es aquella asociada al mecanismo de colapso (figura 4.5), el cual se alcanza cuando se forman articulaciones plásticas en los extremos de las columnas. Esta fuerza puede calcularse a partir del momento plástico que soporta la columna mediante la siguiente expresión:

$$V_{MS_u} = 2 \left( \frac{2M_p}{L} \right) \quad (4.4)$$

donde:

$M_p = Z F_y =$  momento plástico de una columna

$Z =$  módulo de sección plástico

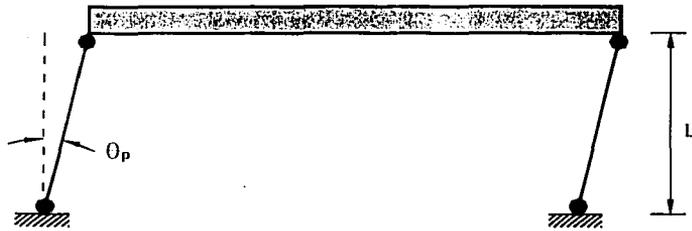


Figura 4.5 Mecanismo de colapso del marco

A partir de la geometría del mecanismo de colapso del marco (figura 4.5) es posible calcular el desplazamiento plástico del mismo, de esta manera se puede evaluar el desplazamiento último del marco como:

$$\delta_{MS_u} = \delta_{MS_y} + \delta_{MS_p} = \delta_{MS_y} + \theta_p L \tag{4.5}$$

donde:

$\theta_p$  = Rotación plástica

La rotación plástica que se produce en los extremos de columna se puede calcular a partir del diagrama de curvaturas de la misma, para este fin se aceptó que la curvatura última de la sección adyacente al apoyo en el momento que ocurre  $M_p$  es aproximadamente diez veces superior a la curvatura correspondiente al inicio de la fluencia (Gaylord, 1992). La curvatura a la fluencia se calculó con la siguiente expresión:

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{b/2} \tag{4.6}$$

donde:

$b$  = Ancho de la columna

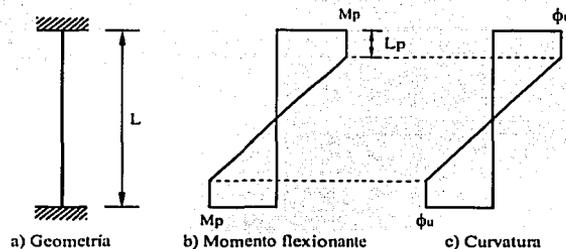


Figura 4.6 Distribución de momentos flexionantes y curvaturas en las columnas (criterio 1)

Para el cálculo de la rotación plástica se utilizaron dos criterios, en el primero se supuso que la columna presenta la distribución de momentos y curvaturas que se muestran en la figura 4.6, la longitud de plastificación ( $L_p$ ) a lo largo de la cual se presenta el momento  $M_p$  se obtuvo de las

mediciones de deformaciones unitarias registradas en los canales 026 al 029 y 042 al 045 (figura 3.12).

En el segundo criterio se supuso que la columna presenta la distribución de momentos y curvaturas que se muestran en la figura 4.7, la longitud de plastificación se obtuvo por geometría del diagrama de momentos flexionantes.

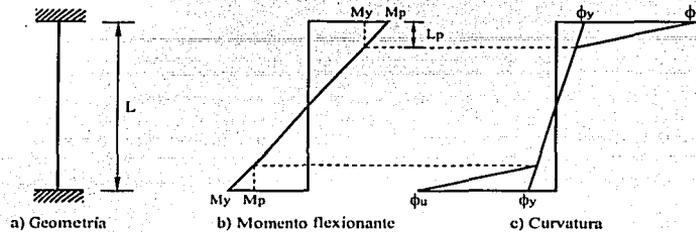


Figura 4.7 Distribución de momentos flexionantes y curvaturas en las columnas (criterio 2)

En ambos criterios, para calcular  $\theta_p$  se utilizó el teorema de la viga conjugada según el cual la rotación es igual al área del diagrama de curvaturas.

En la tabla 4.2 se presenta los resultados obtenidos después de reemplazar los valores de las propiedades mecánicas y geométricas en las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5.

Tabla 4.2 Resultados del cálculo de la curva de capacidad del marco solo

Parámetro	Valores Criterio 1	Valores Criterio 2	Unidades
$S$	80.09		cm <sup>3</sup>
$Z$	122.90		cm <sup>3</sup>
$M_y$	280.32		t-cm
$M_p$	430.15		t-cm
$K_{MSy}$	8.52		t/cm
$K_{MSc}$	281.87		t/cm
$K_{MS}$	8.27		t/cm
$V_{MSy}$	7.53		t
$\delta_{MSy}$	0.91		cm
$V_{MSu}$	11.55		t
$\epsilon_y$	0.00175		cm/cm
$\phi_y$	0.00024		1/cm
$\phi_u$	0.00239		1/cm
$L_p$	18.38	25.95	cm
$\theta$	0.04389	0.03300	rad
$\delta_{MSu}$	7.45	5.83	cm

#### 4.2.1.1.2 Conjunto marco-disipador (M+DPC)

El conjunto marco-disipador se idealizó como se muestra en la figura 4.8, se supuso que el dispositivo disipador se encontraba totalmente restringido al giro en su unión con la viga cabezal y articulado en la unión con los contravientos, mientras que el sistema de contraventeo se supuso articulado en sus dos extremos.

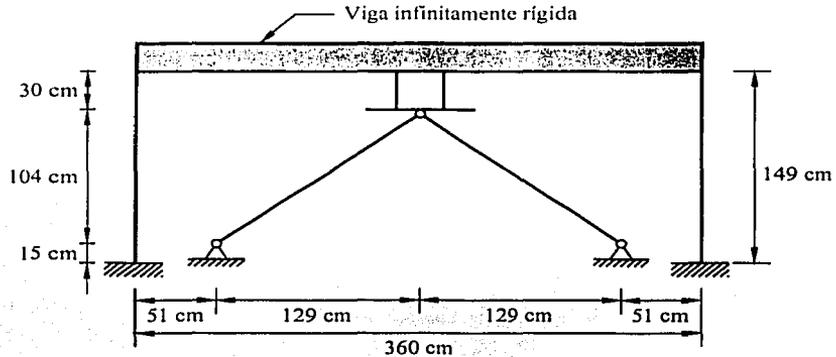


Figura 4.8 Idealización del conjunto marco-disipador

Siguiendo esta idealización, la rigidez lateral del conjunto marco-disipador ( $K_{M+DPC}$ ) será igual a la suma de la rigidez del marco solo ( $K_{MS}$ ) más la rigidez que proporciona el disipador y el sistema de contraventeo ( $K_{DPC-C}$ ). La rigidez del marco solo se calculó en la sección anterior por lo que solo resta calcular la correspondiente al conjunto DPC-C.

De acuerdo con la idealización utilizada, la rigidez del conjunto DPD-C esta dada por:

$$K_{DPC-C} = \frac{1}{\frac{1}{K_{DPC}} + \frac{1}{K_C}} \quad (4.7)$$

donde:

$K_{DPC}$  = rigidez del disipador panel de cortante

$K_C$  = rigidez del contraventeo

La rigidez del dispositivo disipador se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{DPC} = \frac{1}{\frac{1}{K_{DPC_f}} + \frac{1}{K_{DPC_c}}} \quad (4.8)$$

donde:

$K_{DPC_f} = \frac{3EI_{DPC}}{L_{DPC}^3}$  = rigidez del disipador panel de cortante a la flexión

$$K_{MS_c} = \frac{GA_w}{L_{DPC}} = \text{rigidez del disipador panel de cortante al corte}$$

$I_{DPC}$  = momento de inercia del disipador panel de cortante

$L_{DPC}$  = longitud del disipador panel de cortante

$A_w$  = área del alma del disipador panel de cortante

Partiendo del supuesto que el disipador panel de cortante es suficientemente rígido axialmente, se pueden despreciar las deformaciones verticales del nodo de unión con el sistema de contraventeo, por esta razón la rigidez lateral de este último será igual a la componente horizontal de la fuerza axial que se produce en los contravientos, producto de aplicar una deformación horizontal unitaria en el nodo de unión (figura 4.9).

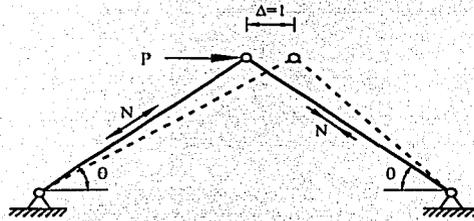


Figura 4.9 Deformación del sistema de contraventeo

Los contravientos al estar articulados en los dos extremos, solo sufrirán deformaciones axiales por lo que la fuerza axial que se produce en cada uno será igual a:

$$N = \frac{EA}{L} \Delta \cos \theta \quad (4.9)$$

donde:

$A$  = área transversal de una diagonal

$L$  = longitud de una diagonal

Tomando la componente horizontal de la fuerza  $N$  de cada diagonal, se puede definir la fuerza  $P$  como:

$$P = 2N \cos \theta \quad (4.10)$$

Ahora, reemplazando la ecuación 4.9 en la ecuación 4.10 se tiene:

$$P = 2 \frac{EA}{L} \Delta \cos^2 \theta \quad (4.11)$$

Por último, sustituyendo un desplazamiento unitario en la ecuación 4.11 se obtiene la rigidez del sistema de contraventeo, quedando expresada de la siguiente manera:

$$K_C = 2 \frac{EA}{L} \cos^2 \theta \quad (4.12)$$

El inicio de la fluencia del conjunto marco-disipador se produce cuando fluye el panel del disipador, la fuerza cortante que soporta el disipador en este instante es:

$$V_{DPC_y} = 0.58 F_y A_w \quad (4.13)$$

El desplazamiento lateral del conjunto marco-disipador en este punto se calcula con la siguiente expresión:

$$\delta'_{M+DPC} = \frac{V_{DPC_y}}{K_{DPC-C}} \quad (4.14)$$

mientras que el cortante resistido será igual a:

$$V'_{M+DPC} = K_{M+DPC} \delta'_{M+DPC} \quad (4.15)$$

Una vez que ha fluido el panel, cualquier incremento en la fuerza cortante es resistido únicamente por el marco hasta que se inicia la fluencia en los extremos de las columnas, así la fuerza cortante que resiste el conjunto M+DPC se calcula con la siguiente expresión:

$$V''_{M+DPC} = V'_{M+DPC} + V_{MS_y} - K_{MS} \delta'_{M+DPC} \quad (4.16)$$

al suponer que el panel tiene un comportamiento elasto-plástico perfecto, la rigidez del conjunto hasta el inicio de la fluencia de las columnas será igual a la rigidez del marco solo, por lo que el desplazamiento en este punto se calcula como:

$$\delta''_{M+DPC} = \frac{V_{MS_y}}{K_{MS}} \quad (4.17)$$

Finalmente el cortante último que resiste el sistema será igual a:

$$V_{M+DPC_u} = V_{MS_u} + V_{DPC_y} \quad (4.18)$$

Debido a que el mecanismo de colapso del conjunto marco-disipador es igual al del marco solo, el desplazamiento último también es el mismo.

En la tabla 4.3 se presentan los valores calculados analíticamente para rigidez inicial, resistencia y desplazamiento en los diferentes puntos de interés para el marco solo y reforzado con los tres dispositivos disipadores ensayados

**Tabla 4.3** Valores analíticos de rigidez, resistencia y desplazamiento para los cuatro modelos ensayados

Modelo	$K_{MS}$ [t/cm]	$K_{DPC-C}$ [t/cm]	$V_{DPC_y}$ [t]	$K_{M+DPC}$ [t/cm]	$\delta'_{M+DPC}$ [cm]	$V'_{M+DPC}$ [t]	$\delta''_{M+DPC}$ [cm]	$V''_{M+DPC}$ [t]	$\delta_{M+DPCu}$ [cm]	$V_{M+DPCu}$ [t]
Marco Solo	8.3	—	—	8.3	0.91	7.53	—	—	5.83	11.55
Marco+DPC-SA	8.3	174.9	42.4	183.2	0.24	44.42	0.91	49.94	5.83	53.96
Marco+DPC-AH	8.3	159.0	32.8	167.3	0.21	34.54	0.91	40.36	5.83	44.38
Marco+DPC-AV	8.3	139.1	23.8	147.4	0.17	25.24	0.91	31.35	5.83	35.37

#### 4.2.1.2 Resistencia

A continuación se hace una comparación entre la resistencia máxima que alcanzaron los modelos durante los ensayos y la resistencia última calculada en la sección anterior con el fin de evaluar la

aproximación que brinda el modelo analítico utilizado, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4** Comparación de la resistencia teórica y experimental del conjunto marco-disipador

Modelo	Resistencia [t]			Incremento de Resistencia [%]
	Teórica	Experimental	Teórica/Experimental	
Marco Solo	11.55	11.72	0.99	—
Marco + DPC-SA	53.96	62.00	0.87	529
Marco + DPC-AH	44.38	54.74	0.81	467
Marco + DPC-AV	35.37	40.30	0.88	344

De los resultados obtenidos se observa que para todos los casos la resistencia experimental resultó mayor que la obtenida teóricamente, el modelo marco solo es el que muestra menor diferencia, siendo ambos valores prácticamente iguales. Los modelos reforzados con los DPC muestran valores parecidos, aunque el modelo marco+ DPC-AH presenta una variación ligeramente superior, resultando la resistencia teórica para este caso un 20% menor que la experimental.

El incremento en resistencia que proporcionarían los dispositivos DPC-SA, DPC-AH y DPC-AV en relación con el marco solo para este trabajo experimental fue de 529%, 467% y 344% respectivamente.

#### 4.2.1.3 Rigidez inicial

Al reforzar el marco con los dispositivos disipadores de energía, la rigidez elástica del conjunto se vio incrementada notablemente en relación con la rigidez que presentaba el marco solo, por este motivo se realizó una comparación de la rigidez elástica que tuvieron los diferentes especímenes, así mismo para tener un índice de la aproximación que brindan las hipótesis y suposiciones hechas para el cálculo de la rigidez teórica se comparó ésta con la medida experimentalmente.

En la tabla 4.5 se presentan los valores de la rigidez inicial teórica y la rigidez inicial experimental para cada uno de los modelos ensayados. Los valores teóricos se calcularon en la anterior sección y los valores experimentales se obtuvieron considerando la rigidez secante inicial del intervalo de comportamiento elástico de la curva de capacidad de cada uno de los especímenes.

**Tabla 4.5** Comparación de la rigidez inicial teórica y experimental del conjunto marco-disipador

Modelo	Rigidez inicial [t/cm]			Incremento de Rigidez [%]
	Teórica	Experimental	Teórica/Experimental	
Marco Solo	8.27	5.70	1.45	—
Marco + DPC-SA	183.19	100.35	1.83	1761
Marco + DPC-AH	167.28	95.50	1.75	1675
Marco + DPC-AV	147.40	90.27	1.63	1584

En la tabla anterior se aprecia de manera general que la rigidez teórica fue mayor a la experimental en todos los casos, siendo la diferencia más grande de 83% para el modelo marco + DPC-SA y la menor de 45% para el modelo marco solo. Analizando los resultados se puede atribuir las diferencias encontradas a dos causas principales: la primera referente a las columnas del marco, las cuales tenían un cierto nivel de daño, por lo que su rigidez real es obviamente menor que la calculada a partir de sus propiedades mecánicas originales; y la segunda seguramente debida a que la hipótesis de que el dispositivo disipador se encontraba totalmente restringido al giro en la conexión con la viga del marco representa una condición superior a la que realmente existe.

#### 4.2.1.4 Rigidez pico a pico

La rigidez pico a pico ( $K_{pp}$ ) o rigidez efectiva se define como la secante que une los puntos de desplazamiento lateral máximo, positivo y negativo de un ciclo completo de la curva carga lateral-desplazamiento (figura 4.10), quedando expresada de la siguiente manera:

$$K_{pp} = \frac{F^+ + |F^-|}{D^+ + |D^-|} \quad (4.19)$$

donde:

- $D^+$  = desplazamiento máximo positivo
- $D^-$  = desplazamiento máximo negativo
- $F^+$  = fuerza cortante positiva correspondiente a  $D^+$
- $F^-$  = fuerza cortante negativa correspondiente a  $D^-$

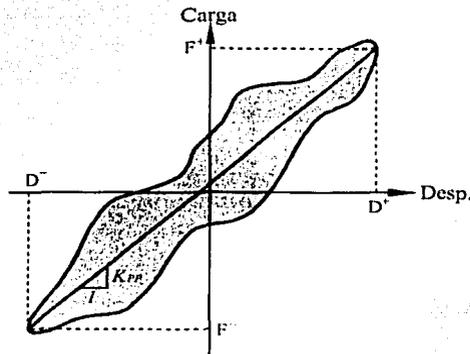


Figura 4.10 Definición de rigidez pico a pico

Para cada uno de los modelos ensayados se graficó el cociente de la rigidez pico a pico entre la rigidez inicial experimental respecto al desplazamiento lateral del modelo, además también se graficó a manera de referencia la variación que tendría el cociente  $K_{pp}/K_0$  en el caso de un modelo ideal con comportamiento elasto-plástico. Para poder definir el punto de fluencia de este modelo ideal se utilizó el criterio descrito, más adelante, en la sección referente a ductilidad. Se presenta por separado el

comportamiento que tuvieron los modelos durante las tres fases de desplazamiento ascendente (ver historia de carga, figura 3.11), así el primer patrón corresponde a los ciclos 1 al 10, el segundo patrón a los ciclos 11 al 18 y el tercer patrón a los ciclos 19 al 24.

En la figura 4.11 se presenta la variación de la rigidez pico a pico del marco solo, se observa un comportamiento bastante homogéneo entre los tres patrones, existiendo para los mismos niveles de distorsión una reducción de rigidez muy pequeña durante el tercer patrón. La degradación de  $K_{pp}$  en función de la distorsión tampoco es muy grande, así para una distorsión máxima cercana al 1.3%, la rigidez  $K_{pp}$  presenta valores de 82% de la rigidez inicial del modelo.

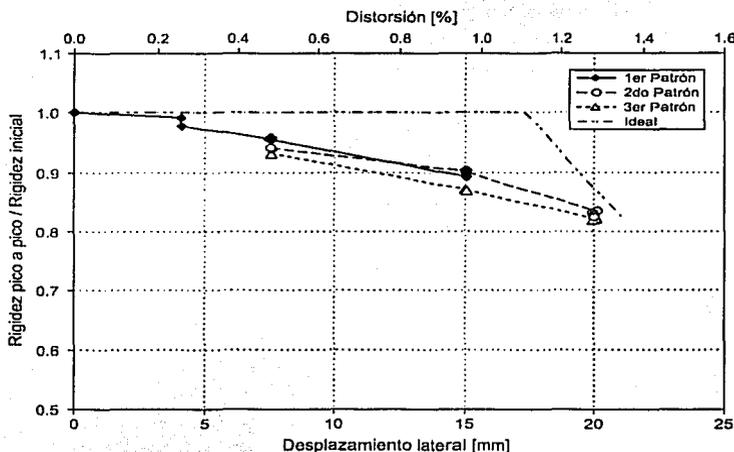


Figura 4.11 Degradación de rigidez pico a pico del modelo Marco Solo

En la figura 4.12 se presenta la degradación de la rigidez pico a pico del marco reforzado con el dispositivo DPC-SA, en esta gráfica se puede ver con claridad como  $K_{pp}$  se degrada sustancialmente conforme se incrementa la distorsión del conjunto marco-disipador. Es importante señalar que la degradación de  $K_{pp}$ , no significa un mal comportamiento del disipador, ya que la pendiente de la secante que define  $K_{pp}$  tenderá a disminuir al ampliarse los lazos de histéresis, situación deseable porque significa un incremento de la cantidad de energía disipada.

Durante el primer patrón se observa que a distorsiones menores a 0.3% la degradación de  $K_{pp}$  es pequeña, decayendo rápidamente a partir de este punto. En el segundo patrón se observa una degradación importante para una distorsión de 0.3%, teniendo  $K_{pp}$  un valor de 62% de la rigidez inicial. Para valores mayores de distorsión, la degradación de  $K_{pp}$  se incrementa hasta llegar a un 27% de  $K_0$  para una distorsión de 1.2%. Durante el tercer patrón, nuevamente se observa la tendencia de sufrir mayor degradación en las inmediaciones de 0.3% de distorsión, encontrándose ahora  $K_{pp}$  en un 45% del valor inicial, para distorsiones mayores muestra poca variación respecto a los valores alcanzados en los patrones anteriores, especialmente para distorsiones de 1.2% donde el valor de  $K_{pp}$  ha sido casi igual para todas las repeticiones.

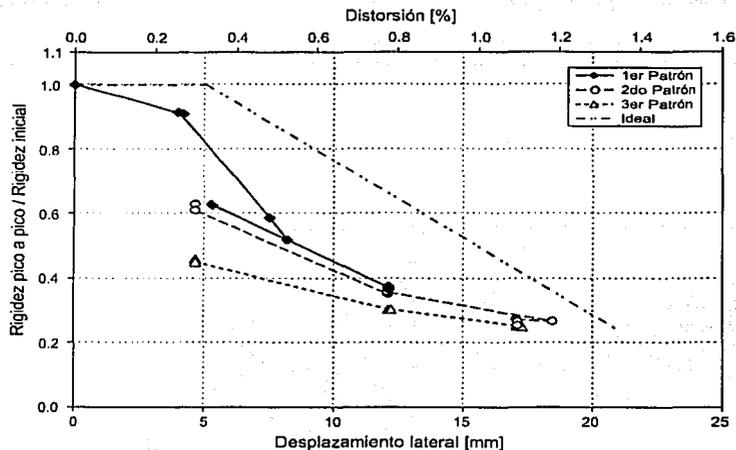


Figura 4.12 Degradación de rigidez pico a pico del modelo Marco + DPC-SA

En la figura 4.13 se presenta la degradación de la rigidez pico a pico del marco reforzado con el dispositivo DPC-AH, la gráfica muestra un comportamiento homogéneo para todos los niveles de distorsión. En este modelo la rigidez  $K_{pp}$  muestra una variación homogénea, mostrando una pendiente ligeramente menor para distorsiones debajo de 0.3%, la misma se incrementa para distorsiones cercanas a 0.5% para luego irse atenuando según la distorsión aumenta, al llegar a distorsiones del orden de 1.3%,  $K_{pp}$  tiene un valor de 25% de  $K_0$ . Una característica importante observada en este espécimen es la gran similitud de las curvas para los diferentes patrones de carga, existiendo una degradación casi nula de  $K_{pp}$  entre repeticiones sucesivas a un mismo nivel de distorsión, lo cual es una muestra de la estabilidad que presentan los lazos histeréticos de este modelo.

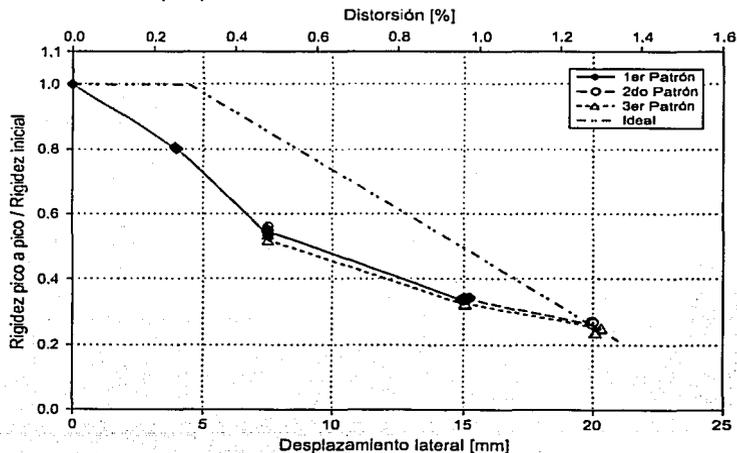


Figura 4.13 Degradación de rigidez pico a pico del modelo Marco + DPC-AH

En la figura 4.14 se presenta la degradación de la rigidez pico a pico del marco reforzado con el dispositivo DPC-AV, a pequeñas distorsiones la degradación de  $K_{pp}$  para este espécimen fue la mayor de los tres modelos, así para distorsiones cercanas a 0.3%, la rigidez  $K_{pp}$  ya tiene una degradación del 32% respecto de  $K_0$ , este fenómeno pudiera atribuirse a un inicio temprano del daño en el panel, debido a que este disipador tenía el alma con el menor espesor de los tres dispositivos ensayados. Durante el primer y segundo patrón de desplazamiento ascendente, el modelo muestra un comportamiento bastante similar, para una distorsión de 1.3%  $K_{pp}$  tiene un valor igual al 21% de  $K_0$ , mientras que al observar el tercer patrón se ve una degradación de  $K_{pp}$  respecto de los valores alcanzados durante los primeros patrones. Al igual que lo ocurrido en el modelo reforzado con el dispositivo DPC-SA la mayor degradación ocurre para distorsiones pequeñas, mientras que a distorsiones grandes la degradación no resulta significativa, así durante el último patrón para una distorsión de 1.3%  $K_{pp}$  tiene un valor de 18% de  $K_0$ .

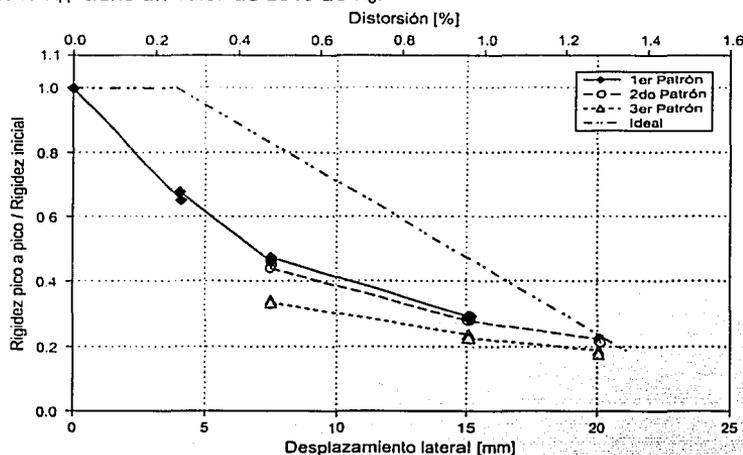


Figura 4.14 Degradación de rigidez pico a pico del modelo Marco + DPC-AV

En la figura 4.15 se hace una comparación de la rigidez pico a pico de todos los modelos y su variación durante el transcurso de la prueba.

Claramente se observa el incremento de rigidez que proporcionan los dispositivos respecto al marco solo, el cual además presenta poca variabilidad de su rigidez  $K_{pp}$  durante el transcurso de la prueba. Se puede ver también que la rigidez está claramente influenciada por el espesor de la placa que forma el alma del disipador y no tanto así por la presencia de atiesadores.

Pese a las diferencias geométricas de los disipadores, el comportamiento que tiene el conjunto marco-disipador para los diferentes especímenes resulta muy similar, según se puede ver en la figura 4.16. En la misma se puede apreciar que el modelo con mejor comportamiento, desde el punto de vista de no sufrir degradación excesiva de  $K_{pp}$  entre las diferentes repeticiones a un mismo nivel de distorsión, es el marco reforzado con el dispositivo DPC-AH, la máxima variación de  $K_{pp}$  respecto del valor

promedio fue de 8% durante el ciclo 24 a una distorsión de 1.27%. El modelo reforzado con el dispositivo DPC-SA presentó una máxima variación de  $K_{pp}$  respecto del valor promedio de 20%, durante el ciclo 20 a una distorsión de 0.48%, mientras que en el modelo reforzado con el dispositivo DPC-AV, la máxima variación de  $K_{pp}$  respecto del valor promedio fue de 22% durante el ciclo 20 a una distorsión de 0.48%.

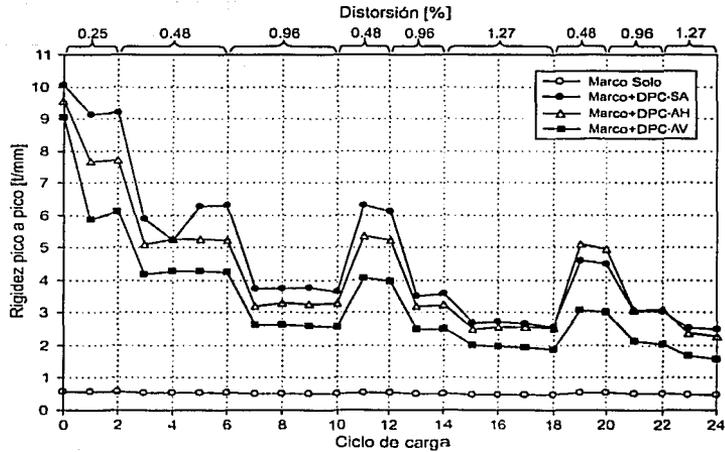


Figura 4.15 Comparación de la rigidez pico a pico de cada modelo

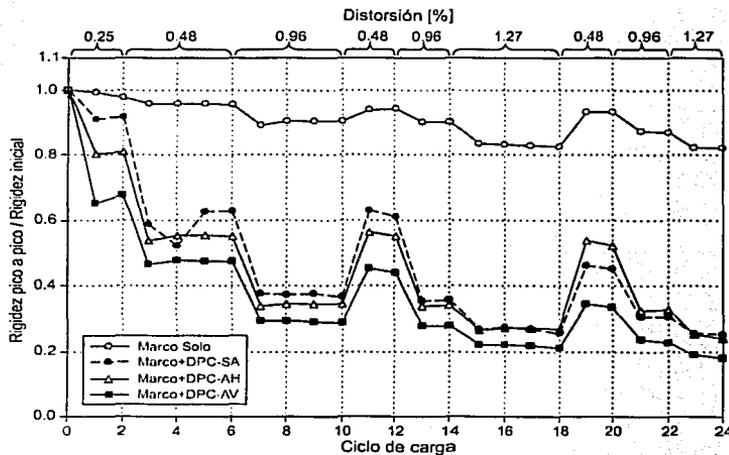


Figura 4.16 Comparación de la degradación de rigidez pico a pico de cada modelo

#### 4.2.1.5 Curvas de capacidad

El comportamiento que tuvieron los cuatro modelos se puede comparar también a través de sus curvas de capacidad; en la figura 4.17 se presentan las curvas de capacidad tanto experimentales como teóricas. Las curvas experimentales se obtuvieron a partir de las envolventes de la rama positiva de la curva carga lateral-desplazamiento lateral de cada modelo, para el primero de los ciclos de igual desplazamiento, mientras que las teóricas representan los valores calculados en la sección 4.2.1.1.2. Se hace notar también que la resistencia máxima que muestran estas curvas no es la misma que aparece en la tabla 4.4, ya que ésta última se alcanzó en la rama negativa de la curva carga lateral-desplazamiento lateral.

Las curvas de capacidad experimentales muestran comportamiento un tanto diferente para los cuatro modelos. El marco solo presenta comportamiento aproximadamente elástico lineal hasta una distorsión de 0.8%, a partir de este punto su rigidez va disminuyendo gradualmente hasta el punto de máximo desplazamiento al que fue sometido. En el modelo marco + DPC-SA el comportamiento elástico lineal ocurre hasta una distorsión de 0.2%, luego la rigidez va disminuyendo hasta hacerse prácticamente nula para distorsiones entre 0.8% y 1.8%, a partir de este último punto el modelo presenta rigidez negativa hasta el final de la prueba.

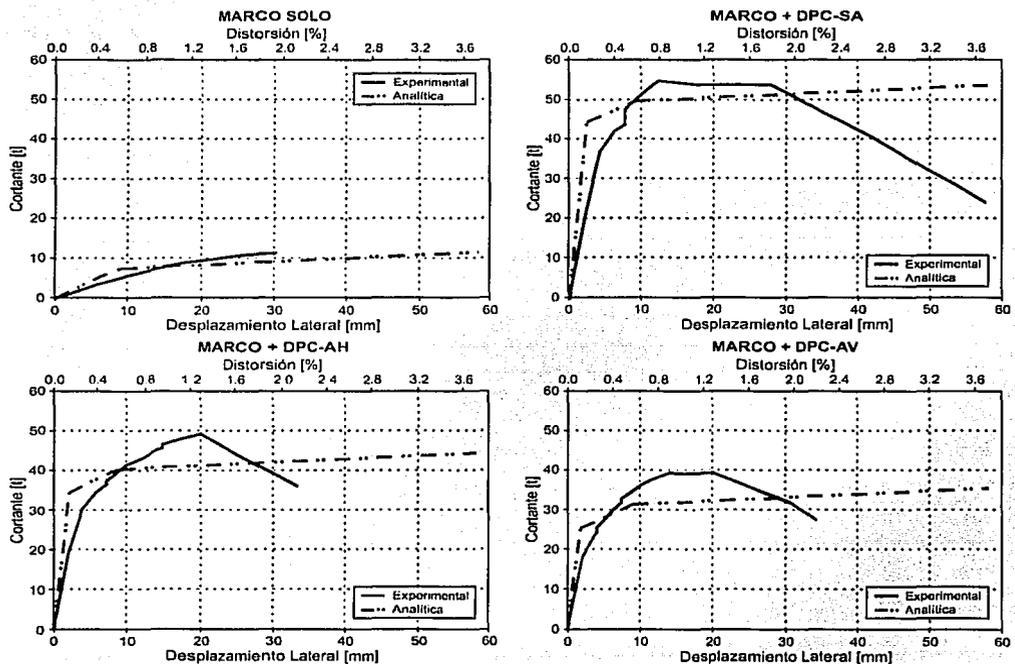


Figura 4.17 Curvas de capacidad teóricas y experimentales de los cuatro modelos

El modelo marco + DPC-AH presenta comportamiento similar en forma al marco solo, aproximadamente elástico lineal hasta una distorsión de 0.2%, luego su rigidez va disminuyendo hasta 1.3% y rigidez negativa a partir de este punto. El comportamiento del modelo marco + DPC-AV es aproximadamente elástico hasta llegar a una distorsión de 0.13%, conforme la carga se incrementa va perdiendo rigidez hasta que ésta llega a ser nula en el intervalo de distorsiones de entre 0.95% y 1.30%, presentando finalmente, a partir de este último punto, rigidez negativa.

Observando la pendiente negativa de la curva de capacidad se ve que los modelos reforzados con los dispositivos DPC-AH y DPC-AV se inestabilizan al mismo nivel de distorsión, es decir a 1.3%; mientras que el modelo reforzado con el DPC-SA se inestabiliza a una distorsión de 1.7%. Se hace notar que la inestabilidad de los modelos se pudo registrar gracias a la utilización de un gato hidráulico con control manual, el cual mantiene la carga aplicada aunque el modelo se siga deformando, situación que no ocurre cuando se utilizan actuadores, porque éste tipo de equipo regula la carga que aplica para mantener un desplazamiento prefijado, por lo cual los resultados obtenidos pueden dar una idea falsa de la estabilidad del modelo a grandes desplazamientos.

La diferencia entre la resistencia máxima medida experimentalmente y la calculada analíticamente se puede ver gráficamente en esta figura, además se observa que existe una gran diferencia entre los desplazamientos teórico y experimental asociados a la máxima resistencia, esta diferencia seguramente se debe a que el modelo teórico no considera el daño en el disipador producto de la carga cíclica a la que se ve sometido, por lo que la falla del modelo experimental ocurrió antes de que se articularan los extremos de las columnas como se supuso en el modelo teórico.

Finalmente en la figura 4.18 se comparan las curvas de capacidad experimentales de los cuatro modelos ensayados.

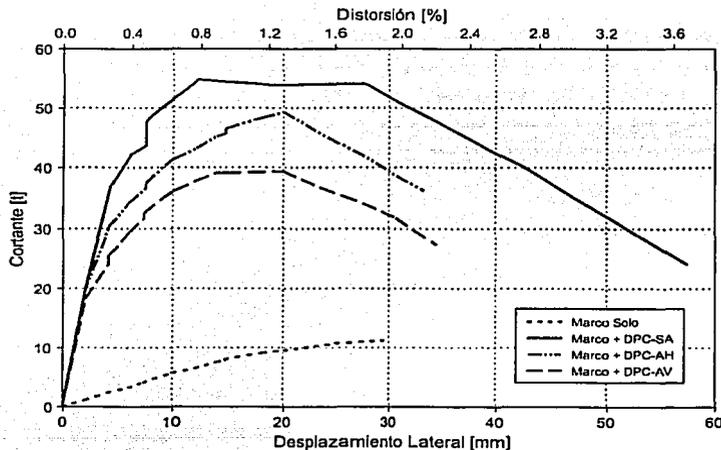


Figura 4.18 Comparación de las curvas de capacidad experimentales de cada modelo

### 4.2.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Una de las características principales de los dispositivos disipadores es reducir la respuesta de la estructura mediante la disipación de una parte de la energía que un sismo introduce en la misma, de manera que la cantidad de energía que debe transformarse en deformación estructural resulte menor, por lo que la respuesta esperada de la estructura en su conjunto tendería a reducirse. La disipación de energía se logra a través del incremento que proporciona el dispositivo disipador ya sea en el amortiguamiento viscoso o en el amortiguamiento histerético de la estructura.

En el caso de los dispositivos disipadores en estudio, se pretende incrementar el amortiguamiento del sistema estructural a través del comportamiento histerético de los mismos. En cada ciclo histerético se disipa energía, la cual es proporcional al área dentro de la curva carga lateral contra desplazamiento, por consiguiente entre mayor sea el área dentro de esta curva, mayor será la disipación de energía que proporciona el dispositivo.

La energía disipada durante el ensaye se calculó como el área encerrada en cada uno de los ciclos de histéresis de la curva carga lateral-desplazamiento de cada modelo, tal como se muestra en la figura 4.19a. Para poder realizar comparaciones de la cantidad de energía disipada por cada uno de los especímenes ensayados, fue necesario normalizar la energía disipada en cada ciclo respecto de la máxima energía potencial alcanzada en el mismo ciclo. De acuerdo a la figura 4.19b la máxima energía potencial para un ciclo de histéresis se define como el área OABO, donde el punto A representa el punto extremo que alcanzó el modelo en ese ciclo.

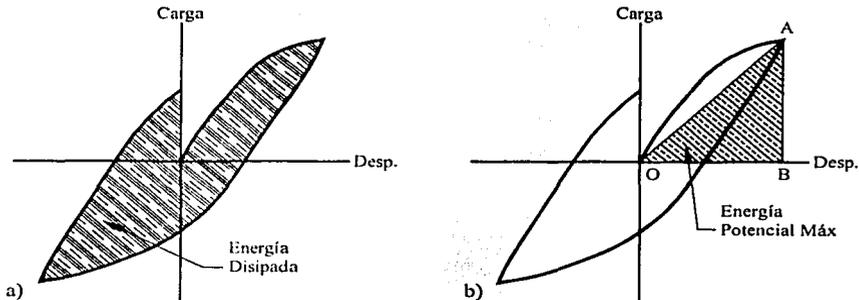


Figura 4.19 Definición de energía disipada

Para cada espécimen se graficó la energía disipada normalizada por ciclo contra el desplazamiento lateral de la viga cabezal, al igual que en la sección anterior se presenta de manera separada el comportamiento que tuvieron los dispositivos durante las tres fases de desplazamiento ascendente.

En la figura 4.20 se muestran los tres patrones correspondientes al modelo del marco solo, el primer y tercer patrón exhiben un comportamiento bastante similar, pero no así el segundo patrón. Para distorsiones pequeñas la cantidad de energía que disipa el marco es casi nula, debido a que el mismo permanece aún dentro del intervalo de comportamiento elástico lineal. Conforme la distorsión aumenta

y el modelo va incursionando en el intervalo de comportamiento no lineal, la cantidad de energía disipada también se incrementa, llegando a un valor máximo de 0.63 para un desplazamiento de 20.15 mm ( $\psi_M = 1.29\%$ ) durante el segundo patrón. La forma escalonada del primer patrón muestra que para un mismo nivel de desplazamiento, se disipó mayor energía en la primera incursión del modelo a ese desplazamiento. Este comportamiento tiende a reducirse en el segundo patrón llegando a ser prácticamente nulo durante el tercer patrón.

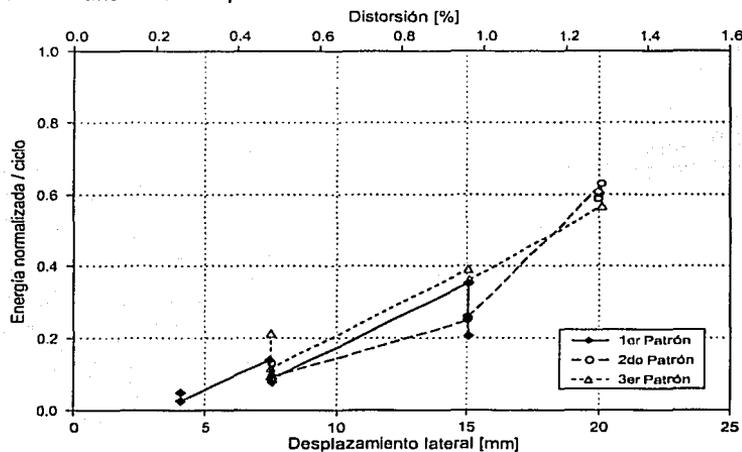


Figura 4.20 Energía disipada por ciclo para el modelo Marco Solo

En la figura 4.21 se muestran los tres patrones correspondientes al marco reforzado con el dispositivo DPC-SA, la curva correspondiente al primer patrón se considera atípica debido al corrimiento en las uniones como se explicó en el capítulo anterior, pero sirve para mostrar que cuando el modelo se llevó por primera vez a distorsiones pequeñas ( $< 3\%$ ) la cantidad de energía disipada era mínima, prácticamente igual a la que disipaba el marco solo; sin embargo, se incrementó rápidamente cuando se aumentó el desplazamiento lateral del modelo. La cantidad máxima de energía disipada se alcanzó al final del primer patrón, y su valor fue de 5.2 a un desplazamiento de 12.14 mm ( $\psi_M = 0.78\%$ ). Las curvas correspondientes a los siguientes dos patrones muestran que el modelo disipó bastante energía aún a distorsiones pequeñas, alrededor de 13 veces más de la energía disipada durante el primer patrón para una distorsión de 0.3%. Si bien ambas curvas mantienen la tendencia de que la cantidad de energía disipada aumente con el desplazamiento, este incremento es mucho menor que en el primer patrón, también se puede observar que en general la capacidad de disipar energía se va degradando con cada repetición de carga, debido muy probablemente al daño que va acumulando el disipador.

En la figura 4.22 se muestran los tres patrones correspondientes al marco reforzado con el dispositivo DPC-AH, los mismos son muy parecidos entre sí y muestran un comportamiento homogéneo para todos los niveles de distorsión. La capacidad de este modelo para disipar energía está presente desde pequeñas distorsiones, la pendiente con la que se incrementa la energía disipada en función del

desplazamiento es menor que en el anterior modelo, manteniéndose casi constante para todos los niveles de distorsión, pero se observa una ligera disminución conforme se alcanza distorsiones mayores.

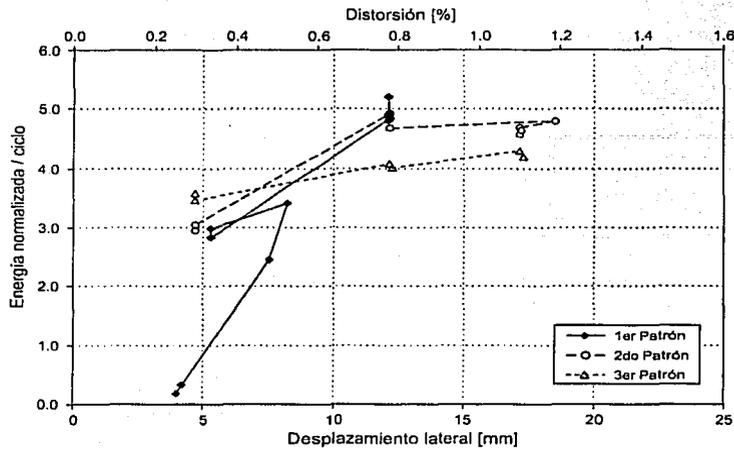


Figura 4.21 Energía disipada por ciclo para el modelo Marco + DPC-SA

Para este espécimen la máxima energía disipada normalizada fue de 4.66 correspondiente a un desplazamiento de 20.03 mm ( $\psi_M = 1.28\%$ ), valor alcanzado durante el segundo patrón. Al igual que lo mostrado por el anterior modelo, éste presenta una disminución de la cantidad de energía disipada para repeticiones sucesivas a un mismo nivel de desplazamiento, tendencia que se acentúa durante el tercer patrón, en el cual la cantidad de energía disipada para todos los niveles de distorsión es ligeramente menor que durante los dos patrones anteriores.

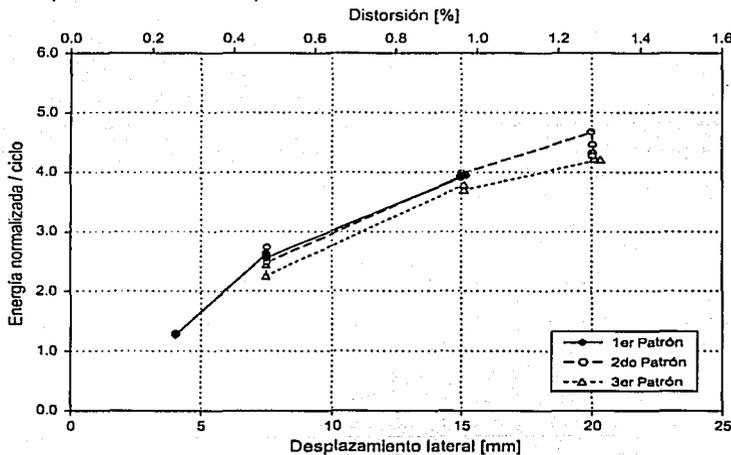


Figura 4.22 Energía disipada por ciclo para el modelo Marco + DPC-AH

En la figura 4.23 se muestran los tres patrones correspondientes al marco reforzado con el dispositivo DPC-AV, en la misma se puede observar que este modelo fue el que más energía disipó al inicio de la prueba; sin embargo, la pendiente, según la cual se incrementa la cantidad de energía disipada respecto al desplazamiento, es la menor de los tres modelos que se reforzaron con disipadores.

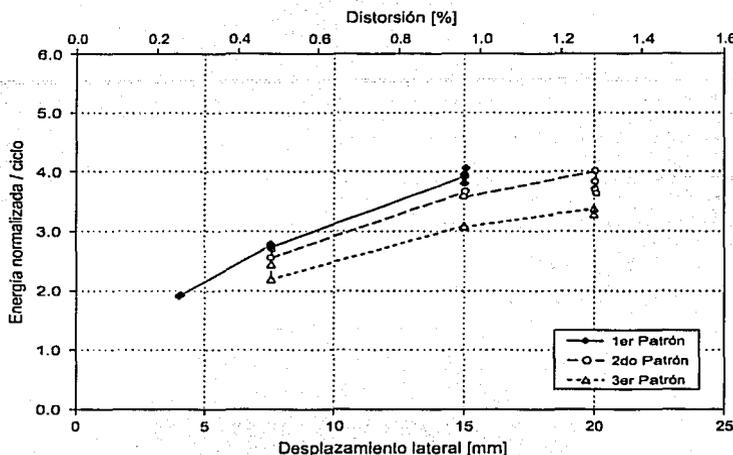


Figura 4.23 Energía disipada por ciclo para el modelo Marco + DPC-AV

Los tres patrones presentaron un comportamiento similar en forma, pero no se puede decir lo mismo cuantitativamente porque los patrones dos y tres presentaron reducciones notorias en la cantidad de energía disipada respecto de la alcanzada en el patrón anterior. En este espécimen, al igual que en el modelo reforzado con el dispositivo DPC-SA, la mayor cantidad de energía disipada se alcanzó al final del primer patrón, el valor fue de 4.06 correspondiente a un desplazamiento de 15.08 mm ( $\psi_M = 0.96\%$ ). Al igual que en los anteriores especímenes se observa que para cualquier nivel de desplazamiento, la mayor cantidad de energía se disipó durante la primera incursión del modelo a ese nivel de desplazamiento, cantidad que fue disminuyendo en las sucesivas repeticiones.

Finalmente en la figura 4.24 se presenta la gráfica de la energía disipada acumulada en función del ciclo de carga, aquí salta a la vista el notable incremento en la capacidad de disipar energía que proporcionan los dispositivos disipadores de energía, comparando el último valor alcanzado durante el ciclo 24 se ve que el modelo marco+DPC-SA fue el que más energía disipó, siendo ésta 12.9 veces superior a la cantidad disipada por el marco solo, en segundo término quedó el modelo marco+DPC-AH y en tercero el modelo marco+DPC-AV, que disiparon 11.5 y 10.9 veces la cantidad disipada por el marco solo respectivamente. Durante la primera mitad de la prueba (hasta el ciclo 12) la cantidad de energía disipada por los tres modelos con disipador es muy similar, mientras que en la segunda mitad el modelo marco+DPC-SA se aleja por arriba de los otros dos, los cuales presentan valores similares hasta el final de la prueba.

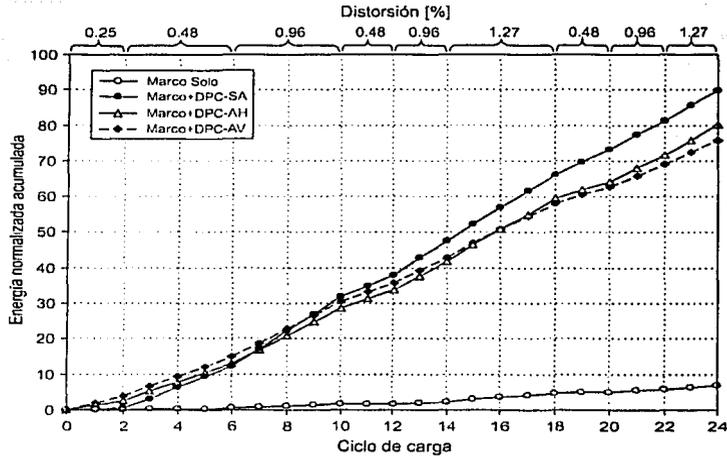


Figura 4.24 Comparación de la energía disipada acumulada de cada modelo

### 4.2.3 AMORTIGUAMIENTO VISCOZO EQUIVALENTE

Cuando un oscilador es sometido a una excitación por aceleración en su base podría mantenerse en movimiento por largo tiempo, sin embargo existe un proceso llamado amortiguamiento que hace que la vibración libre disminuya en amplitud.

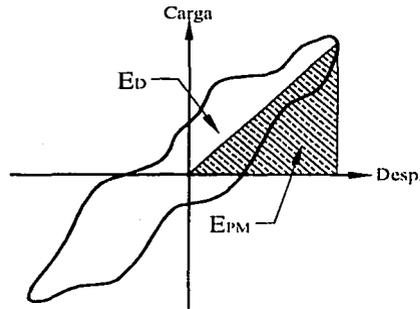
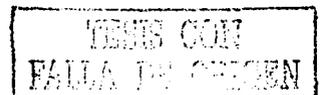


Figura 4.25 Definición de amortiguamiento viscoso equivalente

Debido al amortiguamiento, la energía inducida al oscilador es disipada por medio de varios mecanismos, los cuales pueden estar presentes al mismo tiempo. En estructuras reales por ejemplo, algunos de los mecanismos que contribuyen a la disipación de energía son: la fricción entre las conexiones de acero, la apertura y cierre de micro grietas en el concreto o la fricción entre la estructura y elementos no estructurales. Debido a que es muy difícil identificar y describir matemáticamente cada uno de estos mecanismos, usualmente se representa el amortiguamiento de una manera idealizada que engloba la participación de todos los mecanismos, esta idealización es llamada *amortiguamiento viscoso equivalente* (Chopra, 2001)



Generalmente se suele modelar el amortiguamiento mediante un amortiguador viscoso lineal, con un coeficiente de amortiguamiento constante, sin embargo se ha determinado experimentalmente que para sistemas con comportamiento inelástico el amortiguamiento se incrementa debido al daño ocasionado en los elementos estructurales. Una forma de tomar en cuenta este incremento es la propuesta de Jacobsen (1930), quien propone reemplazar el amortiguamiento histérico desarrollado por la disipación de energía en la etapa inelástica por un amortiguamiento viscoso equivalente definido como (figura 4.25):

$$H_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{PM}} \quad (4.20)$$

donde:

$E_D$  = energía disipada durante un ciclo de histéresis

$E_{PM}$  = energía potencial máxima del ciclo

En la figura 4.26 se presenta una gráfica que muestra la variación del amortiguamiento viscoso equivalente de los diferentes modelos durante el transcurso de la prueba, en la misma se puede apreciar el gran incremento de amortiguamiento histérico que proporcionan los dispositivos disipadores. Comparando los valores promedio para el máximo valor de distorsión de la prueba, se ve que los modelos reforzados con los dispositivos DPC-SA, DPC-AH y DPC-AV tienen un amortiguamiento 7.6, 7.3 y 6.1 veces superior al del marco solo respectivamente.

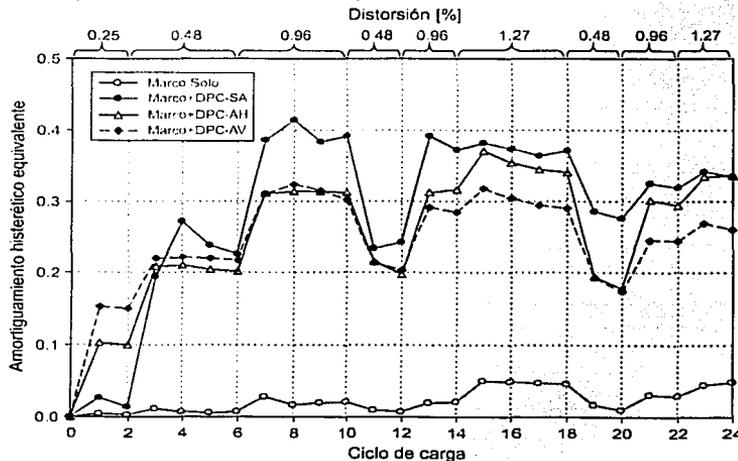


Figura 4.26 Comparación del amortiguamiento viscoso equivalente de cada modelo

Si bien el modelo reforzado con el dispositivo DPC-SA fue el que menor amortiguamiento tuvo durante los dos primeros ciclos de carga ( $\psi_M = 0.25\%$ ) también fue el que alcanzó el valor máximo de amortiguamiento, 42% durante el ciclo 8 a una distorsión de 0.96%; sin embargo, fue el modelo que presentó un comportamiento más irregular, lo cual se puede observar en la reducción y aumento del amortiguamiento para niveles de distorsión iguales. Los otros dos modelos presentan un

comportamiento muy regular durante la primera mitad de la prueba, proporcionando un amortiguamiento constante durante las repeticiones a un mismo nivel de distorsión; sin embargo, en la segunda mitad el amortiguamiento tiende a reducirse en cada nueva repetición especialmente en el modelo que incluye el dispositivo DPC-AV, el cual pese a ser llevado a distorsiones mayores que en la primera mitad no brinda mayor amortiguamiento que el alcanzado anteriormente.

#### 4.2.4 DUCTILIDAD

La ductilidad es un parámetro que permite medir la capacidad de deformación de una estructura o de los elementos que conforman la misma, se considera que una estructura o elemento tienen comportamiento dúctil cuando son capaces de soportar deformaciones más allá del intervalo elástico manteniendo su resistencia.

Existen varias ductilidades asociadas a diferentes niveles de deformación o daño, es conveniente mencionar que las deformaciones pueden estar representadas por deformaciones unitarias, curvaturas, rotaciones o desplazamientos, así en esta sección se hace referencia a la ductilidad última global ( $\mu_u$ ), la cual queda definida en la ecuación 4.21 como el cociente de dividir el desplazamiento asociado a la falla del modelo entre su desplazamiento de fluencia idealizado.

$$\mu_u = \frac{d_u}{d_y} \quad (4.21)$$

El cálculo de la ductilidad se llevó a cabo a partir de la curva de capacidad experimental de cada modelo, para lo cual se aceptó que el desplazamiento último es aquel asociado a una pérdida del 20% de la resistencia mientras que el desplazamiento de fluencia se definió a partir del criterio de igualación de energías de deformación (figura 4.27), el cual consistió en igualar el área debajo de la curva de capacidad con el área de una curva elasto-plástica perfecta, cuya rigidez elástica corresponde a la rigidez inicial calculada experimentalmente según la sección 4.2.1.3.

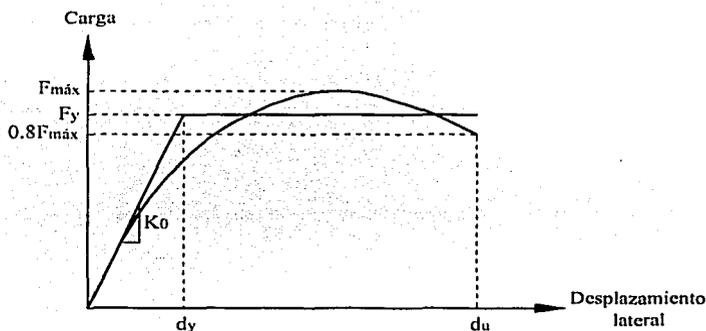


Figura 4.27 Criterio de igualación de energía

En tabla 4.6 se presentan los valores de ductilidad calculados para los cuatro modelos ensayados, se hace notar que el desplazamiento último que se utilizó para calcular la ductilidad del marco solo corresponde al máximo desplazamiento registrado durante la prueba y no así al asociado con una

pérdida de resistencia del 20%, por lo que la ductilidad real será mayor que la indicada. Hecha esta aclaración se puede decir que en general la incorporación de disipadores de energía en el marco propició un incremento de la ductilidad global del conjunto marco-disipador, siendo el modelo reforzado con el modelo marco + DPC-AV el que presenta la mayor ductilidad.

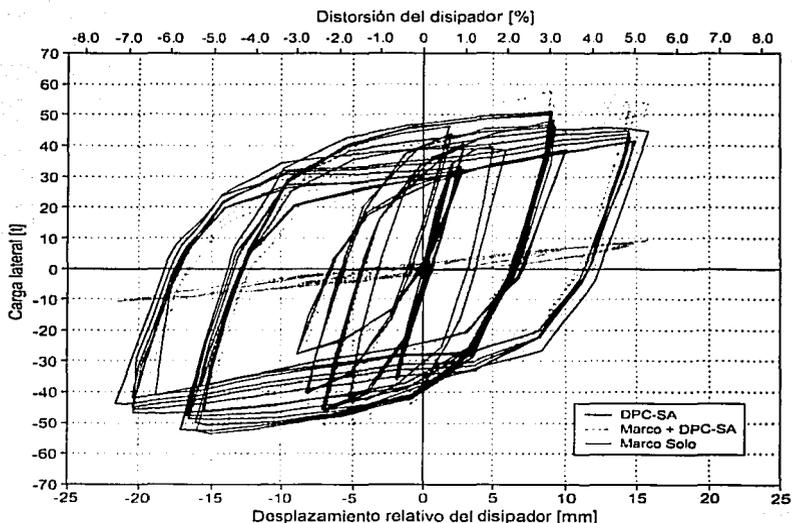
**Tabla 4.6** Valores de ductilidad del conjunto marco-disipador

Modelo	$F_y$ [t]	$d_y$ [cm]	$d_u$ [cm]	$\mu$
Marco solo	9.88	1.734	3.012	1.74
Marco + DPC-SA	50.76	0.506	3.845	7.60
Marco + DPC-AH	42.73	0.448	2.988	6.68
Marco + DPC-AV	35.23	0.390	3.082	7.90

### 4.3 COMPORTAMIENTO DEL DISPOSITIVO DISIPADOR

Si bien no se realizaron ensayos por separado de los dispositivos disipadores, el comportamiento de los mismos pudo ser aproximado de manera razonable a partir de la curva carga-desplazamiento relativo del disipador, la cual se obtuvo a partir de sustraer la curva carga lateral-desplazamiento del marco solo a la curva carga lateral-desplazamiento del marco reforzado con el respectivo disipador.

En las figuras 4.28, 4.29 y 4.30 se muestran las curvas carga-desplazamiento relativo obtenidas para cada uno de los dispositivos ensayados.



**Figura 4.28** Curva histerética del dispositivo DPC-SA

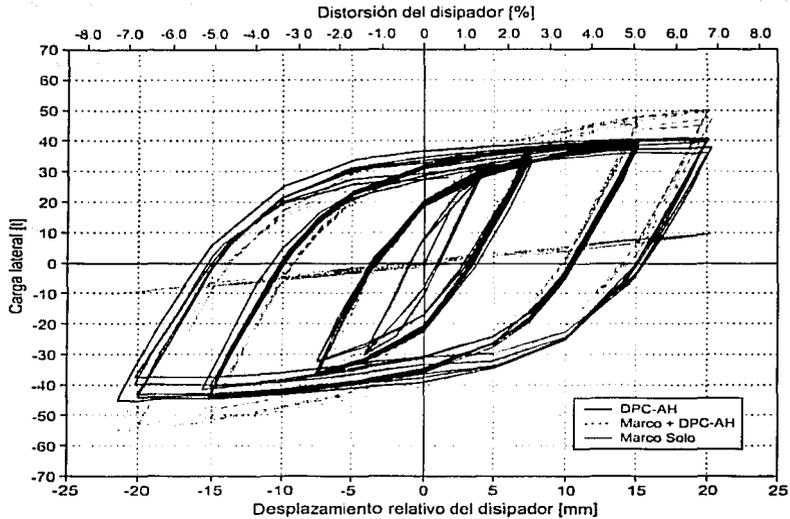


Figura 4.29 Curva histerética del dispositivo DPC-AH

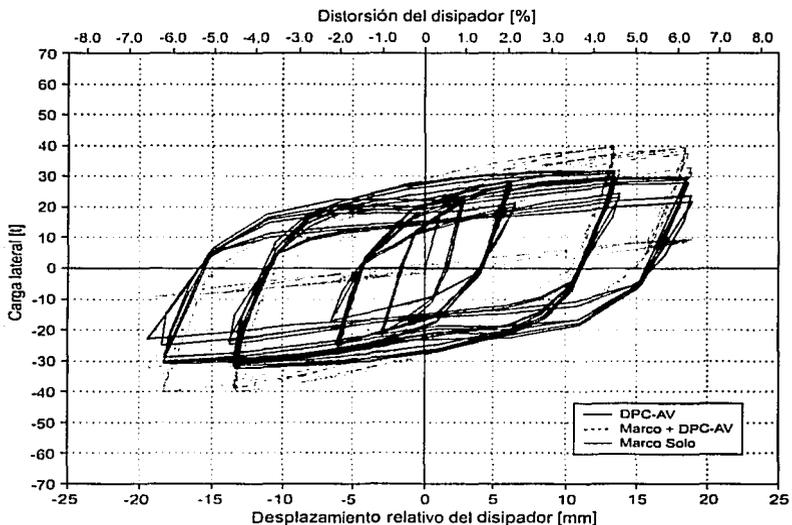


Figura 4.30 Curva histerética del dispositivo DPC-AV

Con excepción del dispositivo DPC-SA, el cual como se mencionó en el capítulo tres tuvo un comportamiento peculiar, las curvas de los otros dos dispositivos muestran lazos de histéresis amplios y bastante estables, características del comportamiento deseable para un dispositivo dissipador de

energía. Otra característica que se puede apreciar en estas gráficas es el comportamiento cercano al elasto-plástico perfecto que muestran los dispositivos, especialmente a grandes niveles de deformación lateral, razón por la cual sus lazos de histéresis resultan amplios, maximizando el área dentro de los mismos, lo cual se refleja en la cantidad de energía que disipa el dispositivo como se verá más adelante en este capítulo.

Se hace notar que la curva obtenida corresponde en realidad al conjunto disipador y sistema de contraventeo, pero debido a la escasa influencia de éste último en el comportamiento inelástico del sistema, puede considerarse que la misma representa el comportamiento del disipador solo.

#### 4.3.1 RESISTENCIA

Primeramente se realizará un estudio analítico del disipador, a fin de calcular una resistencia teórica que sirva como parámetro de comparación con la resistencia obtenida experimentalmente.

Los disipadores panel de cortante son elementos de sección I sometidos a fuerzas transversales en sus extremos, y aunque es físicamente imposible que solo exista fuerza cortante, puesto que ésta se presenta acompañada de momentos flexionantes, pero debido a la corta longitud del disipador, la magnitud de éstos es reducida y puede despreciarse su efecto. Por otra parte, en perfiles de sección I en los cuales la orientación del alma coincide con la dirección de aplicación de la carga, como es el caso, la fuerza cortante es resistida casi en su totalidad por la placa que forma el alma. Estas dos aseveraciones permiten simplificar el problema, de manera que pueda ser abordado mediante el estudio del caso teórico de un tablero de alma en cortante puro. El estudio analítico se llevará a cabo mediante la teoría clásica para el estudio de placas sometidas a esfuerzo cortante y por un método propuesto por Krawinkler (1978) para evaluar el cortante resistente en paneles de uniones viga-columna de estructuras de acero.

##### 4.3.1.1 Teoría clásica para placas en cortante puro

Se considera un tablero de espesor  $t_w$  con una longitud  $a$  entre atiesadores transversales y una altura  $b$  entre las placas de soporte longitudinal, sometido a esfuerzos cortantes uniformemente distribuidos en su borde, como se muestra en la figura 4.31. Aunque los esfuerzos cortantes reales nunca están distribuidos uniformemente, es necesario realizar esta simplificación para que la solución matemática resulte sencilla.

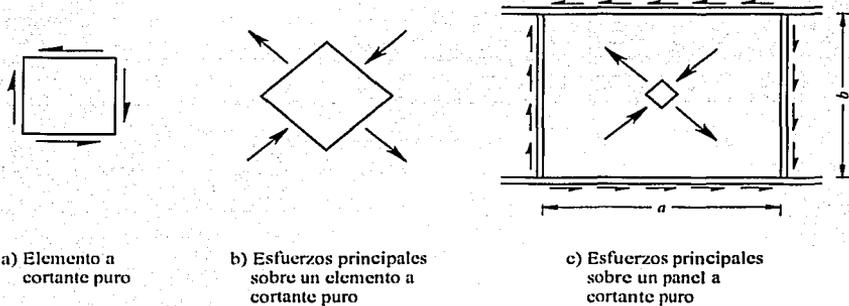
En un elemento sometido a esfuerzo cortante puro (figuras 4.31a y 4.31b), los esfuerzos principales que se generan tienen una inclinación de  $45^\circ$ ; por tanto, en una placa sometida a éste tipo de sollicitación los esfuerzos de compresión tenderán a formar ondas de pandeo con la misma inclinación.

El esfuerzo cortante crítico en el momento de iniciarse el pandeo está dado por:

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t_w)^2} k \quad (4.22)$$

donde:

- $k$  = coeficiente adimensional que depende de la condición de apoyo en los bordes y de la relación de aspecto  $\alpha = a/b$
- $a$  = dimensión mayor del panel
- $b$  = dimensión menor del panel
- $t_w$  = espesor de la placa del panel
- $E$  = módulo de elasticidad
- $\mu$  = relación de Poisson



**Figura 4.31** Panel del alma sometido a esfuerzo cortante en los bordes

Al estar la placa del alma de los dissipadores soldada en todo su contorno, se puede considerar suficientemente restringida al giro, por tanto se utilizará el coeficiente  $k$  correspondiente al caso de placas empotradas en los cuatro bordes, el cual se puede obtener a partir de la relación de aspecto  $\alpha = a/b$  mediante la siguiente expresión (Bleich, 1952):

$$k = 8.98 + \frac{5.60}{\alpha^2} \quad (\text{válida para } \alpha \geq 1.0) \quad (4.23)$$

Cuando  $\alpha$  resulta menor que 1.0, se debe intercambiar  $a$  y  $b$  en las ecuaciones 4.1 y 4.2

El esfuerzo cortante crítico calculado con la ecuación 4.22 es válido solo en comportamiento elástico, si el valor calculado excede ese límite constituye únicamente un valor ideal que debe ser corregido por inelasticidad (De Buen, 1988), existiendo una zona de transición entre el pandeo elástico y la fluencia.

Varios métodos han sido propuestos para calcular el esfuerzo cortante crítico reducido por inelasticidad, a continuación se presentan dos de las propuestas que son consideradas como válidas para el intervalo donde  $\tau_{cr} \geq 0.8\tau_y$ ,

Basler (1963) propone una curva de transición para el pandeo inelástico definida por la siguiente expresión:

$$\tau_{cr}^{red} = \sqrt{0.8\tau_y\tau_{cr}} \quad (4.24)$$



Por su parte el Euro Código 3 (Eurocode, 1988) para diseño de estructuras de acero propone la siguiente expresión:

$$\tau_{cr}^{red} = \tau_y \left\{ 1 - 0.625 \left( \sqrt{\frac{\tau_y}{\tau_{cr}}} - 0.8 \right) \right\} \quad (4.25)$$

Según la teoría de la distorsión (criterio de fluencia de von Mises) para esfuerzos planos, la condición de fluencia por esfuerzos cortantes puede relacionarse con el esfuerzo normal de fluencia a través de la siguiente ecuación:

$$\tau_y = \frac{F_y}{\sqrt{3}} = 0.58 F_y \quad (4.26)$$

donde:

$F_y$  = esfuerzo de fluencia obtenido de una prueba de tensión axial

Resumiendo lo indicado anteriormente se tiene:

- Cuando  $\tau_{cr} \leq 0.8 \tau_y$ , se presenta pandeo elástico y el esfuerzo cortante crítico se calculará con la ecuación 4.22
- Cuando  $\tau_{cr} \geq 0.8 \tau_y$ , se presenta pandeo inelástico y el esfuerzo cortante crítico se calculará con la ecuación 4.24 o con la ecuación 4.25

Conocido el esfuerzo cortante crítico para los dos casos de pandeo, es posible calcular la fuerza cortante resistida por el panel mediante la siguiente expresión:

$$V = \tau_{cr} A_w \quad (4.27)$$

donde:

$A_w$  = Área de la sección transversal del panel en la dirección de la carga aplicada

En caso de que el pandeo ocurra después de que el panel a fluido en cortante, la fuerza cortante resistente será igual a la fuerza cortante de plastificación:

$$V_p = 0.58 F_y A_w \quad (4.28)$$

De manera indicativa se presentan las relaciones de aspecto  $b/t_w$  que limitan el pandeo elástico del inelástico y éste de la fluencia (figura 4.32); para ello se resolvió la ecuación 4.22 para  $\tau_{cr} = 0.8 \tau_y$  y por otra parte se sustituyó la ecuación 4.24 en la ecuación 4.22, resolviéndola posteriormente para  $\tau_{cr} = \tau_y$ . Las expresiones obtenidas se presentan a continuación:

$$\frac{b}{t_w} = 1.331 \sqrt{\frac{k E}{(1 - \mu^2) F_y}} \quad (4.29)$$

$$\frac{b}{t_w} = 1.065 \sqrt{\frac{k E}{(1 - \mu^2) F_y}} \quad (4.30)$$

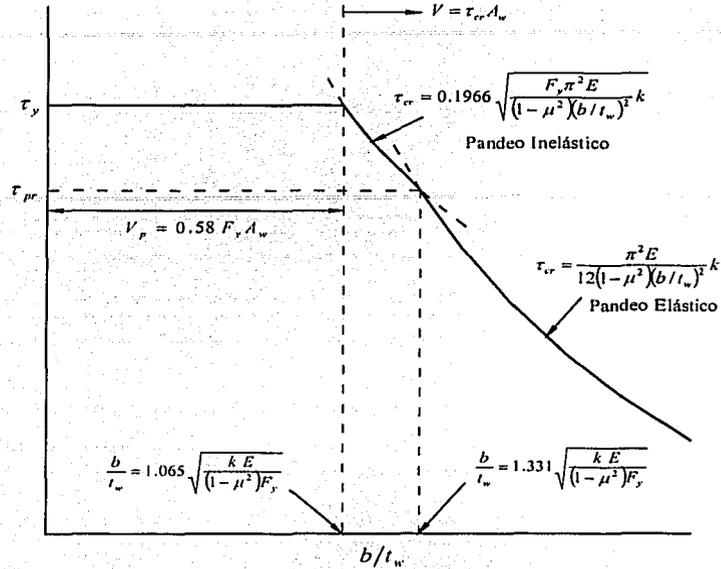


Figura 4.32 Límites de pandeo de un tablero en cortante puro

Se hace notar que las relaciones de aspecto calculadas anteriormente son válidas solamente en el caso que se utilice la fórmula propuesta por Basler, por lo que de usarse la propuesta del Euro Código habrá que realizar las sustituciones necesarias.

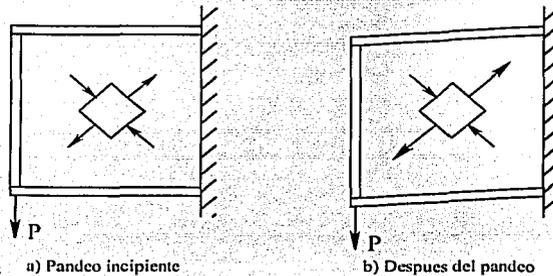
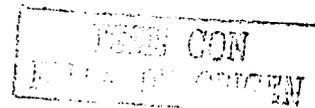


Figura 4.33 Formación del campo de tensión diagonal

Cuando el fenómeno de pandeo ocurre para un esfuerzo  $\tau_{cr} < \tau_y$ , la resistencia de la placa no se agota, ya que después de iniciado el pandeo tiende a presentarse una redistribución de esfuerzos, gracias a lo cual el material colocado a lo largo de una de las diagonales del panel trabaja a tensión (figura 4.33) y equilibra incrementos adicionales de carga; a su vez, las fuerzas que aparecen en la diagonal de tensión son resistidas por los patines y atiesadores. En el caso de los disipadores en



estudio, la placa que forma el alma es lo suficientemente robusta para soportar la fuerza cortante que ocasiona su plastificación completa sin fallar prematuramente por pandeo por lo que el incremento de resistencia debido a la contribución del campo de tensión diagonal puede considerarse despreciable.

Sin embargo, en la realidad los esfuerzos de tensión que se originan en la diagonal, desarrollan valores dentro del intervalo de endurecimiento por deformación, lo que produce que exista un incremento de resistencia posterior al pandeo, pero hasta la fecha no existe alguna expresión que permita evaluar la resistencia posterior al pandeo en estas condiciones; además, en las mediciones obtenidas no se aprecia que haya existido un incremento de resistencia luego de iniciado el pandeo, por lo que la resistencia de los disipadores panel de cortante será evaluada hasta el instante en que ocurre el pandeo.

#### 4.3.1.2 Esfuerzo cortante último en uniones viga-columna

En una estructura cualquiera, la intersección entre vigas y columnas (unión viga-columna) puede estar sujeta a fuerzas cortantes elevadas, siempre que exista un momento desbalanceado significativo en el nudo, como ocurre en los nudos exteriores y de esquina. En estas circunstancias el diseño por cortante del nudo presenta una particular importancia.

La similitud del tipo de cargas aplicadas y del comportamiento de los disipadores panel de cortante con una unión viga-columna de un marco de acero, hace posible aplicar la teoría desarrollada para evaluar la resistencia de éstas últimas al caso de los disipadores.

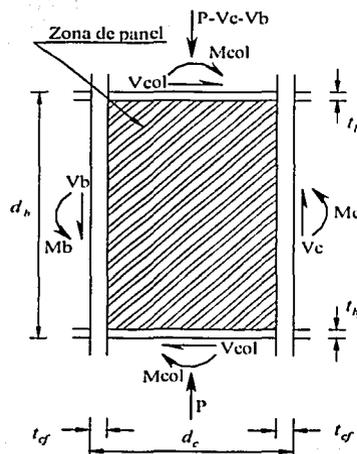


Figura 4.34 Fuerzas actuando en un nudo

De los estudios experimentales realizados por Krawinkler (1978) en uniones viga-columna con la geometría y cargas mostradas en la figura 4.34, se pudo evidenciar que la fuerza cortante última

resistida por el nudo era mucho mayor que la calculada mediante la ecuación 4.31, propuesta por el reglamento AISC para diseño plástico.

$$V_{\max} = 0.55F_y d_c t \quad (4.31)$$

donde:

$F_y$  = esfuerzo de fluencia obtenido de una prueba de tensión axial

$d_c$  = peralte de la columna

$t$  = espesor del alma de la columna

El comportamiento carga-deformación de los nudos es peculiar debido a que no exhiben una respuesta elasto-plástica perfecta, pero sí se aprecia una degradación gradual de la rigidez. Entonces resulta apropiado asociar el esfuerzo último con el nivel de fuerza cortante que pueda ser transferido de forma segura a través del nudo con deformaciones inelásticas controladas, en lugar de un comportamiento esencialmente elástico.

Un ángulo de distorsión último igual a cuatro veces el ángulo de distorsión a la fluencia puede ser aceptable y es usado por Krawinkler (1978) para formular la siguiente ecuación de diseño para esfuerzo cortante último en nudos.

El modelo matemático para el cálculo de esfuerzos y rigideces es mostrado en la figura 4.35, éste consiste en un panel a cortante con comportamiento elasto-plástico perfecto, rodeado de bordes rígidos con resortes en sus cuatro esquinas. Estos resortes simulan la resistencia de los elementos que rodean la zona del panel, en particular la resistencia a flexión de los patines de la columna.

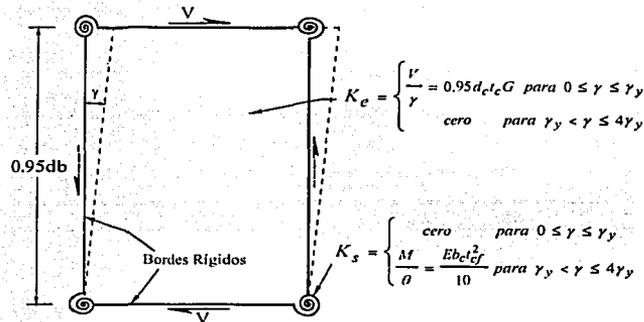


Figura 4.35 Modelo matemático del nudo

El tablero trabaja a cortante hasta que la fluencia general de la zona del panel ocurre, la ecuación 4.31 define el punto de fluencia. Aunque puede resultar conservadora como se mencionó anteriormente, la rigidez elástica estará dada por:

$$K_e = \frac{V}{\gamma} = 0.95d_c t G \quad (4.32)$$

Esta ecuación es válida hasta que  $\gamma = \gamma_y = F_y / (\sqrt{3} G)$ . Cuando este valor es substituido en la ecuación 4.32, la fuerza cortante al momento de la fluencia es:

$$V_y = 0.55 F_y d_c t$$

la cual es idéntica a la ecuación 4.31. Cuando el panel a fluido uniformemente, un incremento  $\Delta V$  en la fuerza cortante puede ser solamente atribuido a la resistencia de los elementos que rodean el panel. Esta resistencia puede ser aproximada por los resortes de las cuatro esquinas del panel, cuya rigidez corresponde a las rotaciones concentradas de los patines de la columna en cada esquina. Cuando los bordes de la zona del panel se asumen como rígidos; la rigidez de los resortes puede ser aproximada por:

$$K_s = \frac{M}{\theta} = \frac{E b_c t_{cf}^2}{10} \quad (4.33)$$

La rigidez post fluencia del nudo, atribuida a los cuatro resortes es calculada como:

$$K_p = \frac{\Delta V}{\Delta \gamma} = \frac{1.095 b_c t_{cf}^2 G}{d_b} \quad (4.34)$$

Si se acepta que la rigidez post fluencia del nudo  $K_p$  es válida para el intervalo de  $\Delta \gamma = 3 \gamma_y$ , el esfuerzo cortante último  $V_u$  del nudo es dado por:

$$V_u = K_e \gamma_y + 3 K_p \gamma_y \quad (4.35)$$

reemplazando  $K_e \gamma_y$  igual a  $V_y$ , en la ecuación 4.35, se tiene:

$$V_u = V_y \left( 1 + \frac{3 K_p}{K_e} \right) = 0.55 F_y d_c t \left( 1 + \frac{3.45 b_c t_{cf}^2}{d_b d_c t} \right) \quad (4.36)$$

donde:

$F_y$  = esfuerzo de fluencia obtenido de una prueba de tensión axial

$d_c$  = peralte de la columna

$t$  = espesor del alma de la columna

$b_c$  = ancho de la columna

$t_{cf}$  = espesor del patín de la columna

$d_b$  = peralte de la viga

#### 4.3.1.3 Cálculo de la resistencia

En el siguiente resumen se presentan los distintos valores de esfuerzo cortante que se utilizaron en el cálculo de la resistencia de los dispositivos disipadores, dichos valores se calcularon a partir de las propiedades mecánicas del acero con el que están fabricados (tabla 4.1).

$$\tau_y = 0.58 (F_y) = 2030 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\tau_{pr} = 0.80 (\tau_y) = 1624 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\tau_{ult} = 2.00 (\tau_y) = 4060 \text{ Kg/cm}^2 *$$

\* El factor de 2 que multiplica a  $\tau_y$ , se tomó de la Tabla 1 de Popov (1976)

En las tablas 4.7 y 4.8 se muestra la resistencia a cortante; obtenida mediante los dos criterios de la teoría clásica de placas; para cada uno de los disipadores ensayados, considerando que la placa que forma el alma se encuentra empotrada en los cuatro bordes. La tabla 4.9 muestra la resistencia a cortante, obtenida mediante la expresión propuesta por Krawinkler para uniones viga-columna.

**Tabla 4.7** Resistencia calculada mediante la formulación de Basler

Disipador	$t_w$ [cm]	$a$ [cm]	$b$ [cm]	$\alpha$	$k$	$b/t_w$	$\tau_{cr}^{red}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\tau_{ult}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$A_w$ [cm]	$V_u$ [t]	$V_p$ [t]
DPC-SA	0.75	29.70	26.97	1.10	13.60	35.96	5555.99	4060.00	20.23	82.12	41.06
DPC-AH	0.54	27.49	14.49	1.90	10.54	26.83	6554.01	4060.00	14.84	60.27	30.13
DPC-AV	0.39	29.85	13.08	2.28	10.06	33.54	5122.71	4060.00	10.58	42.97	21.48

**Tabla 4.8** Resistencia calculada mediante la formulación del Eurocódigo

Disipador	$t_w$ [cm]	$a$ [cm]	$b$ [cm]	$\alpha$	$k$	$b/t_w$	$\tau_{cr}^{red}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\tau_{ult}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$A_w$ [cm]	$V_u$ [t]	$V_p$ [t]
DPC-SA	0.75	29.70	26.97	1.10	13.60	35.96	2630.37	4060.00	20.23	53.21	41.06
DPC-AH	0.54	27.49	14.49	1.90	10.54	26.83	2693.51	4060.00	14.84	39.98	30.13
DPC-AV	0.39	29.85	13.08	2.28	10.06	33.54	2595.31	4060.00	10.58	27.47	21.48

**Tabla 4.9** Resistencia calculada mediante el método de Krawinkler

Disipador	$t$ [cm]	$d_c$ [cm]	$d_b$ [cm]	$b_c$ [cm]	$t_{cr}$ [cm]	$V_u$ [t]
DPC-SA	0.75	26.97	29.70	15.00	1.33	44.87
DPC-AH	0.54	27.49	14.49	15.00	1.33	40.74
DPC-AV	0.39	13.08	29.85	15.00	1.15	28.47

Con el fin de evaluar cual de los métodos empleados en el cálculo de la resistencia de los dispositivos disipadores es el que se aproxima al valor medido experimentalmente, se presentan en la tabla 4.10 los cocientes de resistencia teórica entre resistencia experimental para los tres métodos empleados.

Como se puede observar en la tabla, la resistencia calculada con la fórmula de Basler proporciona valores mayores a los medidos experimentalmente en todos los casos, estos valores se encuentran entre 33% y 54% por arriba del valor experimental. Los resultados obtenidos tanto con la fórmula del eurocódigo como con la de Krawinkler son ligeramente menores que el valor experimental. Así los valores calculados con la fórmula propuesta en el eurocódigo son entre 0% y 15% menores, mientras que los calculados mediante la fórmula de Krawinkler son entre 10% y 16% menores.

Dejando de lado la propuesta de Basler y analizando con más detalle las otras dos, se puede ver que los valores calculados con la expresión sugerida en el eurocódigo fueron los que mayor aproximación presentan, en todos los casos, a los valores experimentales; sin embargo, existe desviación entre los

valores calculados para uno y otro dispositivo. Por su parte, los valores calculados mediante la propuesta de Krawinkler, si bien resultaron ligeramente más alejados de los valores experimentales presentan una desviación estadística menor entre ellos. Esta mejor correlación del método de Krawinkler seguramente se debe a que este método toma en cuenta, además del espesor del panel, el espesor de los elementos que lo rodean como son patines y/o atiesadores.

**Tabla 4.10** Comparación de la resistencia teórica y experimental de los dispositivos disipadores.

Disipador	Resistencia [t]						
	Experi- mental	Basler		Eurocódigo		Krawinkler	
		Teórica	Teo/Exp	Teórica	Teo/Exp	Teórica	Teo/Exp
DPC-SA	53.41	82.12	1.54	53.21	1.00	44.87	0.84
DPC-AH	45.11	60.27	1.34	39.98	0.89	40.74	0.90
DPC-AV	32.38	42.97	1.33	27.47	0.85	28.47	0.88

### 4.3.2 RIGIDEZ

Los dispositivos disipadores de energía instalados en una estructura no solo cumplen con la función de disipar energía, si no también incrementan la rigidez lateral de la misma. En el caso de los disipadores en estudio, al estar conectados al marco mediante un sistema de contravientos excéntricos el incremento de rigidez que proporcionan es considerable.

#### 4.3.2.1 Rigidez inicial

En la tabla 4.11 se presenta la comparación de la rigidez inicial experimental con la teórica, la rigidez teórica se cálculo en la sección 0 y los valores experimentales se obtuvieron de la misma manera que para el conjunto marco-disipador, es decir tomando la rigidez secante inicial de la curva de capacidad de cada disipador.

**Tabla 4.11** Comparación de la rigidez inicial teórica y experimental de los dispositivos disipadores

Disipador	Rigidez inicial [t/cm]		
	Teórica	Experimental	Teórica/Experimental
DPC-SA	174.92	215.67	0.81
DPC-AH	159.02	172.71	0.92
DPC-AV	139.13	150.08	0.93

Al contrario de lo ocurrido en el caso del conjunto marco-disipador, se observa que los valores teóricos resultaron menores que los valores experimentales, aunque las diferencias en este caso resultan menores. Los valores teóricos calculados para los dispositivos DPC-AH y DPC-AV fueron los que más se cercaron a los valores experimentales, resultando en promedio 7.5% menores que estos últimos. Por su parte la rigidez teórica del dispositivo DPC-SA resultó 19% menor que el valor experimental, siendo ésta la mayor variación. De los resultados obtenidos para los dos disipadores con atiesador se ve que el modelo teórico utilizado brinda una aproximación bastante buena.

#### 4.3.2.2 Rigidez pico a pico

Para el cálculo de la rigidez pico a pico del disipador se aplicaron los mismos conceptos que para el conjunto marco-disipado, pero tomando como punto de partida la curva carga lateral-desplazamiento relativo del disipador.

El estudio de este parámetro permite evaluar la estabilidad de los ciclos histeréticos a través de la degradación de rigidez. Ruiz (2002) recomienda que en los disipadores que se vayan a usar en estructuras nuevas, o para reforzar estructuras dañadas, su rigidez pico a pico para un ciclo cualquiera no debe diferir en más del 15% de la rigidez pico a pico promedio para ese nivel de distorsión.

La degradación de la rigidez pico a pico del dispositivo DPC-SA para los distintos niveles de desplazamiento relativo, se presenta en la figura 4.36. En esta gráfica se puede ver que  $K_{pp}$  decrece abruptamente durante el primer patrón de desplazamiento ascendente, especialmente para distorsiones del disipador entre 0.8% y 2.0%. Durante el segundo y tercer patrón se aprecia gran disminución de  $K_{pp}$  respecto de los valores alcanzados previamente para distorsiones del disipador cercanas a 1.0%; para distorsiones mayores a 3.0% la curva muestra una tendencia asintótica, por lo que la variación de la rigidez con la distorsión resulta pequeña. La distorsión máxima a la que fue llevado el disipador fue de 4.5%, valor para el cual  $K_{pp}$  presenta una degradación de 89% del valor inicial.

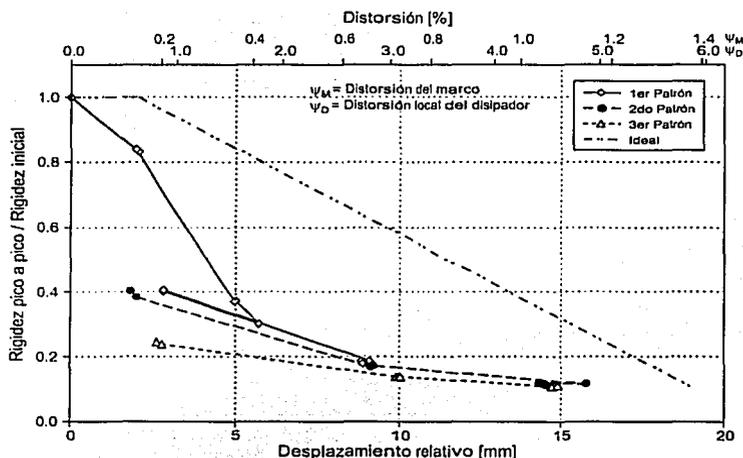


Figura 4.36 Degradación de rigidez pico a pico del dispositivo DPC-SA

La degradación de la rigidez pico a pico del dispositivo DPC-AH se presenta en la figura 4.37, a diferencia del anterior espécimen, en éste las curvas correspondientes a los tres patrones prácticamente se superponen, lo cual muestra que el disipador tuvo un comportamiento estable y homogéneo durante la prueba. La degradación de rigidez tiene una caída más suave, siguiendo una pendiente prácticamente constante para distorsiones del disipador entre 0% y 1.8%.

La forma asintótica de la curva no es tan marcada como en el dispositivo DPC-SA, aunque esta tendencia se empieza a notar a partir de distorsiones mayores a 4%. La degradación final de  $K_{pp}$  fue de 89% a una distorsión de 5.5%, es decir 1% mayor a la distorsión alcanzada por el dispositivo DPC-SA, lo cual es otra muestra del mejor comportamiento de este disipador.

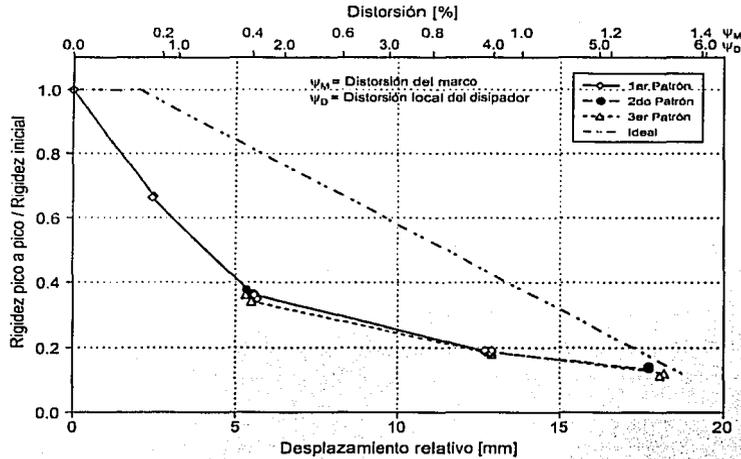


Figura 4.37 Degradación de rigidez pico a pico del dispositivo DPC-AH

La degradación de la rigidez pico a pico del dispositivo DPC-AV se presenta en la figura 4.38, se observa que los tres patrones presentan más o menos la misma tendencia; sin embargo, se aprecia que existe degradación de rigidez entre repeticiones sucesivas a un mismo nivel de distorsión, acentuándose esta situación en el tercer patrón.

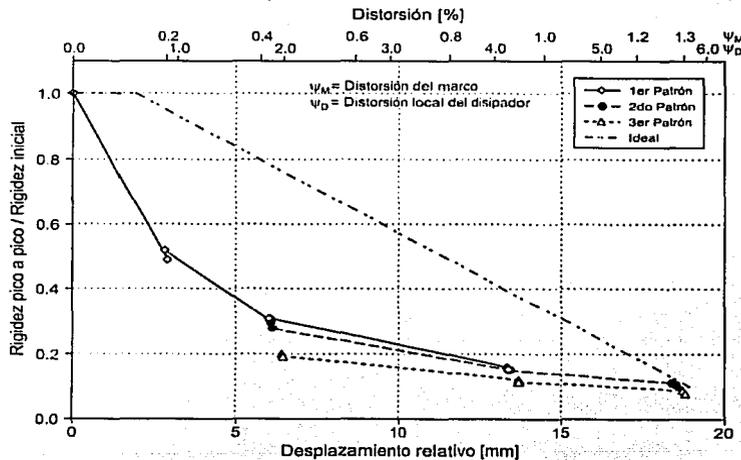


Figura 4.38 Degradación de rigidez pico a pico del dispositivo DPC-AV

En este dispositivo la mayor degradación de rigidez ocurre para distorsiones del dissipador menores a 0.8%, la curva también presenta una tendencia asintótica que es más notoria durante el tercer patrón, la degradación máxima de rigidez fue de un 92% respecto de  $K_0$ , a una distorsión de 5.8%.

Comparando las curvas experimentales con la curva que representa la degradación de rigidez pico a pico de un sistema elastoplástico, se observa que éstas se mantienen por debajo de la curva ideal para todo el intervalo de distorsiones. Es de interés mencionar que para el nivel de distorsión máxima al que se llevaron los modelos la curva ideal y la experimental prácticamente coinciden, situación que también ocurre en el caso del conjunto marco-dissipador. Observando el último tramo de las curvas experimentales se ve que la rigidez  $K_{pp}$  tiende a mantenerse sin mayor variación para distorsiones mayores a las consideradas en estas pruebas, cosa que no ocurre en el caso del modelo elastoplástico. Este hecho podría deberse a que el modelo empieza a incursionar en el intervalo de endurecimiento por deformación del acero componente, lo cual produce una recuperación en la rigidez y resistencia para niveles de distorsión mayores.

En la figura 4.39 se presenta la comparación de la rigidez pico a pico de los tres dispositivos durante el transcurso de la prueba, claramente el dispositivo DPC-SA presenta la mayor rigidez debido al mayor espesor de su alma. Los otros dos dispositivos presentan una rigidez más parecida, obviamente mayor para el dispositivo DPC-AH que tiene un alma más gruesa.

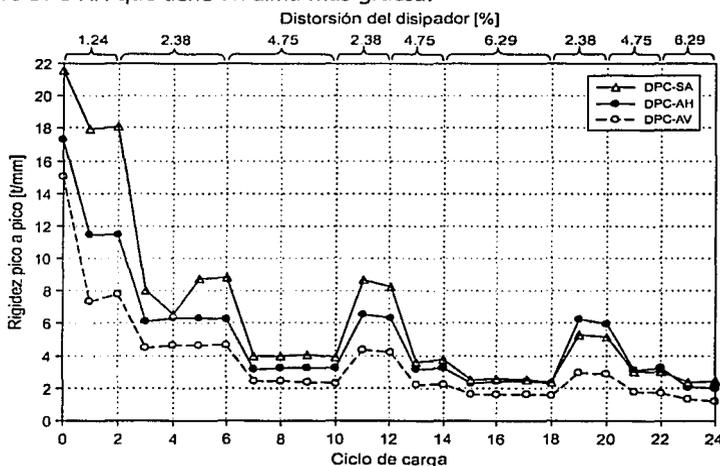


Figura 4.39 Comparación de la rigidez pico a pico de cada dissipador

Para poder comparar el comportamiento de cada dissipador se normalizó la rigidez pico a pico respecto de la rigidez inicial de cada espécimen y este valor se graficó en función del ciclo de carga, como puede verse en la figura 4.40. Durante los dos primeros ciclos los tres dissipadores presentan valores diferentes de degradación de rigidez normalizada, pero a partir del tercer ciclo los valores tienden a ser muy similares. Sin embargo, en la segunda mitad de la prueba se observan dos comportamientos diferentes; por una parte los dispositivos DPC-SA y DPC-AV presentan degradación de la rigidez pico a

pico respecto de los valores alcanzados durante la primera mitad de la prueba a un mismo nivel de desplazamiento mientras que el dispositivo DPC-AH presenta gran estabilidad y muy poca degradación de la rigidez pico a pico normalizada.

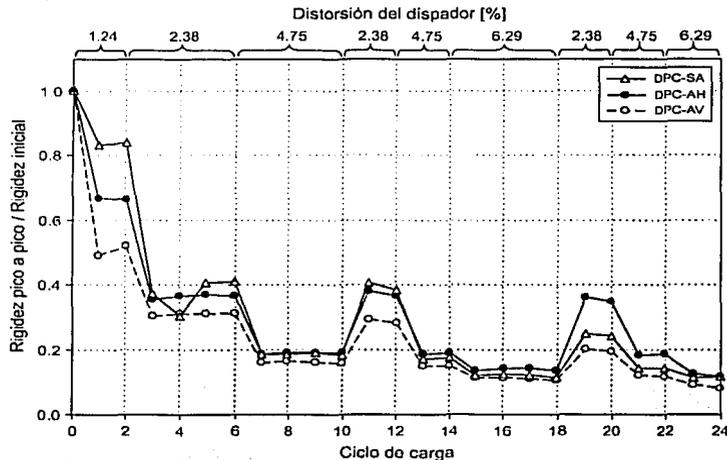


Figura 4.40 Comparación de la degradación de rigidez pico a pico de cada disipador

Con el fin de evaluar la estabilidad de las curvas de histéresis de los dispositivos, se calculó para cada uno de ellos el promedio de los valores de  $K_{pp}$  obtenidos a un mismo nivel de distorsión, por ejemplo el promedio de  $K_{pp}$  para una distorsión de 2.38% resultó de promediar los valores obtenidos en los ciclos 3, 4, 5, 6, 11, 12, 19 y 20.

Analizando las mayores variaciones de rigidez  $K_{pp}$  del dispositivo DPC-SA, con respecto del promedio para un mismo nivel de distorsión, se ve que para una distorsión de 2.38%, durante los ciclos 5, 6 y 11  $K_{pp}$  tiene valores 17% por encima del valor promedio, mientras que en los ciclos 19 y 20  $K_{pp}$  tiene valores 30% por debajo del valor promedio. Para una distorsión de 4.75%, en los ciclos 21 y 22  $K_{pp}$  muestra valores 18% menores que el valor promedio. Todos estos valores quedaron fuera del límite sugerido por Ruiz (2002).

Por su parte, el dispositivo DPC-AV durante la primera mitad presenta variaciones de  $K_{pp}$  del orden de 8% respecto del promedio para cada nivel de desplazamiento, encontrándose dentro del límite recomendado de 15%. Sin embargo, durante los últimos seis ciclos excede dicho límite, siendo la variación máxima de  $K_{pp}$  respecto del valor promedio para distorsiones de 2.38%, 4.75% y 6.29% de 29%, 20% y 21% respectivamente, todas superiores al límite mencionado por Ruiz (2002).

Desde el punto de vista de este apartado, el dispositivo DPC-AH fue el que mostró mejor comportamiento, sobre todo bastante estabilidad de sus lazos de histéresis ante las diferentes incursiones del modelo a un mismo nivel de desplazamiento. Así, para distorsiones de 2.38% y 4.75% presenta variaciones de  $K_{pp}$  entre 0% y 5% del valor promedio, variación que con el grado de daño se

va incrementando ligeramente durante los ciclos en que se llevó el disipador a una distorsión de 6.29%, en los cuales  $K_{pp}$  tiene valores que difieren del promedio entre 2% y 7%, excepto en el ciclo 24 donde  $K_{pp}$  presenta una degradación de 12% respecto del valor promedio. En este modelo se cumple para todos los niveles de distorsión la disposición de degradación de rigidez pico a pico que establece Ruiz (2002).

### 4.3.3 CURVAS DE CAPACIDAD

En la figura 4.41 se presentan las curvas de capacidad tanto experimentales como teóricas para el dispositivo disipador solo. Las curvas experimentales se obtuvieron siguiendo la misma metodología empleada para el conjunto marco-disipador, mientras que las teóricas se construyeron a partir de la rigidez y resistencia teórica de cada dispositivo disipador. Por la misma razón explicada en el caso del conjunto marco-disipador, la resistencia máxima que muestran las curvas de capacidad no corresponde a la resistencia máxima tabulada en la tabla 4.10.

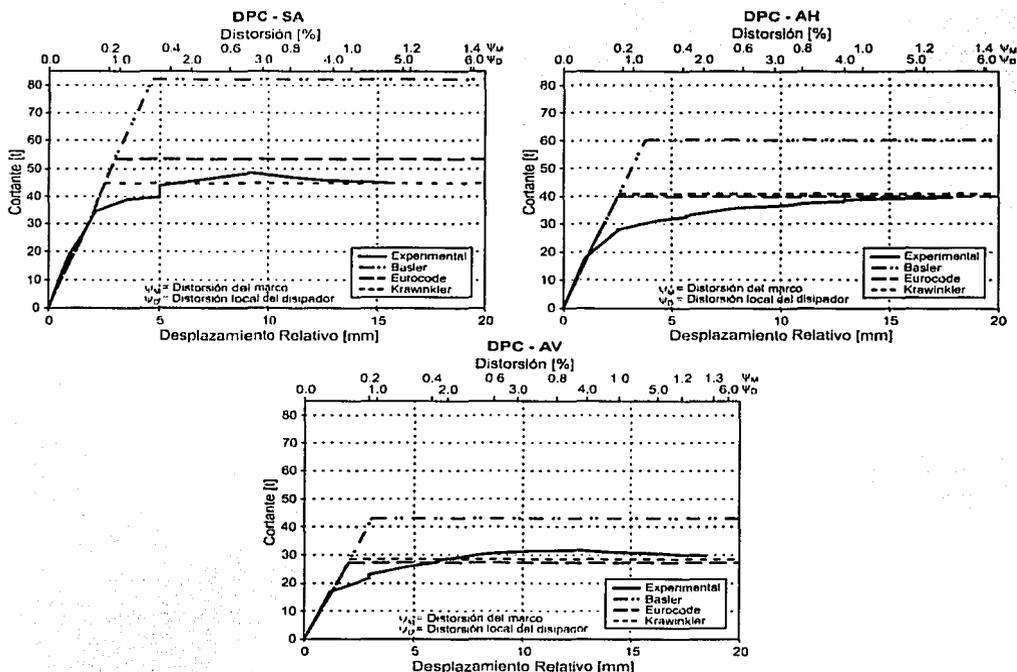


Figura 4.41 Curvas de capacidad teóricas y experimentales de los tres dispositivos

Las curvas experimentales de los tres dispositivos tienen formas similares, existiendo mayor parecido entre las curvas de los dispositivos DPC-SA y DPC-AV, las cuales presentan la resistencia máxima a una distorsión aproximada del disipador de 3%, a partir de ese punto la resistencia decae levemente. En el caso del dispositivo DPC-AH la resistencia máxima se alcanza en el punto de distorsión máxima

(5.5%), por lo que este espécimen no muestra patrón de rigidez negativa en la envolvente a grandes distorsiones.

Las curvas teóricas sirven para comparar gráficamente la aproximación en el cálculo de la resistencia que proporciona cada uno de los tres criterios utilizados. Como se mencionó anteriormente, se ve claramente que la expresión propuesta por Basler reporta valores muy superiores al experimental mientras que la expresión propuesta por Krawinkler es la que mejor se aproxima en todos los casos.

A fin de poder comparar las curvas de capacidad de los tres dispositivos se normalizó la carga lateral en función del espesor de la placa que forma el alma del dissipador, las curvas resultantes se presentan en la figura 4.42. En ella se puede apreciar que los dispositivos DPC-SA y DPC-AH tienen un comportamiento similar en resistencia y rigidez hasta una distorsión del dissipador de 2.75%, a partir de ese punto el primer dispositivo presenta rigidez negativa en la envolvente, mientras que el segundo presenta rigidez positiva hasta el final, esta diferencia seguramente se debe a la presencia del atiesador horizontal en este ultimo. El dispositivo DPC-AV tiene una rigidez inicial parecida a los otros dos pero alcanza una resistencia normalizada mayor, probablemente debido más a una sobre resistencia en el acero que a la presencia del atiesador vertical.

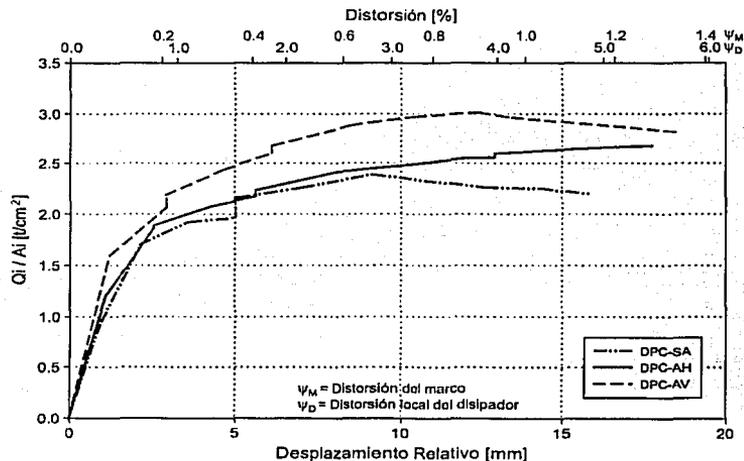


Figura 4.42 Comparación de las curvas de capacidad experimentales normalizadas de cada dispositivo

#### 4.3.4 DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Para cada dispositivo se graficó la energía disipada normalizada por ciclo contra el desplazamiento relativo o distorsión del dissipador, se presenta de manera separada el comportamiento que tuvieron los dispositivos durante las tres fases o patrones de desplazamiento ascendente. El concepto de normalizado es similar al empleado anteriormente para analizar el comportamiento del conjunto marco-dissipador

En la figura 4.43 se muestran los tres patrones correspondientes al dispositivo DPC-SA, se observa que al inicio de la prueba cuando no existe daño en el disipador, la capacidad de disipar energía del mismo es muy reducida para distorsiones del disipador menores al 1%. A medida que la distorsión aumenta la energía disipada se incrementa rápidamente hasta llegar a un máximo, que se presenta a una distorsión cercana al 3%.

Durante el segundo patrón de desplazamiento ascendente, la energía disipada se reduce a un 90% del valor máximo, además su variación con la distorsión es menor. En el tercer patrón ascendente, producto del daño que va acumulando el disipador, la cantidad de energía disipada para una distorsión cercana al 3% es del orden del 75% del valor máximo. Ambos patrones muestran una clara tendencia a perder capacidad de disipar energía conforme se incrementa la distorsión del disipador y presentan la característica de disipar gran cantidad de energía a bajas distorsiones (< 1%), a diferencia de lo que ocurre durante el primer patrón.

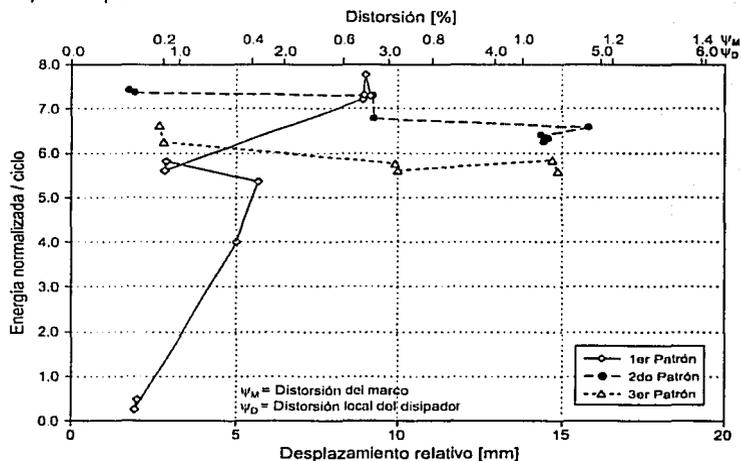


Figura 4.43 Energía disipada por ciclo para el dispositivo DPC-SA

La figura 4.44 muestra el comportamiento del disipador DPC-AH, el cual es muy diferente al comportamiento del anterior espécimen. Este dispositivo comienza a disipar energía a niveles de distorsión bajos; así, para una distorsión de 0.75% disipa alrededor de seis veces más energía que el dispositivo DPC-SA.

El incremento de la energía disipada con la distorsión es más pronunciado por debajo de una distorsión de 1.7%, mientras que por arriba de este valor la pendiente de la curva disminuye y se mantiene prácticamente constante para todos los valores. Debido a esta tendencia, la mayor cantidad de energía disipada se alcanza la primera vez que el dispositivo llega a la distorsión máxima. En las repeticiones sucesivas que se hicieron para un mismo nivel de distorsión, aunque existe, el dispositivo presenta en general muy poca pérdida en su capacidad de disipar energía, presentándose las mayores pérdidas para distorsiones mayores al 4%. Así, el disipador muestra una reducción del 8% en la

cantidad de energía disipada durante el último ciclo en que se llegó a la distorsión máxima respecto de la del primer ciclo.

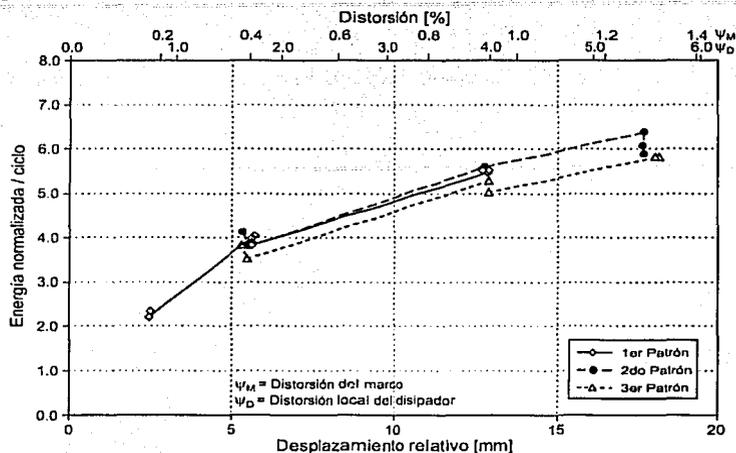


Figura 4.44 Energía disipada por ciclo para el dispositivo DPC-AH

La figura 4.45 muestra el comportamiento del dissipador DPC-AV, este dispositivo fue el que mayor cantidad de energía disipó a pequeñas distorsiones. Para una distorsión del dissipador de 0.75% disipó ocho veces más energía que el dispositivo DPC-SA y 1.3 veces más que el dispositivo DPC-AH. El comportamiento que presentó fue muy similar al de éste último, mostrando una pendiente casi uniforme para todo el intervalo de distorsiones.

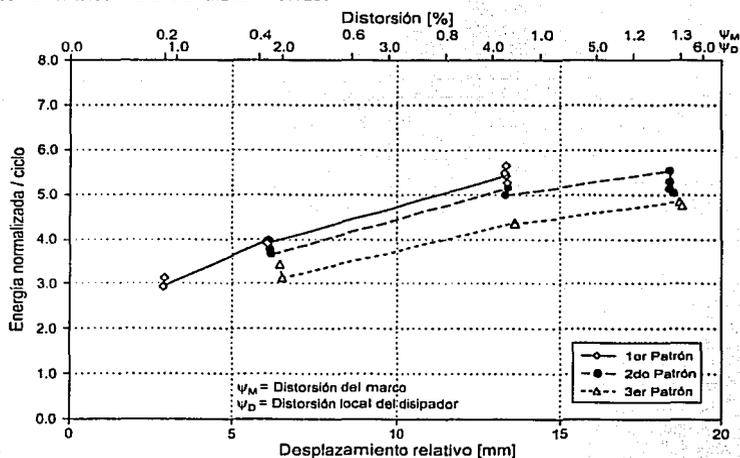


Figura 4.45 Energía disipada por ciclo para el dispositivo DPC-AV

La máxima energía disipada por ciclo se logró al finalizar el primer patrón de desplazamiento ascendente. A diferencia del anterior espécimen, éste presenta una mayor reducción en la cantidad de

energía que disipa durante el tercer patrón de desplazamiento ascendente. La mayor reducción o degradación ocurre para una distorsión de 4.2%, donde existe una reducción del orden del 23% del valor máximo para este mismo nivel de distorsión, durante el tercer patrón.

En la figura 4.46 se presenta la variación de la energía disipada normalizada acumulada durante el transcurso de la prueba para los tres dispositivos, la cantidad de energía disipada al final de la misma fue prácticamente igual para los dispositivos DPC-AH y DPC-AV, mientras que el dispositivo DPC-SA fue el que mayor energía disipó.

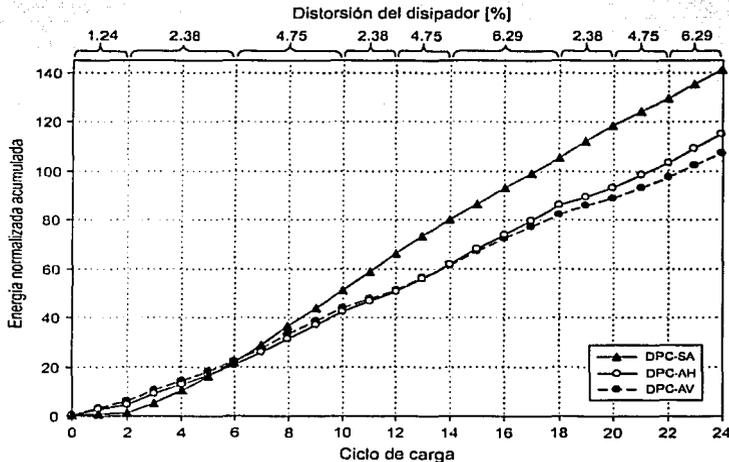


Figura 4.46 Comparación de la energía disipada acumulada de cada dispositivo

En esta figura se observa que durante los primeros ciclos, la energía disipada por el dispositivo DPC-SA fue ligeramente menor que la de los otros dos dispositivos, pero a partir del ciclo 7, y hasta el final de la prueba, la cantidad de energía que disipa se va incrementando con relación a la disipada por los otros dos especímenes. El comportamiento y la cantidad de energía que disipan los dispositivos DPC-AH y DPC-AV son muy similares, con un ligero incremento, a partir del ciclo 18, en la energía disipada por el dispositivo DPC-AH. La energía normalizada acumulada al final de la prueba por los dispositivos DPC-SA, DPC-AH y DPC-AV fue de 141.1, 114.9 y 107.1 respectivamente.

#### 4.3.5 DUCTILIDAD

La ductilidad de los disipadores se calculó a partir de sus curvas de capacidad, el procedimiento que se utilizó fue similar al que se empleó para el conjunto marco-disipador, con la diferencia de que el desplazamiento último corresponde al desplazamiento máximo que se registró durante los ciclos de carga que se tomaron en cuenta para el análisis, y no está asociado a una reducción del 20% en la resistencia, aunque dicho desplazamiento no se encuentra muy alejado. En la tabla 4.12 se presentan los valores de ductilidad obtenidos para los tres disipadores.

Tabla 4.12 Valores de ductilidad de los dispositivos disipadores

Disipador	$F_y$ [t]	$d_y$ [cm]	$d_u$ [cm]	$\mu$
DPC-SA	43.979	0.204	1.580	7.75
DPC-AH	35.363	0.205	1.776	8.67
DPC-AV	28.833	0.192	1.843	9.59

El dispositivo que más ductilidad mostró fue el DPC-AV y el que menos fue el DPD-SA, lo cual resulta lógico al tratarse de los dispositivos que tienen el alma más delgada y más gruesa respectivamente.

### 4.3.6 AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE

En la figura 4.47 se muestra la variación del amortiguamiento viscoso equivalente para los tres dispositivos a lo largo de toda la prueba, en la misma se pueden identificar claramente dos tipos de comportamientos.

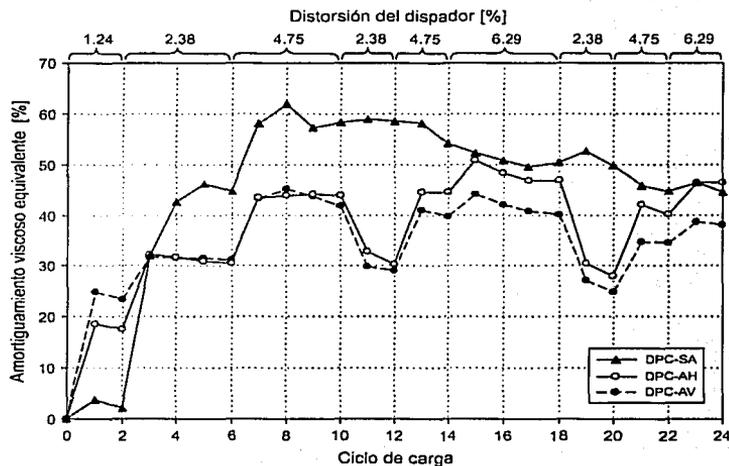


Figura 4.47 Comparación del amortiguamiento viscoso equivalente de cada dispositivo

El primer comportamiento es el mostrado por el dispositivo DPC-SA, el cual en los dos primeros ciclos de la prueba a una distorsión del disipador de 1.24% tiene un amortiguamiento inferior al 4%, a partir del tercer ciclo, y conforme la distorsión del disipador se incrementa, el amortiguamiento también crece hasta alcanzar un máximo de 62% en el ciclo 8 durante la segunda repetición a una distorsión de 4.75%. En los subsiguientes cinco ciclos el amortiguamiento se mantiene casi constante a un valor de 58%. Del ciclo 14 en adelante el amortiguamiento presenta una tendencia descendente que se muestra independiente del nivel de distorsión a que está sometido el disipador.

Los dispositivos DPC-AH y DPC-AV presentan un comportamiento muy similar y, a diferencia del otro espécimen, muestran valores de amortiguamiento bastante grandes desde el inicio de la prueba. Así

para una distorsión de 1.24%, el amortiguamiento suministrado por estos disipadores es de 18% y 24% respectivamente. Otra diferencia que presentan estos especímenes con respecto al dispositivo DPC-SA es la clara influencia de la distorsión en el amortiguamiento, a mayor distorsión tiende a observarse mayores valores de amortiguamiento. El amortiguamiento máximo proporcionado por los dispositivos DPC-AH y DPC-AV fue de 51% y 45% respectivamente, alcanzado a una distorsión de 6.29% en el primero y de 4.75% en el segundo. Observando los ciclos en los cuales se llevó al disipador a un mismo nivel de distorsión, se ve que el amortiguamiento casi siempre es mayor durante la primera incursión a un nivel de distorsión, mostrando una ligera tendencia a disminuir durante las repeticiones posteriores al mismo nivel de distorsión.

En la tabla 4.13 se presentan los valores de amortiguamiento viscoso equivalente para el marco solo, DPC solo y conjunto marco disipador. Solamente se tabularon los valores correspondientes a los primeros ciclos de cada repetición a un mismo nivel de distorsión, por considerarse que el comportamiento de los dispositivos se estabilizó en los ciclos subsiguientes, no mostrando mayor variación del amortiguamiento viscoso equivalente.

Para el tipo de marco utilizado, el cual presenta gran flexibilidad lateral, se puede ver que en general el amortiguamiento viscoso equivalente del conjunto marco-disipador se debe prácticamente en su totalidad al amortiguamiento suministrado por el dispositivo disipador de energía, el cual influye de manera significativa en el comportamiento del conjunto. Esta situación se puede apreciar con mayor claridad al comparar los valores de amortiguamiento viscoso equivalente del modelo reforzado con el dispositivo DPC-SA; así, observando los ciclos 3 y 4 o 7 y 8, se ve por una parte que el amortiguamiento del marco solo disminuye mientras que el amortiguamiento del DPC aumenta, dada la gran influencia de este último el amortiguamiento viscoso equivalente del conjunto marco-disipador también aumenta.

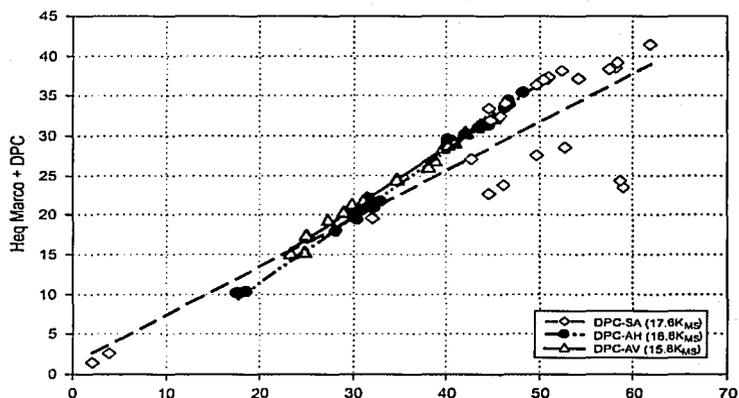


Figura 4.48 Relación entre el Heq del DPC solo y Heq del conjunto marco + DPC

Tabla 4.13 Comparación de los valores de Heq entre el modelo Marco + DPC y DPC solo

No. Ciclo	Distorsión del marco [%]	Modelo	Amortiguamiento viscoso equivalente [%]		
			Marco Solo	DPC	Marco + DPC
1	0.25	SA	0.4	3.8	2.6
		AH		18.6	10.3
		AV		24.8	15.4
2	0.25	SA	0.2	2.0	1.4
		AH		17.5	10.1
		AV		23.3	15.1
3	0.48	SA	1.1	31.9	19.5
		AH		32.1	20.9
		AV		31.8	22.0
4	0.48	SA	0.7	42.7	27.1
		AH		31.8	21.0
		AV		31.5	22.1
7	0.96	SA	2.8	58.0	38.5
		AH		43.5	31.0
		AV		43.2	31.1
8	0.96	SA	1.6	61.8	41.4
		AH		43.9	31.4
		AV		45.0	32.3
11	0.48	SA	1.0	58.9	23.4
		AH		32.8	21.6
		AV		29.9	21.4
13	0.96	SA	2.0	58.1	39.2
		AH		44.6	31.2
		AV		40.9	29.1
15	1.27	SA	5.0	52.3	38.2
		AH		50.7	37.0
		AV		44.2	31.8
16	1.27	SA	4.8	50.9	37.3
		AH		48.2	35.4
		AV		42.0	30.4
19	0.48	SA	1.7	52.6	28.5
		AH		30.5	19.5
		AV		27.2	19.4
21	0.96	SA	3.1	45.8	32.4
		AH		42.0	30.2
		AV		34.7	24.6
23	1.27	SA	4.5	46.3	34.1
		AH		46.3	33.5
		AV		38.6	26.9

En la figura 4.48 se graficaron los valores de amortiguamiento viscoso equivalente del conjunto marco-disipador contra los del disipador solo, en esta figura se puede ver que la influencia del disipador en el amortiguamiento del marco es prácticamente constante para todos los valores, en especial para los dispositivos DPC-AH y DPC-AV, los cuales además presentan una influencia similar, pese a que los modelos tenían una rigidez inicial ligeramente diferente. Esta similitud se observa claramente al comparar las rectas de ajuste lineal de ambos modelos, las cuales prácticamente se superponen. En el modelo reforzado con el DPC-SA, la influencia de éste no es constante, en especial para valores de amortiguamiento grandes; sin embargo, la pendiente de su recta de ajuste lineal no difiere en gran medida de la pendiente de las rectas de ajuste lineal de los otros dos modelos.

#### 4.4 COMPORTAMIENTO EN CONDICIONES DE SERVICIO

A fin de comparar la influencia que tuvieron los distintos dispositivos disipadores en el marco original para el nivel de desempeño de servicio, que propone el Apéndice A de las NTCS (2002), se analizaron tres parámetros que son: la cantidad de energía disipada, la variación de la rigidez pico a pico y el amortiguamiento viscoso equivalente.

Para comparar la cantidad de energía disipada se utilizó los valores de energía disipada normalizada por ciclo, calculada en la sección 4.3.4. A partir de los valores de energía correspondientes a cada uno de los niveles de desplazamiento lateral a los que se llevaron los modelos, se realizó para cada modelo una regresión mediante el método de mínimos cuadrados, con el fin de ajustar los datos medidos a una curva de segundo grado, que fue la que mejor correlación mostró. En la figura 4.49 se presenta la curva de regresión obtenida para cada uno de los modelos ensayados, además a manera de referencia también se muestra el ajuste lineal que corresponde a cada conjunto de datos.

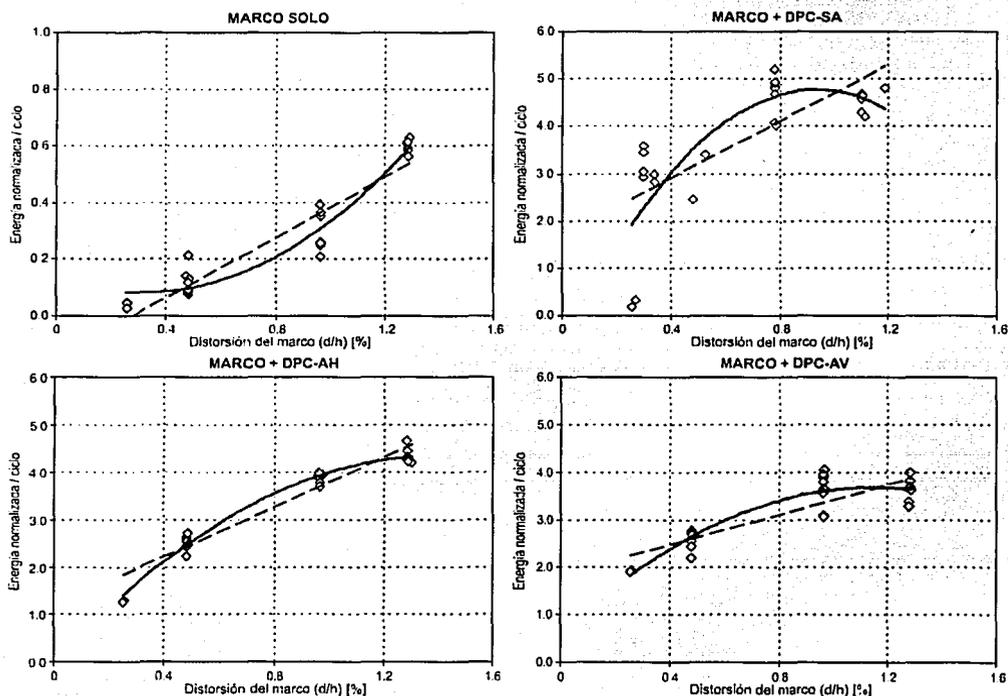


Figura 4.49 Ajuste de los datos de energía normalizada por ciclo

Una vez obtenidas las curvas de segundo orden que representan la variación de la energía disipada en función del desplazamiento lateral o de la distorsión de entrepiso (figura 4.50), se pudo analizar el

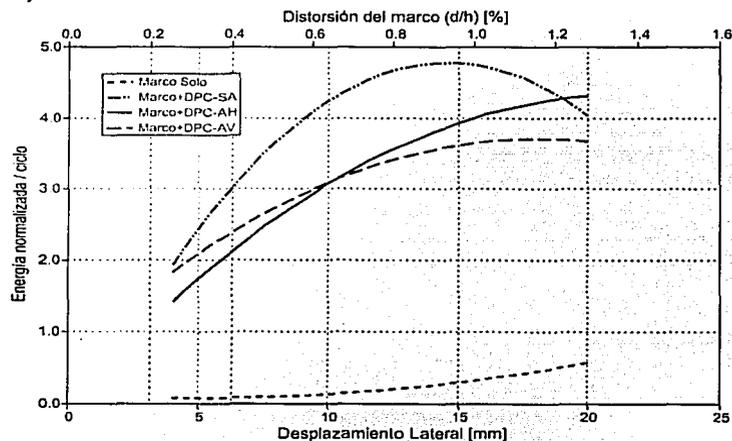
comportamiento de los modelos para el nivel de desempeño de servicio, el cual, como se mencionó al principio del capítulo, está definido por una distorsión de entrepiso de 0.2% para estructuras con muros ligados y de 0.4% para estructuras con muros desligados.

En la tabla 4.14 se presentan los valores de energía disipada normalizada durante un ciclo completo para los dos niveles de distorsión del marco que definen el nivel de desempeño de servicio.

**Tabla 4.14** Energía disipada normalizada para el nivel de desempeño de servicio

Modelo	Energía disipada normalizada	
	$\psi_M = 0.2\%$	$\psi_M = 0.4\%$
Marco Solo	0.09	0.09
Marco + DPC-SA	1.44	3.02
Marco + DPC-AH	1.12	2.12
Marco + DPC-AV	1.59	2.39

Como se puede apreciar, para ambos niveles de distorsión existe un notable incremento en la energía disipada por los modelos reforzados con disipadores respecto de la energía que disipó el marco solo, que además fue la misma para los dos niveles de distorsión. Como era lógico de suponer, los modelos reforzados con disipadores disiparon mayor energía a una distorsión de 0.4%, siendo el modelo con el dispositivo DPC-SA el que más energía disipó a este nivel de distorsión, mientras que el modelo con el dispositivo DPC-AV fue el que presentó mayor capacidad de disipar energía para una distorsión de 0.2% (figura 4.49).



**Figura 4.50** Variación de la energía normalizada por ciclo (curvas ajustadas)

Para poder comparar la variación de la rigidez pico a pico que experimentaron los cuatro modelos, se ajustaron los datos obtenidos en la sección 4.2.1.4, el ajuste se realizó mediante el método de mínimos cuadrados, obteniéndose como mejor curva de ajuste un polinomio de tercer grado. En la

figura 4.51 se presentan las curvas ajustadas para cada uno de los modelos ensayados; además, a manera de referencia también se muestra el ajuste lineal que corresponde a cada conjunto de datos.

Las curvas de tercer grado correspondientes a los cuatro modelos se presentan en la figura 4.52, en ella se puede ver que el comportamiento que exhiben los modelos es muy similar en forma aunque evidentemente la degradación que sufre la rigidez pico a pico es mucho más rápida en los modelos reforzados con los dispositivos disipadores producto del daño, por cortante, a niveles de distorsión bajos.

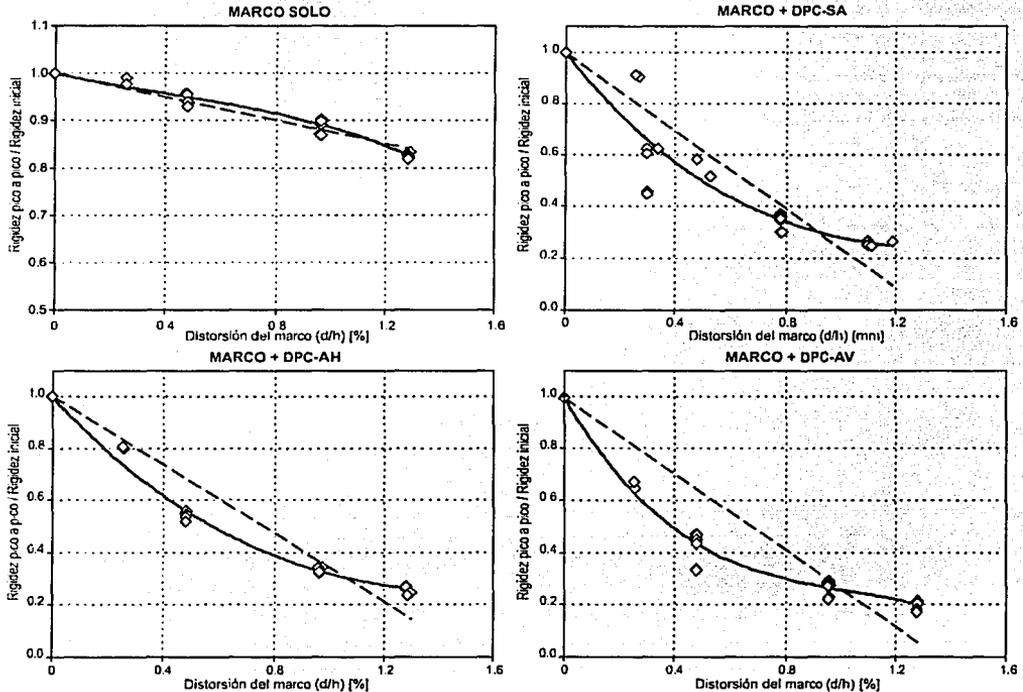


Figura 4.51 Ajuste de los datos de rigidez pico a pico

En la tabla 4.15 se presenta el valor que tiene la rigidez pico a pico respecto de la rigidez inicial para los niveles de distorsión que establece el nivel de desempeño de servicio. La rigidez pico a pico del marco solo muestra una mínima degradación para ambos niveles de distorsión mientras que los modelos reforzados con los disipadores muestran mayor degradación de la rigidez pico a pico para una distorsión de 0.4%, debido a que a este nivel de distorsión los modelos con DPC ya tienen incursión en la inelásticidad. Para ambos niveles de distorsión el marco con el dispositivo DPC-AH es el que presenta menor degradación de los tres modelos reforzados, con una degradación ligeramente mayor se ubica a continuación el modelo reforzado con el dispositivo DPC-SA y finalmente con una degradación un poco mayor el modelo con el dispositivo DPC-AV (figura 4.52).

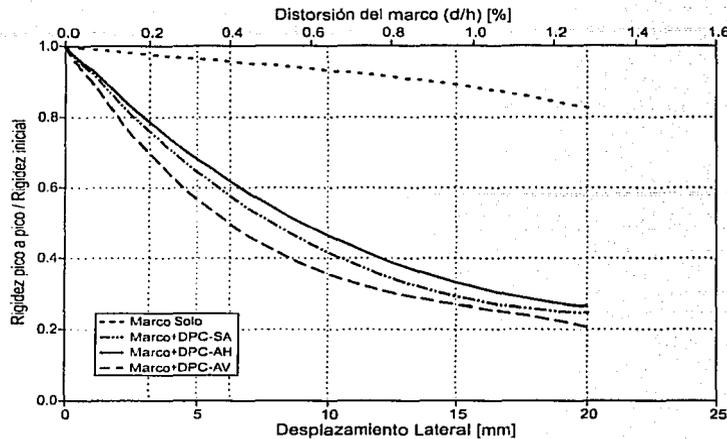


Figura 4.52 Variación de la rigidez pico a pico (curvas ajustadas)

Tabla 4.15 Rigidez pico a pico para el nivel de desempeño de servicio

Modelo	Rigidez pico a pico / Rigidez Inicial	
	$\psi_M = 0.2\%$	$\psi_M = 0.4\%$
Marco Solo	0.98	0.96
Marco + DPC-SA	0.76	0.58
Marco + DPC-AH	0.79	0.62
Marco + DPC-AV	0.70	0.50

La estabilidad que presentan los lazos de histéresis de cada uno de los modelos ensayados, se evaluó mediante el cálculo de la desviación media de la rigidez pico a pico para un nivel de desplazamiento, dicho parámetro proporciona una medida de la dispersión de los valores de  $K_{pp}$  respecto del valor promedio para cada nivel de distorsión. Los niveles de distorsión para los cuales se realizó el cálculo fueron los correspondientes a desplazamientos laterales de 4, 7.5, 15 y 20 mm. Posteriormente con el propósito de conocer la tendencia que presentaban estos datos, se ajustaron a una curva de tercer grado mediante el método de mínimos cuadrados. Las curvas correspondientes a los cuatro modelos del ajuste de los valores de desviación media calculados se muestran en la figura 4.53.

De la figura 4.53 se puede observar que el modelo que presentó mayor desviación media y por consiguiente mayor inestabilidad en los ciclos de histéresis fue el marco reforzado con el dispositivo DPC-SA; a continuación, y también con una desviación bastante grande estuvo el modelo reforzado con el dispositivo DPC-AV; finalmente, el modelo reforzado con el dispositivo DPC-AH fue el que menos desviación media mostró, la cual resultó similar a la del marco solo. Las curvas muestran que la tendencia de mayor inestabilidad se presenta entre 0.4% y 0.8% de distorsión.

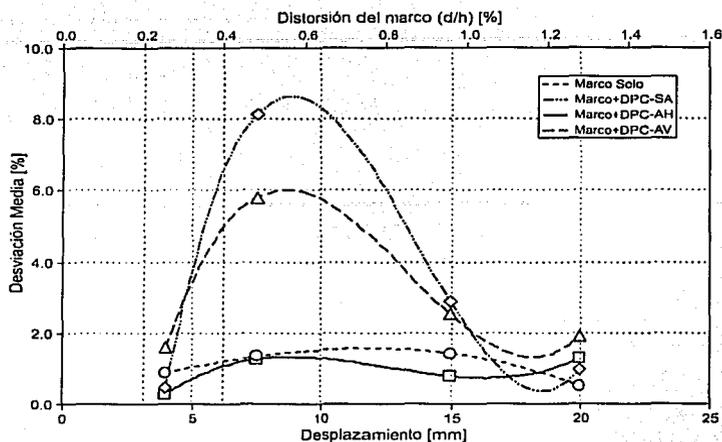


Figura 4.53 Estabilidad de la rigidez pico a pico

Para 0.4% de distorsión el modelo marco solo y los reforzados con los dispositivos DPC-SA, DPC-AH y DPC-AV tuvieron una desviación media de 0.95%, 5.28%, 0.85% y 4.0% respectivamente, lo cual muestra claramente que el dispositivo DPC-AH es el que presentó el comportamiento más estable para el nivel de desempeño de servicio.

Finalmente, se calculó el amortiguamiento viscoso equivalente que tuvieron los modelos en condiciones de servicio, dicho cálculo se realizó de la misma manera que para los otros parámetros, pero debido a que las curvas que se obtuvieron son iguales en forma a las de energía disipada normalizada no se muestran, presentándose directamente en la tabla 4.16 los valores calculados.

Tabla 4.16 Amortiguamiento viscoso equivalente para el nivel de desempeño de servicio

Modelo	Amortiguamiento viscoso equiv. [%]	
	$\psi_M = 0.2\%$	$\psi_M = 0.4\%$
Marco Solo	0.8	0.8
Marco + DPC-SA	11.5	24.1
Marco + DPC-AH	8.9	16.7
Marco + DPC-AV	12.6	18.8
Incremento Promedio DPC	10.2	19.1

De los resultados obtenidos se aprecia que para los niveles de distorsión en estudio, el marco solo tiene un amortiguamiento viscoso equivalente muy pequeño ( $<1\%$ ), el mismo que se incrementa con la adición de los dispositivos disipadores. Al igual que lo observado en los anteriores parámetros se ve que los disipadores tienen una mayor influencia para el caso de estructuras con muros desligados donde las distorsiones aceptadas son mayores, así tenemos que el amortiguamiento que muestran los

modelos reforzados a una distorsión de 0.4% es aproximadamente el doble del amortiguamiento que tuvieron a 0.2% de distorsión. La contribución promedio que proporciona el uso de DPC al amortiguamiento viscoso equivalente resulta del orden de 10% y 20% para las condiciones de servicio consideras en este estudio.

#### 4.5 COMPORTAMIENTO A LA FALLA

Si bien al inicio del capítulo se mencionó que el nivel de desempeño de falla que se manejaría en este estudio estaba asociado a una distorsión de entrepiso de 1.5% conforme establece el Apéndice A de la propuesta de las NTCS (2002), se vio por conveniente utilizar una distorsión de 1.3% como punto de falla para los modelos probados, debido a que en el ciclo de carga correspondiente a una distorsión de 1.5% o más, se observó que éstos mostraron un comportamiento inestable.

La comparación del comportamiento de los diferentes modelos se realizó mediante los mismos parámetros que se usaron para evaluar el comportamiento en condiciones de servicio, dichos parámetros se calcularon sobre la base de las curvas de tendencia obtenidas en la sección anterior por lo que aquí se presentan directamente los valores obtenidos.

En la tabla 4.17 se presentan los valores de energía disipada normalizada (figura 4.50) para un ciclo completo a una distorsión de 1.3%, en la misma se puede ver que los modelos reforzados con los dispositivos disipadores siguen disipando mayor energía que el marco solo. Para este nivel de desempeño el modelo reforzado con el dispositivo DPC-AH y el reforzado con el DPC-AV fueron los que mayor y menor cantidad de energía disiparon respectivamente; el primero disipó aproximadamente el doble de la energía que disipó en el otro nivel de desempeño (servicio). En los otros dos modelos el incremento de la cantidad de energía disipada respecto del anterior nivel de desempeño no fue muy grande, especialmente en el modelo reforzado con el dispositivo DPC-SA, el cual además presenta una tendencia a perder su capacidad de disipar energía conforme es sometido a mayores distorsiones. Por su parte el modelo reforzado con el dispositivo DPC-AH muestra una tendencia ascendente mientras que el modelo reforzado con el dispositivo DPC-AV muestra una tendencia asintótica al valor alcanzado en este nivel de desempeño.

**Tabla 4.17** Energía disipada normalizada para el nivel de desempeño de falla

Modelo	Energía disipada normalizada $\psi_M = 1.3\%$
Marco Solo	0.60
Marco + DPC-SA	3.93
Marco + DPC-AH	4.32
Marco + DPC-AV	3.66

Los valores de rigidez pico a pico (figura 4.52) se presentan en la tabla 4.18, el modelo del marco solo presenta poca degradación mientras que en los otros tres modelos la degradación de  $K_{pp}$  respecto de

la rigidez inicial es superior al 70%, que es un nivel de degradación de rigidez típico en sistemas estructurales de materiales pétreos: mamposterías, concretos y la combinación de los mismos.

Los modelos reforzados con los dispositivos DPC-SA y DPC-AH presentan una degradación similar, mientras que el modelo reforzado con el dispositivo DPC-AV es el que mayor degradación presentó. A este nivel de distorsión y para distorsiones mayores la rigidez pico a pico de todos los modelos tiende a mantenerse sin mucha variación.

**Tabla 4.18** Rigidez pico a pico para el nivel de desempeño de falla

Modelo	Rigidez pico a pico / Rigidez inicial $\psi_M = 1.3\%$
Marco Solo	0.82
Marco + DPC-SA	0.24
Marco + DPC-AH	0.26
Marco + DPC-AV	0.20

La desviación media (figura 4.53) de  $K_{PP}$  para los cuatro modelos (marco solo, marco + DPC-SA, marco + DPC-AH y marco + DPC-AV) fue de 0.00%, 0.94%, 0.92% y 1.68% respectivamente, se puede ver que el marco solo y el reforzado con el dispositivo DPC-AH tuvieron una desviación media similar a la del anterior nivel de desempeño, mientras los otros dos modelos presentan desviaciones menores, lo que muestra que tuvieron ciclos histeréticos más estables a este nivel de desempeño. En general, se puede apreciar que la tendencia que muestran los modelos es a presentar mayor estabilidad para este nivel de distorsión, lo cual podría atribuirse a que el daño acumulado por los dispositivos, pese a ser de consideración, tiende a mantenerse con poca variación ante repeticiones sucesivas de carga.

En la tabla 4.19 se presenta el amortiguamiento viscoso equivalente que tuvieron los modelos ensayados en el estado límite de falla. El modelo reforzado con el dispositivo DPC-AH fue el que mayor amortiguamiento desarrolló, aunque los otros dos modelos con disipadores presentan valores de amortiguamiento muy similares. En general se puede decir que al momento de la falla los modelos con disipadores generaron un amortiguamiento seis veces superior al desarrollado por el marco solo y que la contribución promedia al amortiguamiento viscoso equivalente que proporciona el uso de DPC es del orden de 25%.

**Tabla 4.19** Amortiguamiento viscoso equivalente para el nivel de desempeño de falla

Modelo	Amortiguamiento viscoso equivalente [%] $\psi_M = 1.3\%$
Marco Solo	5.9
Marco + DPC-SA	32.4
Marco + DPC-AH	32.7
Marco + DPC-AV	27.3
Incremento promedio DPC	24.9

Finalmente, se puede decir que para el tipo de marco utilizado, el cual como se dijo anteriormente tiene gran flexibilidad lateral, la influencia que tuvieron cada uno de los dispositivos ensayados en el incremento del amortiguamiento viscoso equivalente, tanto para el nivel de desempeño de servicio como para el nivel de desempeño de falla es considerable; a tal grado, que el amortiguamiento del conjunto marco-disipador se debe prácticamente en su totalidad al amortiguamiento suministrado por el dispositivo disipador de energía

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Se llevó a cabo una serie de pruebas, en un marco resistente a momento de acero estructural, el cual fue reforzado con disipadores de energía del tipo *panel de cortante*. Se revisó un conjunto de parámetros representativos del comportamiento ante carga cíclica reversible del tipo sísmico hasta niveles de distorsión de 1.5%, haciendo énfasis en el comportamiento para dos niveles de desempeño, servicio y falla. Del análisis de los resultados se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

A distorsiones pequeñas, cuando todavía no se presenta daño apreciable en el dispositivo disipador, la resistencia del mismo influye de manera notable en la cantidad de energía que puede disipar; así entre mayor sea la resistencia de éste, menor será su capacidad de disipar energía, especialmente para distorsiones del disipador menores que 1%.

Una vez alcanzado el valor máximo de energía disipada, sin importar el nivel de distorsión al que se alcanzó, el disipador tiende a ir perdiendo su capacidad de disipar energía, la cual se irá reduciendo en función del daño que experimente el mismo.

Para distorsiones pequeñas la cantidad de amortiguamiento viscoso equivalente resultó inversamente proporcional a la rigidez del dispositivo disipador, relación que paulatinamente se va invirtiendo según se somete a mayores distorsiones el disipador y éste va acumulando daño.

De las pruebas realizadas se observó que los dispositivos disipadores panel de cortante proporcionan una importante cantidad de amortiguamiento viscoso equivalente adicional a la estructura, resultando del orden de 10, 20 y 25% para distorsiones iguales a 0.2, 0.4 y 1.3%, respectivamente, por lo que su uso en estructuras construidas en zonas de elevada sismicidad resulta, en general adecuado. Esto en virtud de que una estructura con mayor amortiguamiento viscoso y/o viscoso equivalente presentará menores respuestas, reduciéndose por consiguiente las aceleraciones y distorsiones de entre piso a las que se ve sometida. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que el uso de disipadores conectados a la estructura mediante contravientos, incrementa la rigidez lateral de la misma, lo que puede provocar que la estructura reforzada se acerque a la zona del espectro con mayores demandas sísmicas. Así por ejemplo, en el caso de la zona del lago de la ciudad de México, de acuerdo a estudios realizados por López Bátiz *et al* (1998) y Gómez (1994) se recomienda el uso de disipadores en estructuras que tengan un periodo fundamental menor a 1.5 segundos.

Al analizar la influencia que tienen los disipadores en el comportamiento del marco para el nivel de desempeño de servicio, se ve que resulta mejor colocar los dispositivos disipadores (tipo panel de cortante u otro) en estructuras con muros desligados, porque al presentar la estructura mayores distorsiones de entrepiso se puede aprovechar de mejor manera la capacidad de disipar energía de los mismos. Para el caso en estudio se ha visto que los disipadores con almas delgadas, menos rígidas, presentan mayor disipación de energía desde niveles de distorsión bajos.

En cuanto a la evaluación del comportamiento del dispositivo, la expresión planteada por Krawinkler (1978) para evaluar la fuerza cortante resistente es la que mejor aproximación reporta en el cálculo analítico de la resistencia de los disipadores panel de cortante, al tomar también en cuenta el espesor de los patines y/o atiesadores.

El corrimiento que se observó en la tornillería de fijación entre el dispositivo disipador y el sistema de contraviento es un problema que puede ser común en la utilización práctica de este tipo de dispositivos y de otros (ADAS, TADAS, etc.) que también que se sujetan a la estructura mediante tornillos, por lo que el intervalo de distorsiones en el cual trabajará el dispositivo deberá tener un margen de seguridad para considerar esta situación. Por otra parte sería adecuado mejorar el sistema de sujeción adicionando, una vez montado el dispositivo, algún tipo de tope que permita al disipador desplazarse conjuntamente con la estructura.

Tomando en cuenta todos los parámetros que sirvieron para evaluar los disipadores ensayados se concluye que el dispositivo DPC-AH es el que mejor comportamiento general presentó, porque a pesar de que los valores de energía disipada y amortiguamiento viscoso equivalente fueron ligeramente menores del valor máximo, fue el dispositivo que mantuvo sus propiedades mecánicas sin mucha variación entre las diferentes repeticiones de carga a un mismo nivel de distorsión; además, fue el que menor daño acumuló al final de la prueba. También se observó que los disipadores con espesores del alma grande (7.5 mm) o pequeño (3.9 mm) sufren una degradación rápida de sus propiedades mecánicas y dinámicas, no pudiendo mantenerlas durante ciclos sucesivos de carga.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

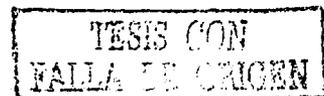
Se recomienda la realización de más pruebas del conjunto marco-disipador a fin de poder refinar el modelo teórico que se usó en este trabajo, especialmente en la consideración de la unión entre el disipador y la viga cabezal, para poder obtener un factor que reduzca la rigidez a flexión del dispositivo debido a que la unión real se encuentra entre un empotramiento perfecto y una articulación.

Aunque dos de las expresiones con que se evaluó la resistencia al corte de los dispositivos disipadores proporcionaron valores cercanos a los medidos experimentalmente, se recomienda efectuar ensayos del dispositivo disipador por separado con el fin de poder calibrar una expresión propia para este tipo de disipador, y que además pueda servir como expresión de diseño para los mismos. A juicio del autor se debería tomar como punto de partida la expresión planteada por Krawinkler (1978).

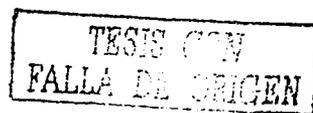
Finalmente se recomienda dentro de las pruebas de los disipadores solos, medir el número de ciclos de carga que resisten a un mismo nivel de distorsión, en especial para las condiciones de servicio y de falla, a fin de poder ubicar los dispositivos dentro de algunas de las recomendaciones reglamentarias sobre este aspecto.

## REFERENCIAS

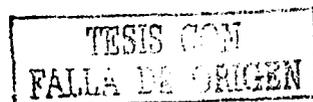
1. Aguilar R., R. (1998), "Comportamiento histerético de dispositivos disipadores de energía tipo panel de cortante", *Tesis de maestría en ingeniería*, DEPFI-UNAM.
2. Aguirre, M. (1993), "Disipador de energía montable sobre contravientos en V invertida", *Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 2127.*
3. Aguirre, M. y R. Sánchez (1989), "Pruebas de elementos disipadores de energía sísmica", *Revista Construcción y Tecnología*, Vol I, No. 10, pp. 7-18.
4. Aiken, I. D., y J. M. Kelly (1990), "Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy-absorbing systems for multistory structures", *Report No. UCB/EERC-90/03*, University of California at Berkeley.
5. Alonso, J. L. (1989), "Mechanical characteristics of X-plate energy dissipators", *CE 299 Report*, University of California at Berkeley.
6. Arima, F., M. Miyazaki, H. Tanaka y Y. Yamazaki (1988), "A study on buildings with large damping using viscous damping walls", *Proceedings of 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Tokio-Kyoto, Japan, Vol. 5, pp. 821-826.
7. Basler, K. (1963), "Strength of plate girders in shear", *Transactions of ASCE*, Vol. 128, Parte II.
8. Bergman, D. M. y R. D. Hanson (1990), "Viscoelastic versus steel plate mechanical damping devices and experimental comparison", *Proceedings of 4<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, pp. 469-477.
9. Bleich, F (1952), *Buckling strength of metal structures*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York
10. Bozzo, L., S. Mahins y V. Zayas (1990), "Design of friction base isolation systems", *Proceedings of 4<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, pp. 549-557.
11. Brockenbrough, R y J. Barsom (1992), "Chapter 1.1 Metallurgy", *Constructional steel design an international guide*, edited by P. Dowling, J. Harding y R. Bjorhovde, Elsevier Science Publishers Ltd.
12. Constantino, M. C. y M. D. Symans (1993), "Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers", *Struct. Desing Tall Bldgs.*, 2, pp. 93-132
13. Constantino, M. C., M. D. Symans, P. Tsopelas y D. P. Taylor (1993), "Fluid Viscous Dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation", *Proc. ATC 17-1 on seismic isolation, energy dissipation and active control*, Vol. 2, pp. 581-591.
14. Chopra, A. K. (2001), *Dynamics of structures*, segunda edición, editorial Prentice Hall
15. De Buen, O. (1988), *Estructuras de acero: comportamiento y diseño*, segunda reimpresión, editorial Limusa
16. Den Hartog, J.P (1956), *Mechanical Vibrations*, 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, NY
17. Eurocode No.3 (1988), "Design of Steel Structures", *Commission of the European Communities*, Brussels
18. FitzGerald, T. F., T. Anagnos, M. Goodson y T. Zsutty (1989), "Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections", *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 2, pp. 383-391.



19. Flores, L. E. (1996), "Adquisición y análisis de datos (AAD), ver. 1.0, manual del usuario", *Informe Interno preparado para el área de Ingeniería Estructural y Geotecnia, IEG/01/96, CENAPRED*, México, 25 pp.
20. Gaylord Jr., E. H., C. N. Gaylord y J. E. Stallmeyer (1992), *Design of steel structures*, tercera edición, Editorial McGraw Hill.
21. Gómez, M. (1994), "Estudio paramétrico de estructuras con mecanismos disipadores", *Tesis de maestría en ingeniería*, DEPI-UNAM.
22. Grigorian, C. E., T. S. Yang y E. P. Popov (1993), "Slotted bolted connection energy dissipators", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 491-504.
23. Grossman, J. S. (1990), "*Slender concrete structures – the new edge*", *ACI Journal*, Vol. 87, No. 1, pp. 39-52.
24. Huffmann, G. K. (1985), "Full base isolation for earthquake protection by helical springs and viscodampers", *Nuclear Engrg. Design*, 84(2), pp. 331-338.
25. Jacobsen, L. S. (1930), "Steady Forced Vibrations as Influences by Damping", *Transactions of American Society Mechanics Engineering*.
26. Jara, J. M. (1994), "Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 47, pp. 35-79
27. Kelly, J. M. (1988), "Base isolation in Japan, 1988", *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/ERC-88/20*, University of California at Berkeley.
28. Kelly, J. M., R. I. Skinner y A. J. Heine (1972), "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bulletin of New Zealand Nat. Soc. for Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 63-68.
29. Kobori, T *et al* (1992), "Development and application of hysteretic steel dampers", 10<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, Vol. 4, pp. 2061-2067.
30. Krawinkler, H. (1978), "Shear in beam-column joints in seismic design of steel frames", *Engineering Journal, AISC*, Vol. 15, No. 3, pp. 82-91.
31. López Bátiz, O., A. Echavarría, J. Maldonado y F. León (1996), "Determinación experimental del comportamiento de un marco reforzado con un dispositivo disipador de energía", *Informe final preparado para el área de Ingeniería Estructural y Geotecnia, IEG/01/96, CENAPRED*, México, 46 pp..
32. López Bátiz, O., J. Ruiz y J. Martínez (1998), "Estudio sobre la viabilidad del uso de dispositivos disipadores de energía en estructuras de concreto reforzado", *Memorias, XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Monterrey, pp. 198-207.
33. Lyse I., y H. J. Godfrey (1935), "Investigation of web buckling in steel beams", *Transactions of ASCE*, Vol. 100, pp. 675-706.
34. Makris, N. y M. C. Constantinou (1990), "Viscous dampers: testing, modeling and application in vibration and seismic isolation", *Technical Report NCEER-90-0028*, National Center of Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.2
35. Midorikawa, M., I. Nishiyama y M. Sugisawa (1994), "Cyclically inelastic behavior on seismic energy absorption steel members subjected to bending and shear", *First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, USA.



36. Nakashima, M., S. Iwai, M. Iwata, *et al* (1994), "Energy dissipation behavior of shear panels made of low yield steel", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp. 1299-1313.
37. Nims, D. K., P. J. Richter y R. E. Bachman (1993), "The use of the energy dissipating restraint for seismic hazard mitigation", *Earthquake Spectra*, Vol.9, No. 3, pp. 467-489.
38. "Normas técnicas complementarias para diseño por sismo" (2001). Documento propuesto y presentado en la página <http://www.smie.org.mx>.
39. Okumura Corporation (1991), "R&D on base isolation system and vibration control system", *Seismic Isolation and Response Control for Nuclear and Non-nuclear Structures*, SMIRT 11, Tokyo, Japan, pp.125-132
40. Pall, A. S. y C. Marsh (1982), "Response of friction damped braced frames", *J. Struct. Div., ASCE*, Vol. 108 No. ST6, pp 1313-1323.
41. Parducci A. y M. Mezzi (1991), "Seismic isolation of bridges in Italy", *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, Vol. 3, pp. 45-56.
42. Popov, E. P. (1976), *Mecánica de Sólidos*, primera edición, editorial Limusa.
43. Robinson, W. H. y L. R. Greenbank (1975), "Properties of an extrusion energy absorber", *Bulletin of New Zealand Nat. Soc. for Earthquake Engineering*, Vol. 8, pp 287-291.
44. Robinson, W. H. y L. R. Greenbank (1976), "An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 4, pp. 251-259.
45. Robinson, W. H. (1982), "Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 593-604.
46. Robinson, W. H. y W. J. Cousins (1987), "Recent developments in lead dampers for base isolation", *Proceedings of Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Wairakel, New Zealand, Vol. 2, pp. 279-284.
47. Robinson, W. H. y W. J. Cousins (1988), "Lead dampers for base isolation", *Proceedings of 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Tokio-Kyoto, Japan, Vol. 8, pp. 427-432.
48. Robinson, W. H. y A. Tucker (1997), "A lead-rubber shear damper", *Bulletin of New Zealand Nat. Soc. for Earthquake Engineering*, Vol. 14, pp 21-33.
49. Rodríguez, M. (2002), "Diseño por desempeño de estructuras de concreto", Memorias, *VII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, Cuernavaca, CDROM.
50. Ruiz, S. E. (2002), "Algunas recomendaciones para el diseño de edificios con disipadores de energía", Memorias, *VII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, Cuernavaca, CDROM.
51. Scholl, R. E. (1984), "Braced dampers: an alternative structural system for improving the earthquake performance of buildings", *Proc. 8<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, V, pp. 1015-1022, San Francisco.
52. Scholl, R. E. (1990), "Improve the earthquake performance of structures with added damping and stiffness elements", *Proceedings of 4<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, pp. 489-498.
53. SEAOC (1995), "Performance based seismic engineering of buildings", *Vision 2000 Committee*.



54. Seki, M., H. Katsumata, H. Uchida y T. Takeda (1988), "Study on earthquake response of two-storied steel frame with Y-shape braces", *Proceedings of 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Tokio-Kyoto, Japan, Vol. 5.
55. Skinner, R. I. y G. H. McVerry (1975), "Base isolation for increased earthquake resistance of buildings", *Bulletin of New Zealand Nat. Soc. for Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp 93-101.
56. Skinner, R. I., J. M. Kelly y A. J. Heine (1975), "Hysteresis dampers for earthquake-resistant structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, pp 287-296.
57. Skinner, R. I., R. G. Tayler, A. J. Heine y W. H. Robinson (1980), "Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquakes", *Bulletin of New Zealand Nat. Soc. for Earthquake Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp 22-36.
58. Skinner R. I., W. H. Robinson, G. H. McVerry (1993), *An introduction to seismic isolation*, Editorial John Wiley & Sons Ltd.
59. Soong, T. T. y G. F. Dargush (1997), *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, Editorial John Wiley & Sons Ltd.
60. Su, Y. F. y R. D. Hanson (1990a), "Seismic response of buildings structures with mechanical damping devices", *Department of Civil Engineering*, University of Michigan.
61. Su, Y. F. y R. D. Hanson (1990b), "Comparison of effective supplemental damping equivalent viscous and hysteretic", *Proceedings of 4<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, pp. 507-516.
62. Terán Gilmore, A. (2002), "Diseño por desempeño: antecedentes, conceptos generales y perspectivas", *Memorias, VII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, Cuernavaca, CDROM.
63. Tsai, K. Ch. *et al* (1993), "Welded steel triangular plate device for seismic energy dissipation", *Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control*, San Francisco, California, Vol. 2, pp. 687-698.
64. Uang, C. M. y V. V. Bertero (1986), "Earthquake simulation tests and associated studies of a 0.3 scale model of a six-story concentrically braced steel structure", *Report No. UCB/EERC-86/10*, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.
65. Watanabe, A., Y. Hitomi, E. Saeki, A. Wada y M. Fujimoto (1988), "Properties of brace encased in buckling restrained concrete and steel tube", *Proceedings of the 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Tokio-Kyoto, Japan, Vol. 4, pp. 719-723.
66. Whittaker, A. *et al* (1989), "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", *Earthquake Engineering Research Center, Report UCB/EERC-89/02*, University of California at Berkeley.
67. Whittaker, A., M. Constantinou y N. Silhager (1999), "Supplemental damping for new and retrofit construction", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No.21, pp. 1-21.
68. Zayas, V. , S. Low y S. Mahins (1990), "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 2, pp. 317-333.

## APÉNDICE A

### PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL

Los dispositivos disipadores panel de cortante fueron fabricados a partir de placas de acero estructural tipo A50 (Esfuerzo nominal a la fluencia  $F_y=3515 \text{ Kg/cm}^2$ ).

Con el fin de verificar el tipo de acero con el que estaban construidos los diferentes dispositivos, una vez que se ensayaron los mismos, se procedió a obtener probetas de las partes menos dañadas. Así se obtuvieron cinco probetas del área del alma (dos del dispositivo DPC-SA y tres del dispositivo DPC-AH, figura A.1a) y cuatro probetas del área de los patines (dos del dispositivo DPC-SA y dos del dispositivo DPC-AV, figura A.1b). La geometría de las probetas fue similar a la mostrada en la figura A.2.

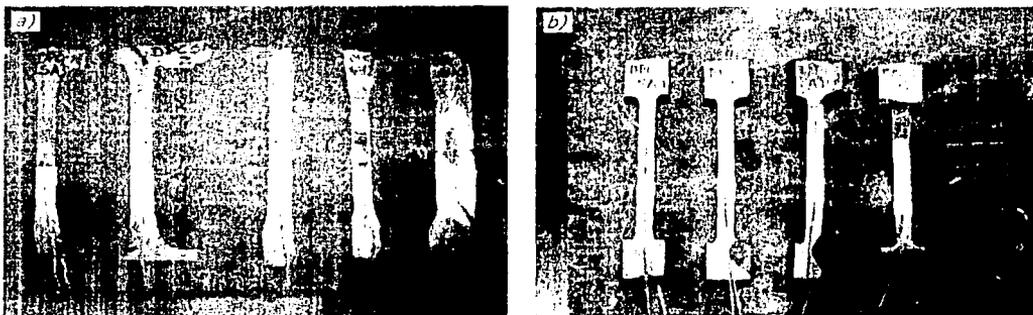


Figura A.1 Probetas ensayadas: a) obtenidas del alma del DPC; b) obtenidas del patín del DPC

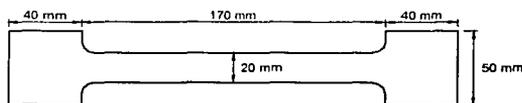


Figura A.2 Geometría de probeta

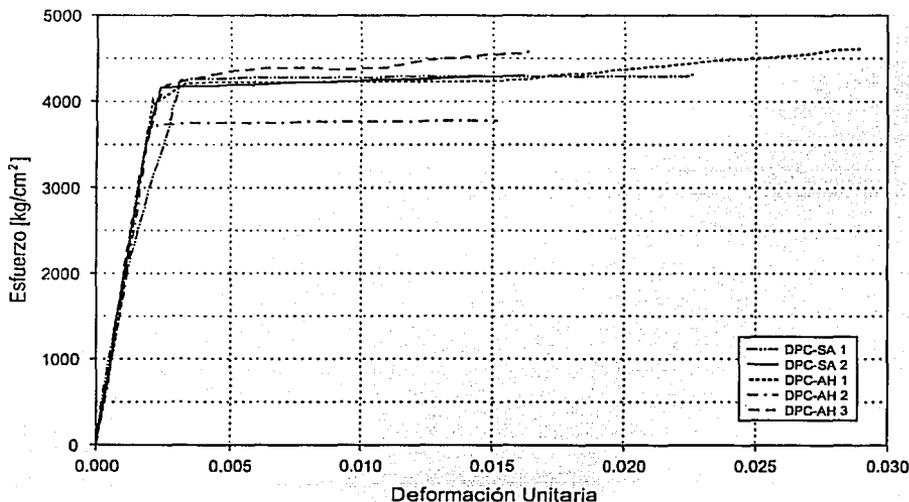
Las probetas se cortaron con oxiacetileno y posteriormente se pulieron hasta obtener una forma homogénea. Debido a que el alma de los disipadores quedó bastante pandeada, después de las pruebas fue necesario enderezarla con ayuda de una prensa hidráulica antes de realizar el corte. Las probetas fueron instrumentadas con dos deformímetros eléctricos, colocados en el centroide y en caras opuestas del espécimen.

Las muestras fueron ensayadas a tensión simple hasta la rotura mediante una máquina universal de 100 t de capacidad, y la adquisición de los registros de carga y deformación se hizo con un generador multicanal de funciones TDS-301, controlado por una computadora personal.

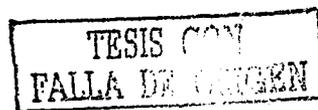
Los resultados de las pruebas se presentan en la tabla A.1, mientras que las curvas esfuerzo-deformación se muestran en las figuras A.2 y A.3. En la primera se muestran las curvas correspondientes a los especímenes provenientes del alma del dispositivo y en la segunda las correspondientes a los especímenes provenientes del patín del disipador. Se hace notar que la diferencia que se observa entre las dos gráficas, referente a la deformación unitaria alcanzada por los especímenes de una u otra parte del disipador, no se debe a un comportamiento diferente del material sino más bien a que en la colocación de los deformímetros de uno y otro grupo se utilizó pegamentos diferentes, lo cual provocó que los mismos se despegaran y dejaran de registrar a diferentes niveles de deformación.

**Tabla A.1** Resultados del ensaye a tensión simple de las probetas

Probeta	Tipo de acero	Espesor [mm]	$F_y$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$F_u$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
DPC-SA 01 (alma)	A50	6.45	4258.00	4990.44
DPC-SA 02 (alma)	A50	6.50	4167.00	4708.26
DPC-AH 01 (alma)	A50	4.70	3978.60	5114.90
DPC-AH 02 (alma)	A50	4.70	3733.30	4939.57
DPC-AH 03 (alma)	A50	4.65	4381.00	5375.81
<b>Promedio almas</b>			<b>4103.58</b>	<b>5025.79</b>
DPC-SA 01 (patines)	A50	11.95	3632.80	5231.26
DPC-SA 02 (patines)	A50	12.45	3405.10	5079.44
DPC-AV 01 (patines)	A50	12.25	3474.50	5123.84
DPC-AV 02 (patines)	A50	12.45	3648.00	3693.95
<b>Promedio patines</b>			<b>3540.10</b>	<b>4782.12</b>



**Figura A.2** Curvas esfuerzo-deformación de las probetas obtenidas de la placa del alma



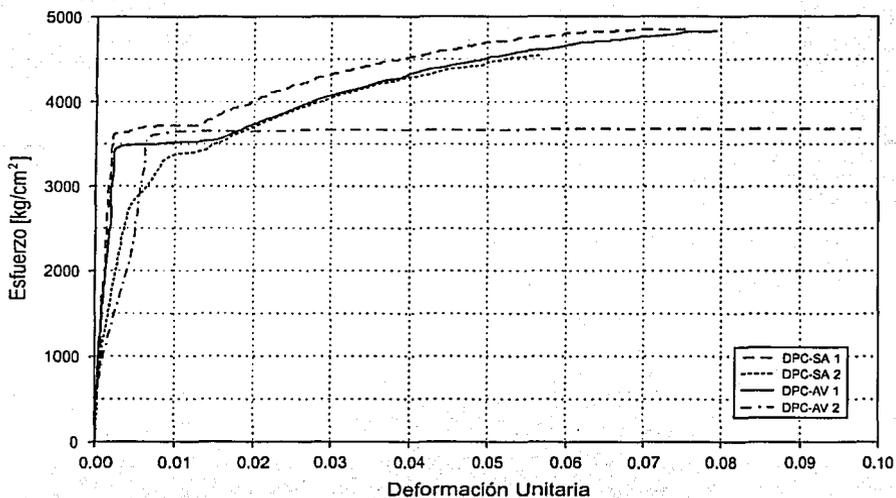


Figura A.3 Curvas esfuerzo-deformación de las probetas obtenidas de la placa de los patines