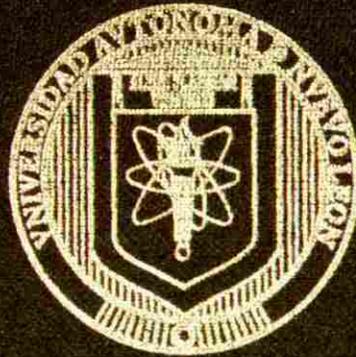


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LOS  
EDIFICIOS PROVISTOS CON DISPOSITIVOS  
DISIPADORES DE ENERGIA**

**POR**

**EFRAIN GRAJALES VARGAS**

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
**MAESTRIA EN CIENCIAS** con especialidad en  
**Ingeniería Estructural**

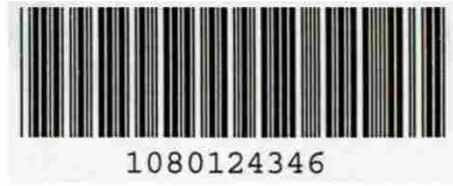
**JUNIO 2003**

TM  
TH1095  
.G7  
2003  
c.1

E  
G  
Y

COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LOS  
SOLISTAS SOCIATIVOS  
PROVISTOS CON DISPOSITIVOS  
DISIPADORES DE ENERGIA

JUNIO 2003



# UANL

---

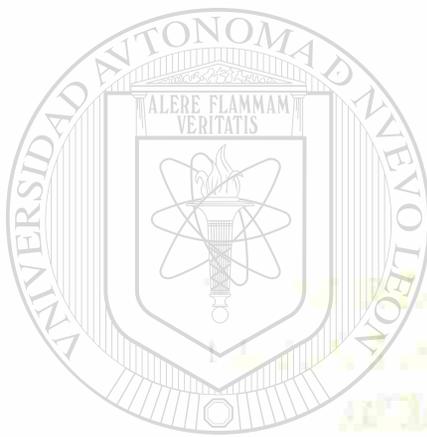
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



COMPLEMENTO DINAMICO DE LOS  
ELEMENTOS ESTRUCTURALES  
PROVISTOS CON DISPOSITIVOS  
DE AMORTIGUAMIENTO DE ENERGIA

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

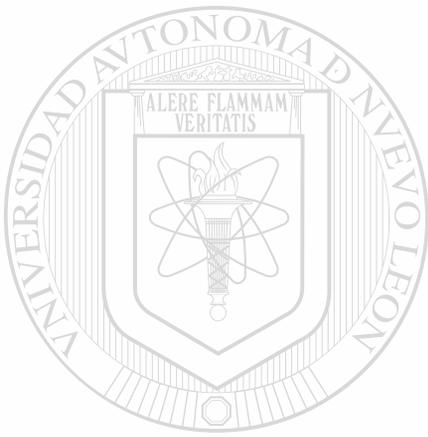
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

DR. JOSÉ GONZÁLEZ VARGAS

Trabajo de tesis para obtener el Grado de  
INGENIERÍA EN CIENCIAS con especialidad en  
Ingeniería Estructural

JUNIO 2008

FM  
TH 1095  
.G7  
2003



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

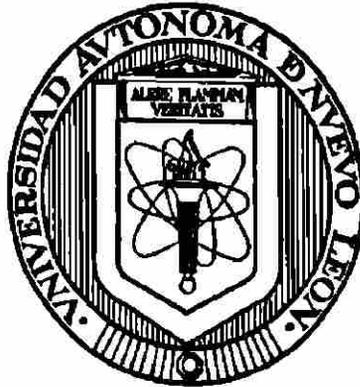


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS EDIFICIOS**

**PROVISTOS CON DISPOSITIVOS**

**DISIPADORES DE ENERGÍA**

Por

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**EFRAÍN GRAJALES VARGAS** ®

**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**

**Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRIA EN CIENCIAS con especialidad en  
Ingeniería Estructural**

**Junio, 2003**



COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: EFRÁIN GRAJALES VARGAS

Tema de la tesis: COMPORTAMIENTO DINAMICO DE  
LOS EDIFICIOS PROVISTOS CON DISPOSITIVOS DISI-  
PADORES DE ENERGÍA

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA.  
del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos:  
ortográfico, metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(Ninguna)

educación  
PARA LA VIDA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Nombre y firma de quien corrigió:

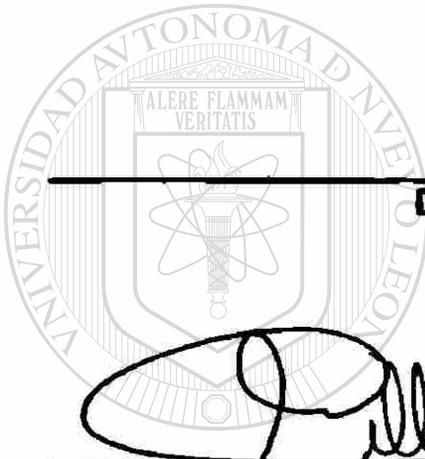
Ramón Longoria  
Arq. Ramón Longoria Ramírez

JCA  
M.I. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ALVAREZ  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Ciudad Universitaria, a 30 de ABRIL de 2003

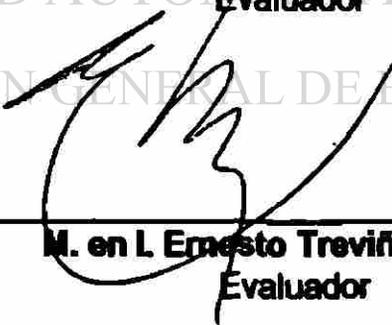
**COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS EDIFICIOS  
PROVISTOS CON DISPOSITIVOS  
DISIPADORES DE ENERGÍA**

**Aprobación de la Tesis:**



  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Ricardo González Alcorta**  
Director de la Tesis

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Guillermo Villarreal Garza**  
Evaluador

  
\_\_\_\_\_  
**M. en L. Ernesto Treviño Treviño**  
Evaluador

  
\_\_\_\_\_  
**M. en L. Justino César González Álvarez**  
Subdirector de Estudios de Posgrado

**Ernesto L. Treviño Treviño**  
Departamento de Estructuras y Materiales  
Instituto de Ingeniería Civil  
Ciudad Universitaria

16 de Junio del 2003

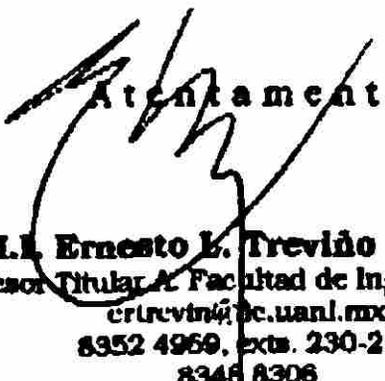
**SR. ING. OSCAR MOREIRA FLORES**  
Director de la Facultad de Ingeniería Civil de  
la UANL y Presidente del Comité de Maestría.  
**P r e s e n t e .**

Me refiero al oficio de fecha 6 de Mayo del presente año en el que el M.I. Justino César González A. me hace saber que fui designado Evaluador de la tesis "Comportamiento Dinámico de los Edificios Provistos con Dispositivos Disipadores de Energía" que presenta el Ing. Efraín Grajales Vargas como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Estructural.

El propósito de la presente es comunicarle que después de examinar la versión corregida de dicho documento, lo considero APROBADA dado que encuentro que cumple con los objetivos planteados en la misma tesis y con los requisitos estipulados en el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Universidad.

Sin otro particular por el momento, quedo como siempre a su disposición para cualquier aclaración que considere necesaria.

Atentamente



**M.I. Ernesto L. Treviño Treviño**  
Profesor Titular A. Facultad de Ingeniería Civil  
ertreviño@ic.uanl.mx  
8352 4960, exts. 230-234  
8348 8306

C.c.p.: **M.I. Justino César González Álvarez**  
Subdirector de Estudios de Posgrado y iv  
Secretario del Comité de Maestría.

San Nicolás de los Garza a 11 de junio de 2003

**Ing. Justino César González Álvarez, M. en I.  
Subdirector de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Autónoma de Nuevo León.**

Estimado Ing. González Álvarez:

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis "Comportamiento dinámico de los edificios provistos con dispositivos disipadores de energía", que presenta el Ing. Efraín Grajales Vargas, como requisito parcial para obtener el grado de *Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural*, comunico a Usted que he leído y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como **APROBADA**.

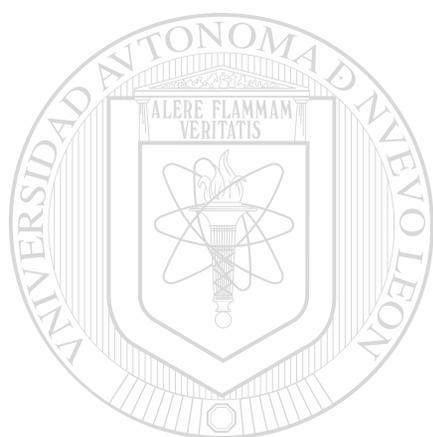
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

**ATENTAMENTE**



**Dr. Guillermo Villarreal Garza  
Evaluador de Tesis de Maestría**



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

*Dedico este trabajo a mi familia, quienes me han manifestado su apoyo incondicional y a esa persona tan especial por su amor y paciencia y quien sin quererlo ha sido el motor que me ha permitido seguir adelante en los momentos de crisis.*

*Gracias por ayudarme a alcanzar este tan anhelado proyecto*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero manifestar mi agradecimiento primeramente a Dios, por concederme la vida, salud y las fuerzas para perseguir mis metas, a mis padres: el Ing. A. Hugo Grajales Medina, quien siempre me ha apoyado en todas mis inquietudes; a mi madre, Martha Vargas Vargas, quien siempre ha manifestado el interés y ha puesto todo lo que ha estado a su alcance para que sus hijos salgan adelante; a mis hermanos: Rubén, Ruth, Dina y David Isaac, quienes comprendiendo o sin comprender lo que hago me han apoyado incondicionalmente en este proyecto.*

*También expreso mi agradecimiento a la Universidad Autónoma de Nuevo León, en especial al Departamento de Estructuras del Instituto de Ingeniería Civil, por haberme cobijado en esta etapa de mi formación. A mis maestros y amigos el Dr. Ricardo González Alcorta, el M. en I. Jorge H. Chávez Gómez, quienes a lo largo del desarrollo de este trabajo han aportado valiosos comentarios que han enriquecido el contenido, al M. en C. Luis Manuel Aranda Maltéz, jefe del Departamento de Estructuras, por haberme permitido colaborar en el Instituto de Ingeniería y completar así mi tesis. A mis otros maestros y compañeros de clases por haber compartido esta etapa de mi vida.*

*Y por último agradezco a esa persona tan especial que ha sido importante en estos últimos años de mi vida porque también ella ha jugado una posición vital en el desarrollo de este trabajo.*

## PROLOGO

El objetivo principal de esta tesis es estudiar la influencia que los dispositivos disipadores de energía del tipo histerético tienen en el comportamiento de los edificios, analizando como parámetros importantes el punto de fluencia de los disipadores así como el porcentaje de rigidez lateral que los dispositivos toman con respecto a la rigidez lateral total del edificio.

Este trabajo está consta por nueve capítulos cuyo contenido se describe brevemente a continuación:

**Capítulo 1. *Introducción.*** Se mencionan los antecedentes que se tienen sobre el análisis sísmico de edificios y las consideraciones que, en general se toman en cuenta en los códigos para el diseño sismo-resistente de las estructuras. Se establecen los objetivos y los alcances de esta investigación.

**Capítulo 2. *Planteamiento de la Investigación.*** Se establecen las fases en las que se divide la investigación, haciendo una breve descripción del contenido de cada una de esas etapas. Se plantean los parámetros que deben ser evaluados para alcanzar los objetivos y se plantean las hipótesis de trabajo para la investigación.

**Capítulo 3. *Dispositivos Reductores de Respuesta.*** En este apartado, se hace una revisión sobre los diferentes mecanismos disipadores de energía que existen, ahondando brevemente en la descripción y funcionamiento que cada uno de estos mecanismos tiene. Se estudian de manera particular los dispositivos denominados "ADAS"; por sus siglas en inglés *Added Damping and Stiffness*, que puede traducirse como Amortiguamiento y Rigidez Adicionales.

**Capítulo 4. *Zonificación Sísmica y Efectos de Sitio.*** Se hace énfasis en la importancia que tiene el tipo de suelo en el comportamiento sísmico de los edificios. Se menciona la forma en la que los códigos toman en cuenta el tipo de terreno y se habla acerca de los espectros, herramienta importante en el diseño sismo-resistente.

**Capítulo 5. *Modelaje Matemático de Sistemas Estructurales Provistos con Dispositivos Disipadores.*** Se hace una revisión de las distintas formas de analizar edificios con dispositivos disipadores, así como las consideraciones y limitaciones que tiene cada una de estas formas de análisis. Se pone énfasis

en el análisis no lineal, que es el que se utiliza en esta investigación, dándole especial importancia al planteamiento energético del problema.

**Capítulo 6. *Influencia de Dispositivos en Edificios de Periodo Corto.*** En este capítulo se estudia el primer caso teórico de estudio, el cual consiste en un edificio de cinco niveles. Se describe el edificio, la geometría y las propiedades dinámicas del edificio y se analizan tres diferentes proporciones de rigidez lateral de los dispositivos disipadores de energía. Se hace el análisis dinámico considerando dos diferentes sismos.

**Capítulo 7. *Influencia de Dispositivos en Edificios de Periodo Largo.*** Aquí se trata el segundo caso teórico de estudio, el cual consiste en un edificio de veinte niveles. Para esta estructura se estudia una sola proporción de rigidez lateral para los disipadores de energía y se pone especial cuidado en encontrar el punto óptimo para el umbral de cedencia de los disipadores de energía cuando este edificio es sometido al acelerograma del sismo de SCT de 1985.

**Capítulo 8. *Aplicación a un Caso Práctico.*** En este capítulo se trata el estudio de un edificio cuyos parámetros de geometría, rigidez lateral y masa no se hayan controlados como en los casos teóricos. Al igual que en el caso de estudio del capítulo 7, se analiza únicamente una proporción de rigidez lateral de los disipadores de energía ya que lo que se busca es el punto de fluencia óptimo para estos mecanismos.

**Capítulo 9. *Conclusiones.*** Se analizan e interpretan los resultados obtenidos en los capítulos 6, 7 y 8.

---

Deseo sinceramente que lo que se estudia en esta tesis sea de utilidad para el lector y sirva también como una referencia en el largo camino que aún falta por recorrer para conseguir que el diseño sismo-resistente de edificios provistos con dispositivos disipadores de energía sea, además de seguro, una práctica más común entre los ingenieros que se dedican al diseño de estructuras.

Efraín Grajales Vargas

---

# TABLA DE CONTENIDO

---

<b>Parte</b>	<b>Página</b>
PRÓLOGO	x
NOMENCLATURA	xvi
LISTA DE FIGURAS	xx
LISTA DE TABLAS	xxix
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos y alcances.....	3
<b>2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>5</b>
2.1 Parámetros a evaluar.....	6
2.2 Respuesta de los edificios.....	10
2.3 Hipótesis de esta investigación.....	10
<b>3. DISPOSITIVOS REDUCTORES DE RESPUESTA.....</b>	<b>11</b>
3.1 Dispositivos de control pasivo.....	12
3.1.1 Disipadores de energía.....	12
3.1.2 Aisladores de base.....	27
3.1.3 Osciladores resonantes.....	47
3.1.4 Cables de preesfuerzo.....	50
3.2 Dispositivos de control activo.....	52
3.2.1 Masa activa.....	53
3.2.2 Tendones activos.....	55
3.2.3 Dispositivos de fricción activos.....	56
3.3 Comentarios.....	58
<b>4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA Y EFECTOS DE SITIO.....</b>	<b>61</b>
4.1 Zonificación sísmica.....	61
4.2 Microzonificación.....	64
4.3 Efectos de sitio.....	69

4.4	Espectros de respuesta.....	74
4.4.1	Tipos de espectros.....	76
4.4.2	Factores que afectan los espectros de respuesta.....	79
4.4.3	Espectros de diseño.....	81
4.5	Beneficios esperados.....	86
4.6	Espectros de respuesta para sitios no instrumentados.....	87

**5. MODELAJE MATEMÁTICO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES PROVISTOS CON DISPOSITIVOS DISIPADORES.....**

		89
5.1	Modelado para análisis elásticos.....	89
5.1.1	Dispositivos Solera.....	92
5.1.2	Dispositivos ADAS.....	94
5.1.3	Dispositivos TADAS.....	98
5.2	Modelado para análisis no lineal.....	100
5.2.1	Rigidez efectiva de un disipador.....	101
5.2.2	Método de la diagonal equivalente.....	101
5.2.3	Método del elemento axial equivalente.....	102
5.2.4	Métodos rigurosos.....	102
5.2.5	Modelos histeréticos.....	104
5.3	Modelaje de edificios.....	111
5.3.1	Generalidades del enfoque sismorresistente.....	111
5.4	Tipos de análisis utilizados.....	113
5.5	Consideraciones de análisis.....	114

**6. INFLUENCIA DE DISPOSITIVOS, EN EDIFICIOS DE PERIODO CORTO.....**

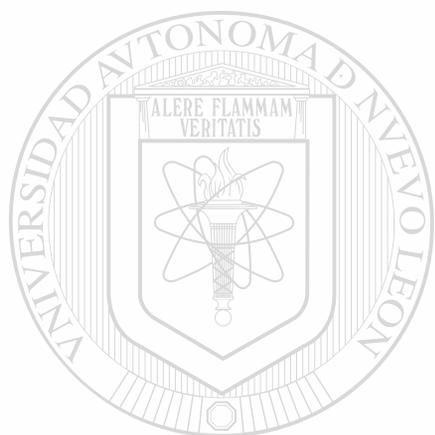
		116
6.1	Descripción del edificio.....	116
6.2	Acelerogramas de análisis.....	120
6.2.1	Acelerograma del sismo El Centro.....	120
6.2.2	Acelerograma del sismo de CU.....	122
6.3	Coficiente sísmico.....	124
6.4	Cortantes en la base.....	128
6.4.1	Valores máximos pico a pico.....	128
6.4.2	Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia.....	137
6.5	Desplazamientos.....	148
6.5.1	Valores máximos pico a pico.....	148
6.5.2	Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia.....	157
6.6	Energías.....	166

6.7 Comportamiento histerético de los ADAS..... 200  
 6.8 Análisis general de la respuesta..... 215

**7. INFLUENCIA DE DISPOSITIVOS EN EDIFICIOS DE PERIODO LARGO..... 221**  
 7.1 Descripción del edificio..... 221  
 7.2 Acelerogramas de análisis..... 224  
     7.2.1 Acelerograma del sismo de SCT '85. .... 225  
 7.3 Coeficiente sísmico..... 226  
 7.4 Cortantes en la base..... 227  
     7.4.1 Valores máximos pico a pico..... 230  
     7.4.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia..... 230  
 7.5 Desplazamientos..... 233  
     7.5.1 Valores máximos pico a pico..... 233  
     7.5.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia..... 235  
 7.6 Energías..... 237  
     7.6.1 Energía de entrada..... 237  
     7.6.2 Energía disipada..... 239  
 7.7 Comportamiento histerético de los ADAS..... 245  
 7.8 Análisis general de la respuesta..... 248  
 7.9 Comentarios..... 250

**8. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO..... 251**  
 8.1 Descripción del edificio..... 251  
 8.2 Acelerogramas de análisis..... 258  
     8.2.1 Acelerograma del sismo de SCT '85. .... 258  
 8.3 Coeficiente sísmico..... 260  
 8.4 Cortantes en la base..... 262  
     8.4.1 Valores máximos pico a pico..... 262  
     8.4.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia..... 264  
 8.5 Desplazamientos..... 266  
     8.5.1 Valores máximos pico a pico..... 266  
     8.5.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia..... 268  
 8.6 Energías..... 270  
     8.6.1 Energía de entrada..... 270  
     8.6.2 Energía disipada..... 272  
 8.7 Comportamiento histerético de los ADAS..... 277  
 8.8 Análisis general de la respuesta..... 280  
 8.9 Comentarios..... 284

<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>286</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>290</b>



**UANL**

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**TABLA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS  
( NOMENCLATURA )**

<b>a</b>	<b>aceleración</b>
<b>b</b>	<b>ancho de las soleras</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>ancho de las placas en sus extremos</b>
<b>b<sub>2</sub></b>	<b>ancho de la garganta de las placas</b>
<b>b<sub>1eq</sub></b>	<b>ancho equivalente de las placas en sus extremos</b>
<b>e</b>	<b>espesor de la solera</b>
<b>f</b>	<b>frecuencia en Hz</b>
<b>g</b>	<b>aceleración de la gravedad</b>
<b>h</b>	<b>altura de las placas</b>
<hr/>	
<b>n</b>	<b>número de soleras en forma de "U"</b>
<b>s</b>	<b>segundos</b>
<b>t</b>	<b>espesor de cada placa</b>
<b>t</b>	<b>tiempo</b>
<b>rms</b>	<b>root mean square (raíz media cuadrática)</b>

<b>A</b>	<b>Zona sísmica</b>
<b>AB</b>	<b>Recta que va del punto "A" al punto "B"</b>
<b>AX</b>	<b>Recta que va del punto "A" al punto "X"</b>

<b>B</b>	<b>Zona sísmica</b>
<b>C</b>	<b>Zona sísmica</b>
<b>C<sub>s</sub></b>	<b>Coefficiente Sísmico</b>
<b>D</b>	<b>Zona sísmica</b>
<b>D</b>	<b>Desplazamiento</b>
<b>D<sub>i</sub></b>	<b>Desplazamiento i-ésimo</b>
<b>D<sub>u</sub></b>	<b>Desplazamiento último</b>
<b>D<sub>y</sub></b>	<b>Desplazamiento de fluencia</b>
<b>ADAS</b>	<b>Added Damping and Stiffness</b>
<b>A<sub>r</sub></b>	<b>Nivel de amplificación</b>
<b>E</b>	<b>Módulo de elasticidad del acero</b>
<b>E<sub>D</sub></b>	<b>Energía disipada por amortiguamiento modal</b>
<b>E<sub>H</sub></b>	<b>Energía disipada por histéresis</b>
<b>E<sub>i</sub></b>	<b>Energía de entrada</b>
<b>E<sub>k</sub></b>	<b>Energía cinética</b>
<b>F</b>	<b>Fuerza</b>
<b>F<sub>s</sub></b>	<b>Fuerza restitutiva</b>
<b>F<sub>y</sub></b>	<b>Fuerza de fluencia</b>
<b>F<sub>u</sub></b>	<b>Capacidad última del conjunto de soleras</b>
<b>F<sub>ucds</sub></b>	<b>Fuerza última del disipador</b>
<b>Hz</b>	<b>Hertz (unidad de medida 1/s)</b>
<b>K<sub>ADAS</sub></b>	<b>Rigidez lateral de los dispositivos ADAS</b>
<b>K<sub>MARCO</sub></b>	<b>Rigidez lateral tomad por los marcos</b>

<b>K</b>	<b>Rigidez</b>
<b><math>K_{diag}</math></b>	<b>Rigidez axial elástica del contraviento</b>
<b><math>K_{dis}</math></b>	<b>Rigidez elástica del disipador</b>
<b><math>K_{Erec.dis}</math></b>	<b>Rigidez efectiva del disipador</b>
<b><math>K_{eq}</math></b>	<b>Rigidez equivalente</b>
<b><math>K_1</math></b>	<b>Rigidez elástica</b>
<b><math>K_2</math></b>	<b>Rigidez posterior a la fluencia</b>
<b>M</b>	<b>Momento</b>
<b>MM</b>	<b>Escala de Mercalli Modificada</b>
<b><math>M_p</math></b>	<b>Momento plástico</b>
<b>Q</b>	<b>Factor para reducir el espectro de diseño</b>
<b>R</b>	<b>Factor para reducir el espectro de diseño</b>
<b>R</b>	<b>Radio medio de curvatura de las soleras</b>
<b><math>R^+_{rec}</math></b>	<b>Punto de recobre positivo</b>
<b><math>R^-_{rec}</math></b>	<b>Punto de recobre negativo</b>
<b>REHV</b>	<b>Técnica para estimar efectos de sitio</b>
<b>T</b>	<b>Periodo</b>
<b><math>T_0</math></b>	<b>Periodo dominante</b>
<b><math>U_y</math></b>	<b>Límite de fluencia</b>
<b><math>V_{ADAS}</math></b>	<b>Capacidad última a cortante de los ADAS</b>
<b><math>V_s</math> transversales</b>	<b>Velocidad de propagación de las ondas elásticas</b>
<b><math>V_{TADAS}</math></b>	<b>Cortante de fluencia de los TADAS</b>
<b><math>V_{yTADAS}</math></b>	<b>Cortante de fluencia de los TADAS</b>

**W**      **Peso total de la estructura**

---

$\alpha$       **Parámetro adimensional para localizar el "punto de recobre"**

$\beta$       **Parámetro adimensional**

$\Delta$       **Desplazamiento**

$\Delta_y$       **Desplazamiento de fluencia**

$\mu$       **Ductilidad**

$\sigma$       **Esfuerzo**

$\sigma_y$       **Esfuerzo de fluencia**

$\sigma_u$       **Esfuerzo último del acero**

$\theta$       **Ángulo de inclinación con respecto al eje horizontal de los**  
**contravientos**

$\xi$       **Fracción de amortiguamiento crítico**

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
3.1	Comportamiento elasto-plástico.....	13
3.2	Dispositivos disipadores tipo solera.....	14
3.3	Dispositivos ADAS.....	15
3.4	Dos vistas del ADAS.....	15
3.5	Dispositivos TADAS.....	17
3.6	Edificio con marcos con contravientos excéntricos.....	18
3.7	Disipador por extrusión.....	19
3.8	Disipador de energía por fricción.....	20
3.9	La Torre Mayor.....	23
3.10	Amortiguador viscoso.....	23
3.11	Disipador por comportamiento viscoelástico.....	24
3.12	Concepto de aislamiento de base.....	28
3.13	Puente con aisladores de base.....	30
3.14	Aislador de base.....	31
3.15	Foothill Communities Law and Justice Center (Primer edificio con aislamiento de base).....	33
3.16	Aislador con corazón de plomo.....	34
3.17	Tohuko Electric Power Company, Japan.....	36
3.18	Péndulo de fricción.....	40

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
3.19 Aislador de base, del Ing. Manuel González Flores.....	41
3.20 Aislador con control de desplazamientos.....	42
3.21 Modelos a escala, de masa activa.....	54
4.1 Regionalización Sísmica de México.....	62
4.2 Corte N-S, del valle de México .....	63
4.3 Zonificación del Distrito Federal, según el tipo de suelo.....	68
4.4 Condiciones de suelo y aceleraciones máximas registradas durante el sismo de San Francisco, de 1957.....	73
4.5 Gráfico indicativo del método de determinación del espectro de respuesta.....	75
4.6 Ejemplos de modelos de histéresis.....	77
4.7 Comparación de espectros de pseudo aceleración para distintos terremotos (factor de amortiguamiento $\xi = 5\%$ ).....	79
4.8 Registros de aceleración SCT y CU (1985).....	80
4.9 Espectros de aceleración correspondiente a los registros de la figura 4.19 (terremoto de Michoacán, México, 1985).....	81
4.10 Espectros de diseño para diferentes tipos de suelo.....	83
5.1 Formas convencionales de colocar los dispositivos disipadores de energía .....	90
5.2 Geometría típica de los dispositivos solera.....	92
5.3 Comparación de geometrías idealizadas con la real.....	95
5.4 Geometría y comportamiento de los dispositivos TADAS.....	99
5.5 Curva típica fuerza-deformación de un dispositivo con comportamiento bilineal.....	101
5.6 Modelo bilineal.....	105

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
5.7 Rigidez del modelo de Takeda.....	107
5.8 Comportamiento en ciclos del modelo de Takeda.....	108
6.1 Edificio de cuatro niveles.....	118
6.2 Detalle de localización de los ADAS.....	118
6.3 Acelerograma del sismo de El Centro.....	121
6.4 Espectro de Fourier de El Centro.....	121
6.5 Espectro de respuesta elástico de El Centro.....	122
6.6 Acelerograma de la componente E-W del sismo CU `85.....	123
6.7 Espectro de Fourier del acelerograma CU `85 (E-W).....	123
6.8 Espectro de respuesta elástico de CU `85 (E-W).....	124
6.9a Cortante en la base ( El Centro).....	126
6.9b Coeficiente sísmico ( El Centro ).....	126
6.10a Cortante en la base ( CU `85 (E-W) ).....	127
6.10b Coeficiente sísmico ( CU `85 (E-W)).....	127
6.11 Historia de cortantes en la base ( El Centro ); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	129
6.12 Historia de cortantes en la base ( El Centro ); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	130
6.13 Historia de cortantes en la base ( El Centro ); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	131
6.14 Historia de cortantes en la base ( CU `85 (E-W) ); $K_{ADAS} = 25\%$ ...	132
6.15 Historia de cortantes en la base ( CU `85 (E-W) ); $K_{ADAS} = 50\%$ ...	133
6.16 Historia de cortantes en la base ( CU `85 (E-W) ); $K_{ADAS} = 75\%$ ...	134
6.17a Valores máximos de cortantes (pico a pico).....	138
6.17b Valores máximos de cortantes (rms).....	138

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
6.18a Valores máximos de cortantes (pico a pico).....	139
6.18b Valores máximos de cortantes (rms).....	139
6.19a Valores máximos de cortantes (pico a pico).....	140
6.19b Valores máximos de cortantes (rms).....	140
6.20a Valores máximos de cortantes (pico a pico).....	141
6.20b Valores máximos de cortantes (rms).....	141
6.21a Valores máximos de cortantes (pico a pico).....	142
6.21b Valores máximos de cortantes (rms).....	142
6.22a Valores máximos de cortantes (pico a pico).....	143
6.22b Valores máximos de cortantes (rms).....	143
6.23 Historia de desplazamientos en azotea (El Centro); $K_{ADAS} = 25\%$ ..	149
6.24 Historia de desplazamientos en azotea (El Centro); $K_{ADAS} = 50\%$ ..	150
6.25 Historia de desplazamientos en azotea (El Centro); $K_{ADAS} = 75\%$ ..	151
6.26 Historia de desplazamientos en azotea ( CU `85 E-W ); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	152
6.27 Historia de desplazamientos en azotea ( CU `85 E-W ); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	153
6.28 Historia de desplazamientos en azotea ( CU `85 E-W ); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	154
6.29a Desplazamientos Absolutos (rms) El Centro $K_{ADAS} = 25\%$ .....	158
6.29b Desplazamientos Relativos (rms) El Centro $K_{ADAS} = 25\%$ .....	158
6.30a Desplazamientos Absolutos (rms) El Centro $K_{ADAS} = 50\%$ .....	159
6.30b Desplazamientos Relativos (rms) El Centro $K_{ADAS} = 50\%$ .....	159
6.31a Desplazamientos Absolutos (rms) El Centro $K_{ADAS} = 75\%$ .....	160

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
6.31b Desplazamientos relativos (rms) El Centro $K_{ADAS} = 75\%$ .....	160
6.32a Desplazamientos absolutos (rms) CU '85 $K_{ADAS} = 25\%$ .....	161
6.32b Desplazamientos relativos (rms) CU '85 $K_{ADAS} = 25\%$ .....	161
6.33a Desplazamientos absolutos (rms) CU '85 $K_{ADAS} = 50\%$ .....	162
6.33b Desplazamientos relativos (rms) CU '85 $K_{ADAS} = 50\%$ .....	162
6.34a Desplazamientos absolutos (rms) CU '85 $K_{ADAS} = 75\%$ .....	163
6.34b Desplazamientos relativos (rms) CU '85 $K_{ADAS} = 75\%$ .....	163
6.35 Historias de energías ( El Centro ); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	167
6.36 Porcentajes de energías ( El Centro ); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	168
6.37 Energías disipadas ( El Centro ); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	169
6.38 Comparación de energías disipadas ( El Centro ); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	170
6.39 Historias de energías ( El Centro ); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	172
6.40 Porcentajes de energías ( El Centro ); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	173
6.41 Energías disipadas ( El Centro ); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	174
6.42 Comparación de energías disipadas ( El Centro ); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	175
6.43 Historias de energías ( El Centro ); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	178
6.44 Porcentajes de energías ( El Centro ); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	179
6.45 Energías disipadas ( El Centro ); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	180
6.46 Comparación de energías disipadas ( El Centro ); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	181
6.47 Historias de energías ( CU '85 (E-W) ); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	184
6.48 Porcentajes de energías ( CU '85 (E-W) ); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	185

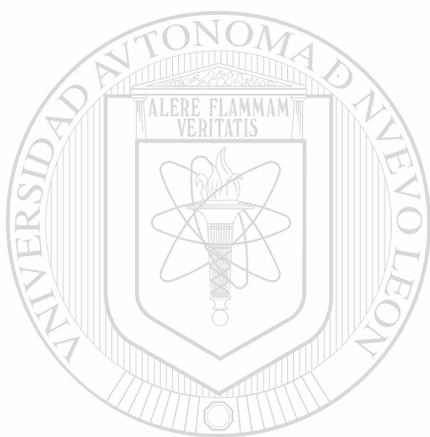
**Figura****Página**

6.49	Energías disipadas (CU `85 (E-W)); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	186
6.50	Comparación de energías disipadas (CU `85 (E-W)); $K_{ADAS} = 25\%$ .....	187
6.51	Historias de energías ( CU `85 (E-W )); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	189
6.52	Porcentajes de energías (CU `85 (E-W)); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	190
6.53	Energías disipadas (CU `85 (E-W)); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	191
6.54	Comparación de energías disipadas (CU `85 (E-W)); $K_{ADAS} = 50\%$ .....	192
6.55	Historias de energías ( CU `85 (E-W )); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	195
6.56	Porcentajes de energías (CU `85 (E-W)); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	196
6.57	Energías disipadas (CU `85 (E-W)); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	197
6.58	Comparación de energías disipadas (CU `85 (E-W)); $K_{ADAS} = 75\%$ .....	198
6.59	Ciclos histeréticos en niveles superiores (EI Centro); $K_{ADAS} = 25 \%$ .....	201
6.60	Ciclos histeréticos en niveles inferiores (EI Centro); $K_{ADAS} = 25 \%$ .....	202
6.61	Ciclos histeréticos en niveles superiores (EI Centro); $K_{ADAS} = 50 \%$ .....	203
6.62	Ciclos histeréticos en niveles inferiores (EI Centro); $K_{ADAS} = 50 \%$ .....	204
6.63	Ciclos histeréticos en niveles superiores (EI Centro); $K_{ADAS} = 75 \%$ .....	205
6.64	Ciclos histeréticos en niveles inferiores (EI Centro); $K_{ADAS} = 75 \%$ .....	206
6.65	Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU `85(E-W)); $K_{ADAS} = 25 \%$ .....	208

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
6.66 Ciclos histéricos en niveles inferiores (CU '85(E-W)); KADAS = 25 %.....	209
6.67 Ciclos histéricos en niveles superiores (CU '85(E-W)); KADAS = 50 %.....	210
6.68 Ciclos histéricos en niveles inferiores (CU '85(E-W)); KADAS = 50 %.....	211
6.69 Ciclos histéricos en niveles superiores (CU '85(E-W)); KADAS = 75 %.....	212
6.70 Ciclos histéricos en niveles inferiores (CU '85(E-W)); KADAS = 75 %.....	213
7.1 Edificio de veinte niveles.....	222
7.2 Detalle de localización de los ADAS.....	223
7.3 Acelerograma del sismo SCT '85 (E-W).....	225
7.4 Espectro de Fourier de SCT '85 (E-W).....	225
7.5 Espectro de respuesta elástico de SCT '85 (E-W).....	226
7.6a Cortante en la base (SCT '85 E-W).....	228
7.6b Coeficiente sísmico (SCT '85 E-W).....	228
7.7 Historias de cortantes en la base (SCT '85 E-W).....	229
7.8a Comparación de cortantes máximos pico a pico (SCT '85 E-W)...	232
7.8b Comparación de cortantes máximos en rms (SCT '85 E-W).....	232
7.9 Historias de desplazamientos en azotea (SCT '85 E-W).....	234
7.10a Desplazamientos absolutos (rms).....	236
7.10b Desplazamientos relativos (rms).....	236
7.11 Historia de energías (SCT '85 (E-W)).....	238

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
7.12 Porcentajes de energías (SCT `85 (E-W)).....	240
7.13 Energías disipadas (SCT `85 (E-W)).....	241
7.14 Comparación de energías disipadas (SCT `85 (E-W)).....	243
7.15 Ciclos histeréticos en niveles superiores (SCT `85 (E-W)).....	246
7.16 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (SCT `85 (E-W)).....	247
8.1 Planta típica del edificio.....	253
8.2 Torre Ángel (modelo original, con muros de concreto).....	253
8.3 Torre Ángel (modelo con ADAS).....	254
8.4 Localización de contravientos con ADAS.....	255
8.5 Elevación del marco central de la Torre Ángel.....	257
8.6 Acelerograma del sismo SCT `85 (E-W).....	258
8.7 Espectro de Fourier de SCT `85 (E-W).....	259
8.8 Espectro de repuesta elástico SCT `85 (E-W).....	259
8.9a Cortante en la base (SCT `85 (E-W)).....	261
8.9b Coeficiente sísmico elástico (SCT `85 (E-W)).....	261
8.10 Historias de cortantes en la base (SCT `85 (E-W)).....	263
8.11a Comparación de cortantes máximos pico a pico (SCT `85 (E-W)).	265
8.11b Comparación de cortantes máximos en rms (SCT `85 (E-W)).....	265
8.12 Historias de desplazamientos en azotea (SCT `85 (E-W)).....	267
8.13a Desplazamientos absolutos (rms).....	269
8.13b Desplazamientos relativos (rms).....	269
8.14 Historias de energías (SCT `85 (E-W)).....	271

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
8.15 Porcentajes de energías (SCT '85 (E-W)).....	273
8.16 Energías disipadas (SCT '85 (E-W)).....	275
8.17 Comparación de energías disipadas (SCT '85 (E-W)).....	276
8.18 Ciclos histeréticos en niveles superiores (SCT '85 (E-W)).....	278
8.19 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (SCT '85 (E-W)).....	279
8.20 Espectro de respuesta elástico de SCT '85 (E-W).....	282



UANL

---

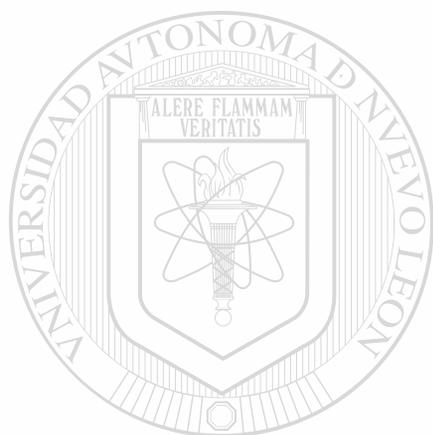
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
2.1	Parámetros evaluados.....	7
8.1	Modos de vibrar.....	283



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Antecedentes

A lo largo de los años, la filosofía de diseño sismo-resistente común se ha basado en proporcionar, a la estructura, la resistencia tal que ésta soporte las fuerzas laterales inducidas por los sismos, esto sin exceder un nivel aceptable de daño. Esta idea se mantiene en la actualidad; sin embargo, se han incorporado nuevos conceptos como disipación de energía, aislamiento de base y amortiguamiento inducido.

Los sismos que se han presentado en las últimas décadas, alrededor del mundo, han hecho inminente la búsqueda de diversas técnicas en el diseño sismo-resistente. Estas técnicas, relativamente nuevas, parten de la premisa de que no toda la fuerza sísmica debe resistirse elásticamente por la estructura principal, sino que puede recurrirse a estos métodos para, de alguna forma, conseguir que entre menor cantidad de energía al sistema o, alternativamente, que la cantidad de energía que ya ha entrado se distribuya de tal forma que cause el menor daño posible a la estructura principal.

Una de estas técnicas es el empleo de *mecanismos disipadores de energía*, cuyo objetivo es reducir el trabajo de los elementos estructurales principales; es decir, obligar a que la energía se disipe en ciertos puntos localizados, para evitar que los elementos principales se fatiguen, debido a las cargas cíclicas reversibles, como las ocasionadas por un sismo.

Para tener construcciones eficientes, atendiendo a su resistencia y economía, éstas deben diseñarse de tal forma que sean capaces de disipar grandes cantidades de energía, lo que se traduce en tener desplazamientos laterales de la estructura tales que provoquen la fluencia de sus miembros, conduciendo al incremento en el amortiguamiento. Las deformaciones inelásticas, por lo general se presentan en las conexiones viga-columna, lo que produce daño estructural. Es por ello que el uso de disipadores de energía es una buena alternativa para reducir el daño y mejorar el comportamiento de los edificios.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Los códigos vigentes para el diseño sismo-resistente consideran que las estructuras que cumplen los requisitos que éstos establecen y son capaces de disipar la energía introducida por un sismo. No obstante, aunque se ha estudiado la influencia de la resistencia y ductilidad en el comportamiento sísmico de las estructuras, aún no hay suficiente información para evaluar la demanda y capacidad de disipación de energía en las estructuras que se ven afectadas por un sismo.

Queda claro que es importante conocer o, al menos, estimar con buena certidumbre el comportamiento de las estructuras ante sollicitaciones sísmicas. El ingeniero civil debe ser capaz de proporcionar a sus estructuras suficiente seguridad, como para que resistan las demandas sísmicas; cuando no se logra esto se presentan inminentes fallas en las estructuras como, por ejemplo, lo son la formación de articulaciones plásticas en los nudos, las fallas por piso débil, las fallas en la cimentación, etc.

El intento por reducir los daños provocados por temblores ha llevado al desarrollo de elementos que se incorporan en las estructuras para modificar sus propiedades dinámicas y, en algunos casos, incrementar su capacidad de disipación de energía.

## 1.2 Objetivos y alcances

En esta investigación se estudia la influencia que los dispositivos disipadores de energía del tipo ADAS (Added Damping and Stiffness), tienen en el comportamiento de los edificios, cuando son éstos sometidos a fuerzas sísmicas. El objetivo es investigar la influencia que los disipadores de energía tienen en edificios con distintas características dinámicas, apoyándose en criterios como la energía de entrada al sistema, la energía disipada y la respuesta de las estructuras, evaluada mediante su comportamiento en desplazamientos y cortantes en la base.

Se estudian dos casos teóricos; un edificio de cuatro niveles, edificio de periodo corto, y otro de veinte, edificio de periodo largo. Además, se analiza también un caso práctico, *La Torre Ángel*, que es un edificio que se construirá en el Distrito Federal, en la zona de transición. Como parámetros importantes para este estudio se analizan:

i) El periodo de la estructura

ii) En una primera instancia, es decir, solo para el edificio de periodo corto y no para el resto de los casos estudiados, el porcentaje de rigidez lateral que toman los dispositivos disipadores, con respecto al total.

iii) Los diferentes umbrales de cedencia, también conocidos como los límites fluencia, de los disipadores.

Se busca esclarecer cuáles variables deben ser consideradas al diseñar estructuras con disipadores, así como la influencia que cada una de estas variables tiene en el diseño.

Otro objetivo de esta investigación consiste en establecer un método para el diseño sísmico, empleando este tipo de dispositivos reductores; no se abarcará el diseño de los dispositivos detalladamente aunque sí se menciona el procedimiento para diseñar este tipo de sistemas disipadores.

## CAPÍTULO 2

### PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis, se divide el estudio en las siguientes fases:

a) Descripción del estado actual del conocimiento sobre algunos de los distintos dispositivos reductores de respuesta que existen o se han usado, la forma en que estos mecanismos deben modelarse para conseguir representar su comportamiento y la manera en que los diferentes tipos de suelo influyen en la forma de trabajar de los edificios que contienen disipadores.

b) Análisis de la influencia que tienen en los edificios los disipadores, con comportamiento histerético; en particular, los sistemas tipo ADAS.

Para conocer la influencia que los disipadores de energía tienen en la respuesta de los edificios, se estudiarán, como ya se mencionó, dos casos teóricos y un caso práctico. El objetivo de analizar los dos casos teóricos es indagar los parámetros que deben considerarse al analizar edificios provistos de dispositivos reductores de respuesta histeréticos, y evaluar la influencia que cada uno de los parámetros estudiados tiene en el comportamiento de la estructura.

El caso práctico tiene como finalidad recapitular las experiencias adquiridas en los casos teóricos y utilizarlas en el diseño de un modelo cuyos parámetros, como la geometría o la distribución de rigidez lateral, no sean tan controlados como se logra en los casos de estudio teóricos.

## 2.1 Parámetros a evaluar

Los parámetros que se evaluarán para estudiar la influencia que los disipadores de energía histeréticos del tipo ADAS tienen en los edificios provistos de ellos son:

i) El periodo de la estructura. Se considera que este parámetro es de suma importancia, ya que en función del periodo de la estructura es que se obtienen las aceleraciones con las cuales se calculan las fuerzas sísmicas.

ii) El porcentaje de rigidez tomada por los ADAS. Dependiendo del porcentaje de rigidez que toman los dispositivos disipadores con respecto a la rigidez total del edificio se obtienen diferentes respuesta, ya que cuando los disipadores fluyen, estos pierden rigidez y hacen que el periodo global del edificio se alargue, así que dependiendo de la cantidad de disipadores que se tengan en la estructura variará *el periodo con respecto al periodo inicial*.

iii) El umbral de cedencia de los ADAS. El umbral de cedencia o límite de fluencia de los disipadores es un parámetro importante, ya que este debe

escogerse de tal forma que ante alguna fuerza relativamente pequeña, como la de un sismo de magnitud menor a la del sismo de diseño o la presencia de vientos no haga que los disipadores trabajen en el rango inelástico.

Para determinar la influencia de cada uno de los parámetros estudiados, es decir, el periodo de la estructura ( $T$ ), el porcentaje de rigidez lateral tomada por los disipadores ( $K_{ADAS}$ ) y el umbral de cedencia de estos últimos ( $\Delta_y$ ), expresados como una fracción del coeficiente sísmico ( $C_s$ ), se analiza, como ya se mencionó con anterioridad, en primera instancia el caso teórico 1: *Edificio de cuatro niveles*. Posteriormente el caso teórico 2: *Edificio de veinte niveles* y, finalmente, el caso práctico; *La Torre Ángel*.

Los parámetros evaluados en este estudio se resumen de la siguiente manera:

**Tabla 2.1**  
**Parámetros evaluados**

$U_y \eta(C_s)$	T = 0,600 seg.			T = 2,000 seg.	T = 3,419 seg.
	$K_{ADAS} = 25 \%$	$K_{ADAS} = 50 \%$	$K_{ADAS} = 75 \%$	$K_{ADAS} = 75 \%$	$K_{ADAS} = 75 \%$
Lineal	*	*	*	*	*
0,2000	*	*	*	*	*
0,1600	*	*	*	*	*
0,1000	*	*	*	*	*
0,0600	*	*	*	*	*
0,0250	*	*	*	*	*
0,0125				*	

Una vez escogidos los parámetros a estudiar, cada uno de los edificios de los casos de estudio se analiza bajo la acción de distintos acelerogramas; así, para el edificio de periodo corto se hacen dos análisis: uno con el acelerograma

correspondiente al sismo de "El Centro", ocurrido en 1940 y registrado en una zona de terreno firme, y otro con la componente en la dirección Este – Oeste del acelerograma del sismo "CU", registrado también en una zona de terreno firme, ocurrido en 1985. Se escogen estos dos sismos de análisis para esta estructura porque, para conseguir que los dispositivos disipadores trabajen, es necesario que existan desplazamientos en el edificio, y una manera de lograrlo es que la frecuencia de excitación esté cercana a la frecuencia del sistema.

Debido a que los dos sismos empleados en el análisis de este edificio se registraron en suelo rígido, éstos tienen un contenido de frecuencias relativamente altas, lo que se asocia con periodos cortos, y por ello se espera que estos sismos de análisis hagan que trabajen los sistemas disipadores.

El edificio de veinte niveles, edificio de periodo largo, se analiza con la componente en la dirección Este – Oeste del acelerograma de SCT, registrado en terreno blando en 1985. Este mismo sismo se utilizó para el análisis de la Torre Ángel. Para estos casos, igual que para el caso de estudio 1, se eligen los acelerogramas de tal forma que se espera que se logre excitar los edificios con frecuencias cercanas a las frecuencias asociadas a los primeros modos de vibrar, de cada una de las estructuras analizadas.

De nuevo, se busca que los edificios estudiados sean, en principio, vulnerables a los diferentes sismos de análisis utilizados para cada uno de ellos. Esto va de la mano con la idea que se emplea en el diseño estructural, en el que se deben considerar todas las sollicitaciones a las que puede verse sujeta una estructura,

estructura, para así garantizar la integridad de la misma; una vez que sea demandada su resistencia.

Para cada uno de los tres casos estudiados se hace un análisis, paso a paso, no lineal, considerando que la no linealidad se localiza exclusivamente en los dispositivos histeréticos y que el resto de sus componentes trabaja en el intervalo elástico. Se analizan las respuestas obtenidas, en cortante en la base, los desplazamientos absolutos, los desplazamientos relativos, las diversas energías y los ciclos histeréticos obtenidos para los disipadores, a fin de hacer un estudio de la influencia que este tipo de sistemas disipadores tienen en los edificios.

Es importante aclarar que, tanto para los cortantes como para los desplazamientos, se analizan y comparan los valores máximos pico a pico; pero también los valores máximos obtenidos en "rms" *root mean square* (raíz media cuadrática), ya que se considera que esta medida es un índice del comportamiento global, no así los valores pico a pico, que únicamente reportan los valores máximos obtenidos en algún momento de la historia de excitación a la cual se someten las estructuras.

Para el caso de las energías, se analizan y comparan la energía de entrada ( $E_I$ ), la energía cinética ( $E_K$ ), la energía disipada por el amortiguamiento propio de la estructura, llamada energía de amortiguamiento modal ( $E_D$ ) y la energía disipada por histéresis en los dispositivos disipadores de energía ( $E_H$ ), en este caso, los ADAS.

Finalmente, se hace un balance de todos los resultados obtenidos al evaluar cada uno de los parámetros, para ver la contribución de los disipadores en el comportamiento de los edificios.

## 2.2 Respuesta de los edificios

En cada uno de los edificios, después de hecho el análisis, se estudiará su respuesta tomando en cuenta los parámetros clásicos, como lo son los desplazamientos y los cortantes; pero, además, se analizará el comportamiento de los edificios atendiendo a parámetros que no son de uso tan común, como el enfoque energético y las ductilidades que presentan los disipadores de energía.

## 2.3 Hipótesis de esta investigación

En esta investigación se parte de las siguientes hipótesis:

- i) El uso de dispositivos disipadores de energía, tipo histerético, reduce la respuesta dinámica de los edificios cuando se ven sometidos a excitaciones sísmicas.
- ii) Para dimensionar los dispositivos disipadores de energía existe una proporción de rigidez entre el edificio y el sistema de disipación de energía, así como un umbral de cedencia de los disipadores para los cuales se obtiene un comportamiento óptimo de la estructura.

## CAPÍTULO 3

### DISPOSITIVOS REDUCTORES DE RESPUESTA

**Antecedentes.** La teoría actual de diseño sísmico de edificios se basa en disipar la energía inducida por sismos, aprovechando la ductilidad que aquellos son capaces de desarrollar y la formación de zonas de plastificación total o parcial sin que éstas lleguen a ocasionar que se presenten mecanismos inestables que produzcan el colapso. Desafortunadamente, este comportamiento puede producir agrietamientos indeseables, y un gran nivel de daño en la estructura.

La mayoría de los reglamentos de construcción para zonas sísmicas utilizan la ductilidad o reserva inelástica como una manera de absorber las grandes demandas de resistencia de una estructura sometida a un sismo intenso. Los sismos ocurridos recientemente, como el de Northridge, California (1994), el de Turquía (1999), el de la India (2001), o el de Kobe en Japón (1995), mostraron fallas inesperadas en las estructuras, evidencia de que el comportamiento de la estructura no fue tan dúctil como se esperaba. Como una alternativa para disipar o aminorar la cantidad de energía que fatiga a las estructuras surgen diversos *mecanismos disipadores de energía*.

A partir de finales de los noventas creció considerablemente el número de dispositivos fabricados en el mundo. Paralelamente con este crecimiento, diversas instituciones de investigación han invertido, tanto esfuerzo como tiempo para el estudio analítico y experimental de estructuras con estos sistemas.

De acuerdo con la función o la forma en que trabajan los distintos dispositivos, éstos se han agrupado en dos grandes bloques: *dispositivos de control pasivo* y *dispositivos de control activo*.

### 3.1 Dispositivos de control pasivo

Básicamente, existen cuatro sistemas principales desarrollados hasta ahora:

- Disipadores de energía.
- Aisladores de base.
- Osciladores resonantes.
- Cables de preesfuerzo.

#### 3.1.1 Disipadores de energía

Este tipo de dispositivos modifican la rigidez de la estructura y su finalidad es concentrar en ellos la mayor parte de la disipación de energía. Su funcionamiento depende básicamente de los desplazamientos relativos de entrepiso; normalmente se ubican en contravientos, y tienen el objetivo de disminuir o eliminar la disipación de energía histerética en las conexiones viga-

columna de la estructura. También se han usado en combinación con aisladores de base.

De acuerdo con la manera en que disipan energía, pueden agruparse de la siguiente manera:

- Dispositivos de materiales con comportamiento elasto-plástico.
- Por extrusión.
- Por fricción.
- Dispositivos de materiales con comportamiento viscoelástico.

a) *Comportamiento elasto-plástico*. Estos dispositivos disipan energía mediante el comportamiento histerético de sus componentes; su comportamiento idealizado es semejante al mostrado en la figura 3.1. La pendiente de la zona inelástica depende de las características de cada dispositivo y la disipación de energía es más grande, conforme se incrementa el área bajo la curva.

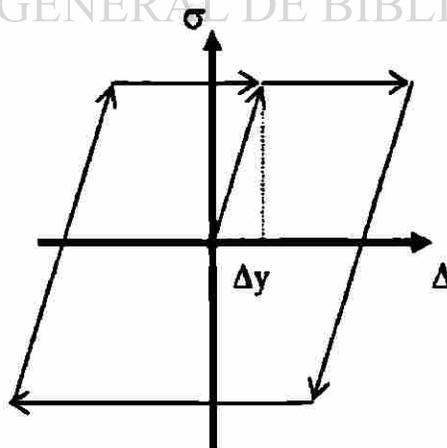


Fig. 3.1 Comportamiento elasto-plástico.

Existe una gran variedad de mecanismos creados con este concepto. Diversos dispositivos con este comportamiento han sido diseñados y estudiados por distintos investigadores, como por ejemplo, Skinner estudió un sistema formado por dos placas en forma de "U", que disipan energía al desplazarse una cara con respecto a la otra (figura. 3.2 a).

Scholl propuso un sistema formado por acero y hule para que se instalase en el cruce de dos contravientos, la adición de este dispositivo incrementa el amortiguamiento y la rigidez del marco.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha estudiado el comportamiento de dispositivos disipadores de energía en forma de "U" (figura.3.2 b y c), cuyo comportamiento es muy estable y el número de ciclos de carga que soportan depende de la amplitud de deformación a la que se sometan.

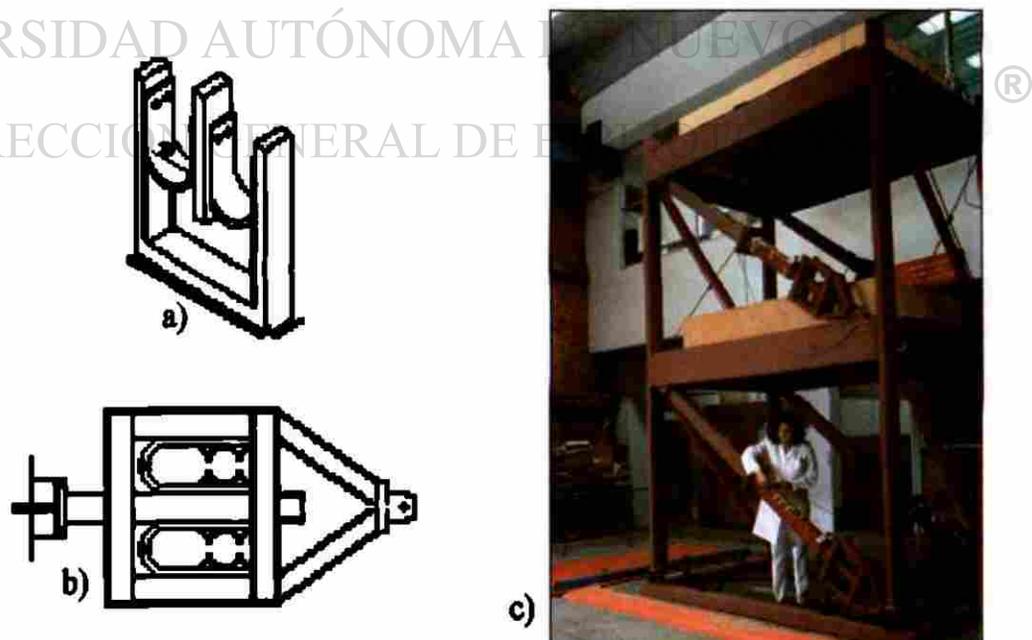


Fig. 3.2 Dispositivos disipadores tipo solera.

Otro tipo de sistema muy utilizado es el denominado ADAS (Added Damping and Stiffness), el cual tiene forma de "X".

Este tipo de sistema está compuesto por placas de acero estructural de sección variable, cuya forma se asemeja al perfil de un reloj de arena (figura 3.3); trabajan básicamente a cortante, plastificándose casi en su totalidad en doble curvatura y de esa forma se disipa energía por histéresis.

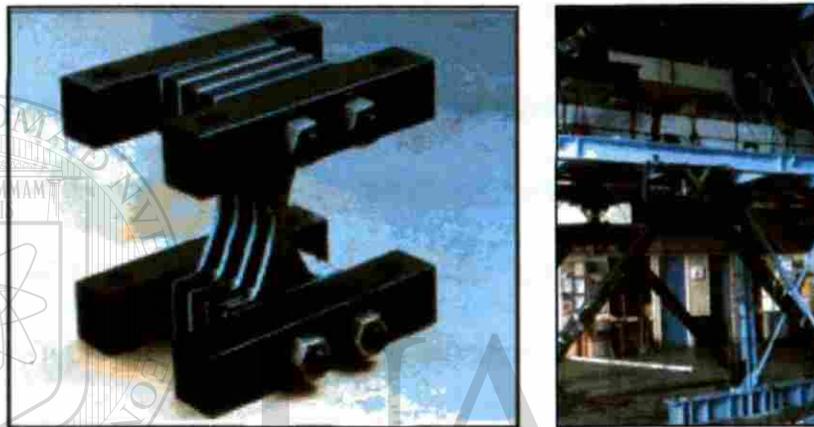


Fig. 3.3 Dispositivos ADAS.

El objetivo de variar 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 diagrama de esfuerzos casi uniforme en todo el peralte que cambia de signo en el eje neutro. En la figura 3.4 se muestran los dispositivos ADAS en dos vistas: la vista de frente y la vista lateral.

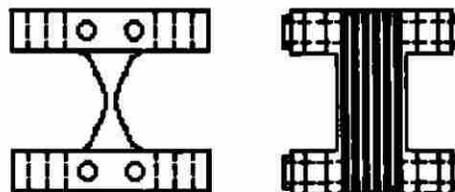
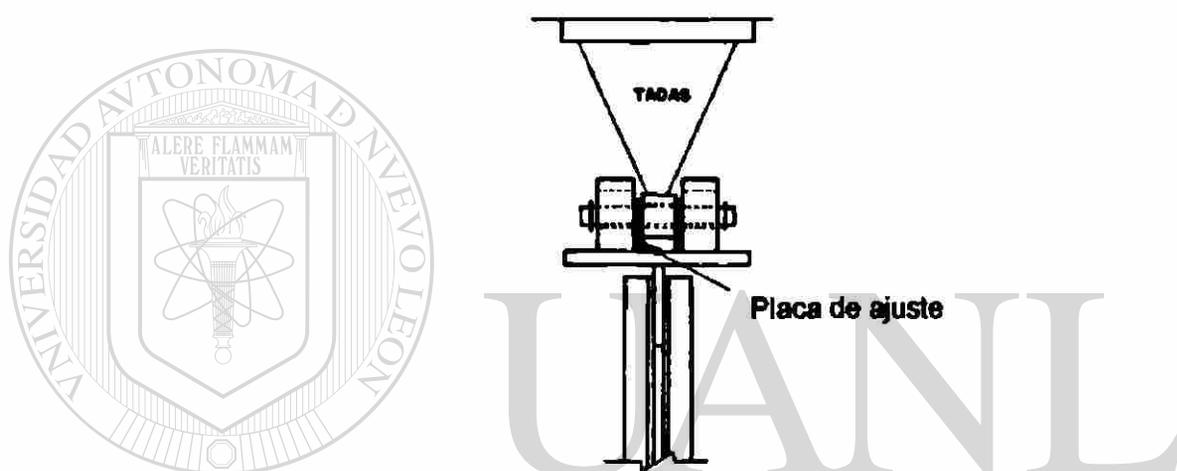


Fig. 3.4 Dos vistas del ADAS.

Una variación de los ADAS son los TADAS, estudiados por Tsai, consisten en una placa triangular. Las placas se empotran en uno de sus lados a otra placa de acero la cual se conecta al nivel superior del entrepiso. En el vértice del triángulo se colocan pernos que, a su vez, se conectan a contravientos que parten del nivel inferior del entrepiso, como se muestra en la figura 3.5. Debido al tipo de conexión, las placas se deforman en curvatura simple. Se ha observado que el comportamiento de este sistema es similar al de los ADAS.

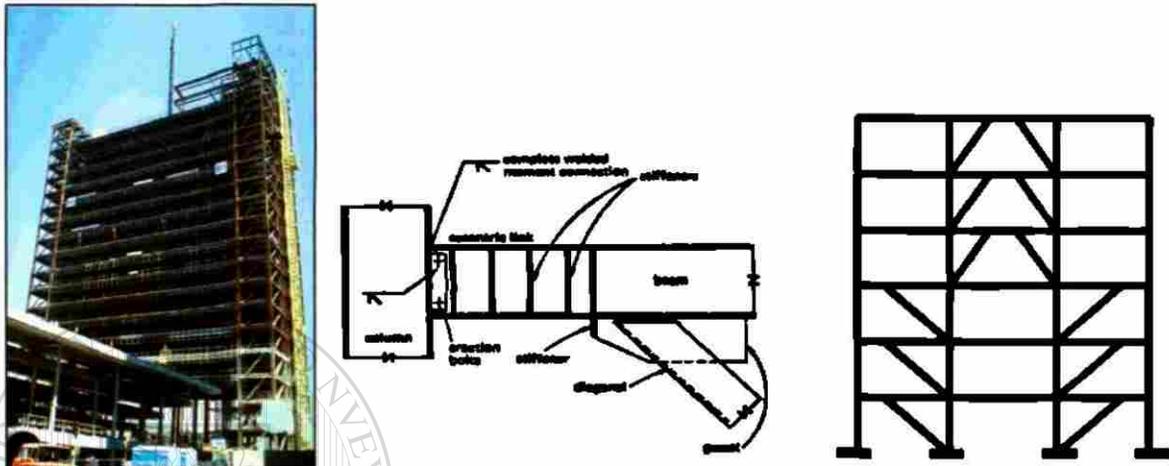


**Fig. 3.5** Dispositivos TADAS.

No obstante, se ha visto también que los resultados del modelo analítico del marco se acercan más al modelo experimental con este dispositivo debido a que la rigidez lateral de las placas, por causa de la manera en que se conectan, se puede predecir con mayor certidumbre que con las placas ADAS, en las que la rigidez depende en gran parte de la conexión con las placas de apoyo.

Otra alternativa que promete ser buena para la reducción de la respuesta mediante el comportamiento elastoplástico, que ya se ha empleado en la construcción de edificios, y que no requiere la adición de algún implemento

especial, sino que la disipación está en la estructura misma, es el uso de conexiones excéntricas. La vista de un edificio con este tipo de mecanismos de disipación de energía, un marco idealizado y el detalle de conexión excéntrica se muestran en la figura 3.6.



**Fig. 3.6** Edificio con marcos con contravientos excéntricos.

Este arreglo consiste en colocar una barra diagonal, desde el nudo del nivel inferior hasta un punto distante del nudo del nivel superior o, alternativamente, dos barras desde los nudos del nivel inferior, al centro de la viga superior, sin que se conecten en el mismo punto. Esto ocasiona que la parte de la viga ubicada entre la barra y el nudo o entre las dos barras fluya por cortante y disipe energía. Debido a la forma en que se conectan los elementos diagonales, es denominado de contravientos excéntricos.

*b) Disipación por extrusión.* En estos sistemas, la disipación se consigue al deformar un material en su sección transversal. Esto ocurre cuando se mueve el material disipador dentro de un tubo de sección variable (figura 3.7).

El sistema fue propuesto inicialmente por Robinson y Greenbank entre los años 1975 y 1976 y, posteriormente estudiado por Robinson en colaboración con Cousins en el año de 1987, para su uso en la construcción de dos puentes en Nueva Zelanda.

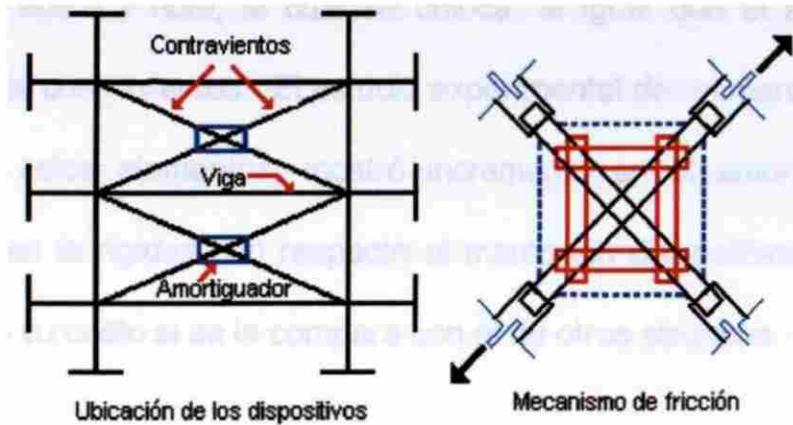


**Fig. 3.7** Disipador por extrusión.

El dispositivo se forma por un tubo de acero con corazón de plomo. Al deformarse el plomo, se disipa energía y, al recuperar su sección original, se recristaliza y recupera sus propiedades iniciales. El dispositivo fue sometido a ciento veintitrés ciclos de carga y descarga, con ciclos histeréticos casi rectangulares y sin degradación apreciable.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

c) *Disipación por fricción.* Este tipo de sistemas tiene un comportamiento que genera ciclos histeréticos rectangulares, la forma típica de estos dispositivos consiste en colocar dos placas, en la intersección de contravientos, en forma de cruz, de tal forma que al desplazarse lateralmente la estructura produzca esfuerzos de fricción, por el contacto entre las placas. (figura 3.8)



**Fig. 3.8** Disipador de energía por fricción.

El sistema mostrado en la figura anterior fue desarrollado por Pall y Marsh a principios de los ochentas. Se conecta con barras al marco y disipa energía por fricción, al desplazarse una diagonal con respecto a la otra. Este diseño busca evitar el deslizamiento bajo cargas de servicio, lo que da rigidez adicional al marco y, una vez que se alcance el umbral de cedencia, se inicia la disipación de energía por fricción. Estudios posteriores de este sistema fueron desarrollados por Pali en 1984 y, posteriormente se hicieron refinamientos en su modelación analítica por diversos investigadores como Filiatrault y Cherry entre finales de la década de los ochentas y principio de los noventas.

El modelaje analítico de edificaciones con estos sistemas ha mostrado que los desplazamientos laterales de los marcos con los disipadores son del orden de la tercera parte de los marcos solos, al ser sometidos a los registros sísmicos utilizados en el estudio.

Con este mismo principio existen diferentes variantes como las de Scholl, quien estudió un dispositivo desarrollado por Oiles Industry Co., Ltd of Tokio, Japón,

formado con acero y hule, el cual se coloca, al igual que el anterior, en la intersección de contravientos. El estudio experimental de un marco de un nivel, provisto con estos elementos, mostró incremento en el amortiguamiento y modificación en la rigidez con respecto al marco sin dispositivos. La principal desventaja es su costo si se le compara con el de otros sistemas.

Nims con ayuda de sus colaboradores determinaron la respuesta analítica de un marco de seis niveles, escala 1/3, probado con anterioridad en el laboratorio, con un elemento disipador por fricción. Encontraron que la fuerza de fricción que se desarrolla es proporcional al desplazamiento relativo entre sus extremos.

El disipador está conformado por un cilindro de acero que en su interior tiene resortes con bordes de bronce en los extremos. La respuesta analítica se comparó con la respuesta obtenida del marco trabajando solo y del marco con diagonales. Los desplazamientos del marco con el dispositivo disipador resultaron ser de la mitad de los obtenidos para los otros dos modelos, a pesar de que los cortantes son prácticamente iguales; para el marco solo y para el marco con el dispositivo. El marco con diagonales genera fuerzas cortantes equivalentes al triple de los dos modelos anteriores.

Otros investigadores, como Grigorian y Popov, probaron un par de dispositivos. En el primero, la fricción ocurre entre dos superficies de acero y en el segundo entre acero y latón. Las placas se unen por medio de un perno con un agujero; esto con el afán de permitir el desplazamiento. Los elementos se colocan en

diagonales, de tal suerte que si la carga axial sobre estos excede un umbral, el sistema se desliza y disipa energía por fricción. Los ciclos histeréticos de los dispositivos son muy estables y casi rectangulares. Los dispositivos se incorporaron en un modelo de tres niveles en los laboratorios de la Universidad de Berkeley, en California. Los primeros resultados publicados han dejado ver que el sistema no tiene degradación, tras haber sido sometido a varios temblores.

Con una colocación estratégica de estos sistemas en un edificio, se incrementa la cantidad de energía que pueden absorber durante un sismo severo; además, tienen la ventaja de que no necesitan mantenimiento durante la vida útil del edificio y no requieren ser reemplazados después de un terremoto.

d) *Disipadores con comportamiento visco-elástico.* Este tipo de disipadores se colocan de forma similar a los de fricción; sin embargo, su comportamiento es el

correspondiente a materiales viscoelásticos. Como es sabido, los materiales visco-elásticos se comportan como sólidos elásticos, pero también tienen las propiedades de los fluidos viscosos. Debido a estas características, son capaces de regresar a su forma original después de la deformación, pero disipan una cierta cantidad de energía por calor. Este tipo de disipadores son parecidos a los amortiguadores de un carro. En México, recientemente se utilizaron en la estructuración del edificio *Torre Mayor*, el cual es actualmente el edificio más alto construido en nuestro país.

En la figura 3.9, se muestra la vista general de la Torre Mayor así como algunos detalles de la manera en que se montan los amortiguadores viscosos.



**Fig. 3.9 La Torre Mayor.**

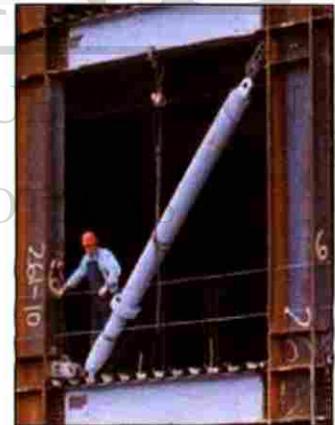
En la figura 3.10 a) se aprecia cómo son físicamente, en figura 3.10 b) se muestran las pruebas hechas a estos dispositivos y en la figura 3.10 c) puede verse un amortiguador colocado en un edificio.



a) Amortiguador



b) Pruebas de laboratorio



c) Amortiguador colocado

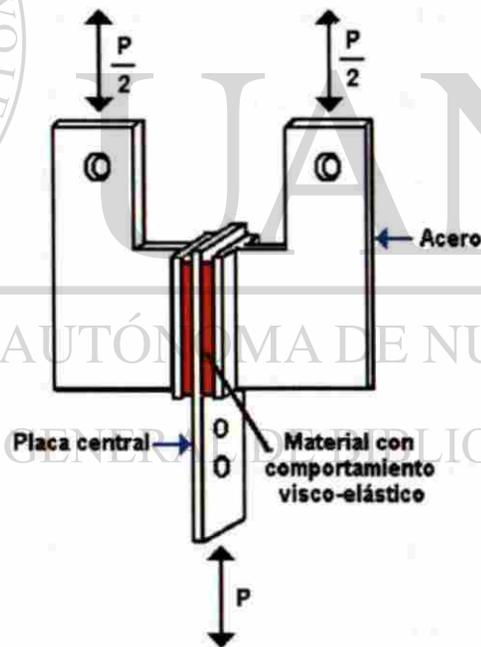
**Fig. 3.10 Amortiguador viscoso.**

Es importante resaltar que las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los polímeros visco-elásticos son función del nivel de deformación a cortante del

material, su coeficiente de expansión por temperatura y la frecuencia con la que se cargan. Estas variables deben ser cuantificadas y consideradas cuando se implanta este tipo de sistemas a un edificio.

Los amortiguadores viscosos requieren grandes desplazamientos relativos para empezar a trabajar, así que el diseño ante cargas laterales tiene que considerar la contribución en rigidez y, por ende, la variación del periodo que estos materiales proporcionan a la estructura.

Se han llevado a cabo estudios experimentales de marcos provistos con estos dispositivos como el que aparece en la figura 3.11.



**Fig. 3.11** Disipador con comportamiento visco-elástico.

Los resultados obtenidos de las pruebas a este tipo de dispositivos muestran un fuerte incremento del amortiguamiento del marco y reducciones importantes en la respuesta. Esta misma conclusión fue obtenida en un estudio hecho por

Aiken y su grupo de colaboradores, quienes encontraron que los incrementos de temperatura generados durante la prueba son "despreciables", en el material viscoelástico.

Soong y Mahmoodi también estudiaron el comportamiento de este sistema, cuando la temperatura varía de 22° C a 35° C. Encontraron una fuerte dependencia del amortiguamiento, como función de este parámetro, por lo que se debe cuidar especialmente.

Kirekawa y Asano realizaron, a principios de los noventa una prueba experimental sobre un marco de acero de un nivel, con un disipador viscoelástico de acrílico. Las curvas histeréticas del disipador se mostraron estables, lo que pone en evidencia una buena capacidad de disipación. No obstante, el amortiguamiento también depende de la temperatura ambiente a la que se lleve a cabo la prueba.

Chang, *et al.* (1992) proponen un procedimiento de diseño para el análisis de estructuras con disipadores viscoelásticos. Ellos obtuvieron las fórmulas propuestas con base en resultados de estudios analíticos y experimentales de un modelo de laboratorio de cinco niveles de acero, escala 2/5.

Constantinou, *et al.* (1993) probaron un amortiguador consistente en un pistón de acero con un orificio de bronce que contiene en su interior fluido viscoso con comportamiento viscoelástico. A diferencia de otros dispositivos del mismo tipo, éste reduce los desplazamientos laterales y los momentos flexionantes, sin introducir fuerzas axiales importantes.

El análisis de un modelo de acero de tres niveles mostró reducciones de la respuesta de dos a tres veces, con respecto al marco sin los dispositivos, al someterse al registro del temblor de "El Centro", 1940. También se incorporaron los amortiguadores viscosos en un puente apoyado sobre aisladores, para incrementar su capacidad de disipación. Los resultados incrementaron el amortiguamiento del sistema, hasta un valor cercano al 50% del crítico. Desafortunadamente, una limitante de los dispositivos con este comportamiento es que su comportamiento histerético depende de la frecuencia de la excitación.

En general, los dispositivos de fricción y los viscoelásticos parecen ser una manera efectiva de reducir la respuesta sísmica de las estructuras, minimizando el daño, tanto estructural como no estructural. Además, son atractivos para la reestructuración de los edificios existentes.

Tal vez por la poca experiencia que se tiene en el uso de estos sistemas, se piensa que también parecen ofrecer ahorros en el costo inicial de la estructura y en los costos de reestructuración de los edificios existentes; sin embargo, tienen también desventajas, como por ejemplo: son efectivos únicamente en estructuras flexibles, es decir, estructuras en las que los amortiguadores estarán sujetos a deformaciones grandes y también presentan el problema de que encarecen el diseño, a excepción de los amortiguadores viscosos, también se complica la forma de considerar la alteración en la rigidez de la estructura, además, debido a que el comportamiento de estos dispositivos es no-lineal; pues siempre que se usan debe hacerse un análisis de ese tipo.

En el caso de los dispositivos de fricción otro problema es el de seleccionar el apropiado umbral de cedencia; porque si este es muy alto, existe el peligro de que ocurra daño estructural y no estructural, antes de que empiecen a trabajar, en cambio, si el umbral es muy bajo, cualquier mínima fuerza hará que trabajen innecesariamente y pondrá a la estructura en vibración.

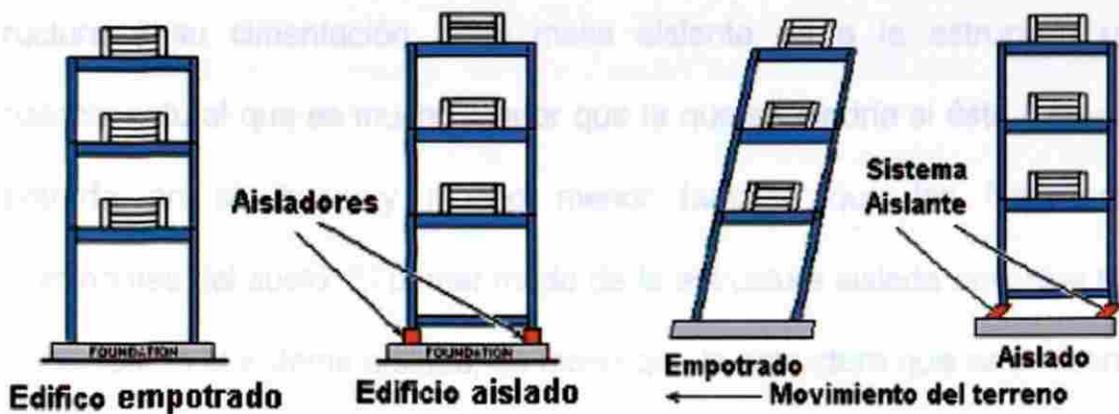
### 3.1.2 Aisladores de base

El concepto de aisladores de base es una técnica cuyo principio se basa en la posibilidad de proteger a las estructuras de los efectos de los temblores, añadiéndoles elementos flexibles; de tal suerte que se incremente el periodo fundamental, hasta un valor lo suficientemente lejano del periodo dominante de los sismos esperados.

Para garantizar esto, tales elementos flexibles se localizan normalmente en la base de la estructura; porque en tal caso, las deformaciones inducidas por las fuerzas sísmicas ocurren justo en ese nivel, logrando así que la estructura se mueva como un cuerpo rígido al desligarse del suelo.

En general, los componentes básicos del aislamiento de base son tres: los elementos flexibles que alarguen el periodo natural de la estructura; un amortiguador o mecanismo de disipación para controlar la deflexión de esos elementos flexibles en un nivel práctico y un mecanismo que provea al edificio la rigidez necesaria para limitar las vibraciones de la estructura sometida a las cargas que ocurren frecuentemente, como el viento y los sismos pequeños.

El comportamiento de un edificio con aislamiento es tal como se muestra en la figura 3.12.



**Fig. 3.12** Concepto de aislamiento de base.

En años recientes el aislamiento de base se ha convertido en una práctica recurrente, en las técnicas de diseño para edificios y puentes que se encuentran en zonas sísmicas de alto riesgo. Muchos tipos de estructuras han sido aisladas en su base y muchas otras se encuentran en la fase de construcción.

La mayoría de los edificios terminados y aquéllos que se encuentran en la etapa de construcción usan barras aislantes de neopreno, que de alguna manera les sirven como un sistema de aislamiento.

Hasta hoy, existe una variedad de sistemas de aislamiento de base que proveen estos tres componentes; sin embargo, parece que son dos los tipos básicos de sistemas de aislamiento. El sistema que se ha adoptado mayormente en los últimos años se basa en el uso placas de elastómero, ya

sea artificial o de fibras naturales. Con este tipo de dispositivos se busca, como ya se mencionó antes, desacoplar al periodo de la estructura o edificio, del suelo, interponiendo una malla aislante con poca rigidez horizontal, entre la estructura y su cimentación. Esta malla aislante da a la estructura una frecuencia natural que es mucho menor que la que se tendría si ésta estuviera empotrada en su base y mucho menor también que las frecuencias predominantes del suelo. El primer modo de la estructura aislada envuelve sólo deformación en el sistema aislado, de modo que la estructura que se encuentra sobre los aisladores siga siendo rígida. Los modos superiores que producen deformación en la estructura son ortogonales al primero y, consecuentemente, también al del suelo. Estos modos superiores no tienen tanta participación en el movimiento, así que, si existiese energía que viajara a altas frecuencias, ésta no podría ser transmitida a la estructura.

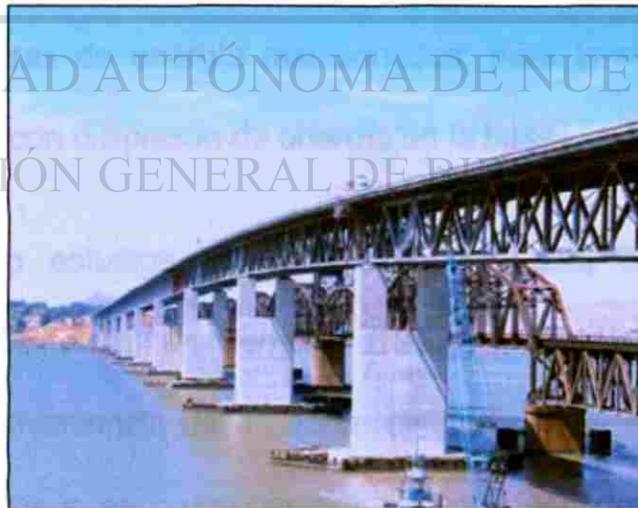
El sistema de aislamiento no absorbe la energía del terremoto, sino la desvía, con la dinámica del sistema. Este tipo de aislamiento trabaja cuando el sistema es lineal e inclusive si no está amortiguado; sin embargo, algo de amortiguamiento es benéfico para suprimir cualquier posible resonancia en la frecuencia del aislamiento.

El segundo tipo básico de sistema del aislamiento se caracteriza por el sistema deslizante. Este trabaja limitando la transferencia del cortante a través de la interfaz del aislamiento. Se han propuesto muchos sistemas deslizantes que resbalaban y se han utilizado algunos. En China hay por lo menos tres edificios con este sistema, que utilizan una arena especialmente seleccionada en la

interfaz deslizante. En África se ha implementado un tipo de aislamiento que conteniendo una placa conductora de bronce deslizante sobre acero inoxidable con un cojinete de elastómero, es eficaz para una planta de energía atómica.

El sistema *péndulo friccionante* es otro dispositivo deslizante que, usando un material diedro especial que resbala en el acero inoxidable, consigue funcionar como aislante. Este mecanismo ya se ha utilizado para varios proyectos nuevos y de reforzamiento de edificios en los Estados Unidos.

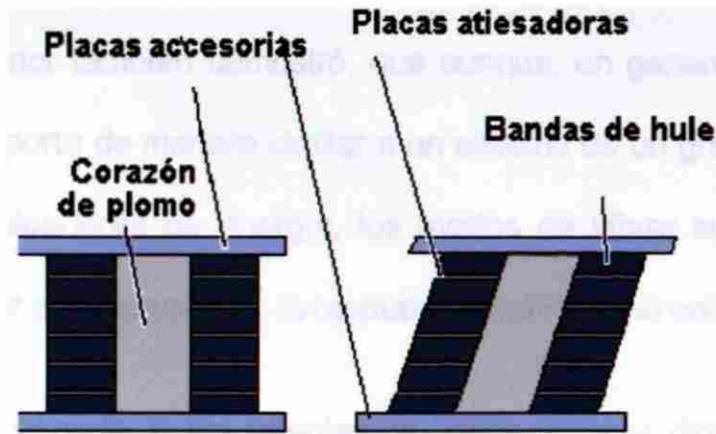
Las primeras aplicaciones de los aisladores de base actuales fueron utilizadas originalmente para puentes, debido a que estas estructuras normalmente se apoyan sobre placas de neopreno, para permitir el libre desplazamiento ocasionado por la variación en la temperatura. Esto permitió cambiar, sin mayor renuencia, de las placas de neopreno a los aisladores de base.



**Fig. 3.13** Puente con aisladores de base.

Entre los primeros aisladores de base fabricados comercialmente se encuentran los apoyos rectangulares o circulares formados con placas de neopreno

intercaladas con placas más delgadas de acero. Este tipo de sistemas se muestran en la figura 3.14.



**Fig. 3.14** Aislador de base.

Debido a la forma en que está construido, este sistema es muy flexible en su dirección horizontal, pero posee una gran rigidez vertical. Su disipación de energía es pequeña y su objetivo fundamental consiste en flexibilizar lateralmente la estructura. Los aisladores se han combinado con algunos de los

sistemas disipadores de energía mencionados; para tener, en conjunto una estructura flexible con disipación de energía en la base.

Se han realizado estudios de laboratorio con esta combinación, en la Universidad de California, en Berkeley (Kelly, et al., 1977). Estos estudios demuestran la conveniencia de adicionar disipadores de energía, para limitar los desplazamientos y tener un comportamiento adecuado, en condiciones de servicio. De acuerdo con los modelos analíticos del marco estudiado, se demostró que la reducción de la respuesta experimental se predice con suficiente certidumbre, si se considera que el disipador proporciona un

porcentaje de amortiguamiento crítico equivalente adicional de alrededor del 30 por ciento, para el primer modo de vibrar.

El estudio anterior también demostró, que aunque, en general, una estructura aislada se comporta de manera similar a un sistema de un grado de libertad, al incorporarle disipadores de energía, los modos de vibrar superiores pueden tener una mayor participación en la respuesta dinámica del edificio.

Tyler, desde la década de los setentas ha hecho pruebas dinámicas con estos aisladores y aunque el comportamiento histerético para un número elevado de ciclos de carga en los que se alcanzó la deformación unitaria al corte fue del 50 por ciento, el conjunto se comportó de forma muy estable y la disipación de energía fue pequeña.

El primer edificio aislado en su base construido en los Estados Unidos fue el

Centro comunitario de ley y justicia de la colina (*Foothill Communities Law and Justice Center*). Este edificio es un centro de servicios ubicado en el condado de Cucamonga, en San Bernardino, cuyo costo oscila alrededor de los 30 millones de dólares. Esta estructura se localiza a unos 97 kilómetros al este del centro de Los Ángeles, a unos 20 kilómetros de la falla de San Andres.

Se terminó de construir en 1985, cuenta con cuatro niveles, un sótano principal y otro secundario, para el sistema del aislamiento, el cual consiste en 98 cojinetes aisladores, de varias capas de caucho natural, reforzados con placas de acero.

La superestructura del edificio está formada por marcos de acero estructural, arriostrados en algunas crujeas. Una vista del edificio se aprecia en la figura 3.15.



**Fig. 3.15** Foothill Communities Law and Justice Center  
(Primer edificio con aislamiento de base)

El Condado de San Bernardino es el primero en los Estados Unidos en que en el estado tiene una cultura de prevención sísmica, la cual exige que el edificio esté diseñado para un sismo de 8.3 grados, en la escala de Richter, máxima magnitud esperada en el sitio. El diseño seleccionado para el sistema del aislamiento, que debe considerar el efecto de la torsión, incorpora una máxima demanda de desplazamiento de 380 milímetros en los aisladores de las esquinas del edificio. Tuvieron que hacerse pruebas a los cojinetes, para verificar esta capacidad.

Skinner junto con su grupo de colaboradores, en el año de 1976, estudiaron el comportamiento de una planta nuclear, aislada con dispositivos de acero en cantiliver, que disipan energía por comportamiento inelástico. Encontraron una reducción de las fuerzas y desplazamientos de diseño, de hasta diez veces.

También se ha utilizado aislamiento en plantas nucleares convencionales y, gracias a esto, se simplifica grandemente el diseño, los costos y el tiempo consumido en el diseño, además del equipo especializado que se requieren para pilotear o utilizar algunos otros medios para soportar la carga sísmica; por otro lado, cuando las demandas sísmicas del diseño se incrementan; debido, por ejemplo, al descubrimiento de fallas próximas, la planta no necesita ser rediseñada, pues sistema de aislamiento es suficiente para resistir las demandas sísmicas.

Robinson y Tucker realizaron estudios con un aislador en el que se insertó un corazón de plomo, con la finalidad de disipar energía. La principal ventaja de este tipo de aisladores es el incremento sustancial de la disipación de energía, gracias a los ciclos histeréticos que presenta.



**Fig. 3.16** Aislador con corazón de plomo.

Para mejorar el comportamiento de los aisladores anteriores, sometidos a aceleraciones moderadas, Shimoda y su grupo de colaboradores propusieron que se redujera la sección del corazón de plomo en los extremos del aislador, colocando placas de hule verticales, entre el plomo y las placas horizontales. El comportamiento mejoró sustancialmente para aceleraciones menores que 100 gals. Para valores mayores de esa aceleración, el comportamiento es similar al aislador original.

**Análisis con modelos matemáticos, realizados por Lee y Medland, en los que incluyeron las propiedades mecánicas de los aisladores, medidas por ellos mismos, hechas a varias estructuras de seis niveles, sometidas a 19 tipos de temblores, con y sin aisladores, mostraron reducciones de la respuesta de hasta un 80 por ciento, con respecto a la estructura sin aisladores. Ellos incluso dan algunas recomendaciones de diseño para las estructuras aisladas.**

**En Japón, después de un lento comienzo, la investigación y desarrollo del aislamiento de base ha avanzado rápidamente. El primer edificio grande aislado en su base se terminó en 1986; aunque en Japón tales edificios requieren la aprobación especial del ministerio de la construcción, para el 30 de junio de 1998, ya se habían aprobado 550 edificios con aislamiento.**

**El avance tan rápido en el uso del aislamiento de base, en Japón, se debe a varias razones: por un lado, el presupuesto para la investigación y el desarrollo en la ingeniería es alto y cuenta con una cantidad asignada específicamente para el aislamiento de base y, complementando esto, se encuentra el agresivo sistema de ventas y la tecnología de las grandes empresas constructoras. El proceso de aprobación para construir un edificio aislado, que es directo y estandarizado y la alta sismicidad de Japón animan a los japoneses a favorecer las ventajas a largo plazo del análisis costo-beneficio durante la vida útil de los edificios; pues lo que impacta en la toma de decisiones es en lo que se refiere a diseños sísmicos.**

Los sistemas más comúnmente utilizados en el pasado fueron los cojinetes de caucho natural, con amortiguadores mecánicos, o los cojinetes mecánicos de caucho, propiamente. Recientemente, sin embargo, ha habido un aumento en el uso de aisladores de hule, con un alto amortiguamiento natural. Ahora hay varios edificios que utilizan este sistema; por ejemplo, el Centro de computo de la compañía de energía eléctrica en Sendai, provincia de Miyako.



**Fig. 3.17** Tohoku Electric Power Company, Japan.

El edificio aislado en su base más grande del mundo es actualmente el Centro computarizado postal del oeste de Japón, situado en Sanda, prefectura de Kobe. Esta estructura, de seis niveles, de 47.000 m<sup>2</sup>, se apoya en 120 aisladores de elastómero con un cierto número de amortiguadores de acero y de plomo adicionales. El edificio, cuyo período aislado es de 3.9 segundos, se localiza aproximadamente a 30 kilómetros del epicentro del terremoto de Hyogoken Nanbu, (Kobe) ocurrido en 1995, que ha sido el movimiento más severo experimentado en Japón.

La cultura en el uso del aislamiento en Japón continúa incrementándose, especialmente después de las consecuencias del terremoto de Kobe. Como resultado del adecuado comportamiento del edificio postal ha habido un rápido

aumento en el número de los permisos para construir edificios aislados, incluyendo muchos apartamentos y condominios.

Otros investigadores como Kiev, quien con su grupo de colaboradores estudiaron un marco de acero de cinco niveles, con aisladores de base, a escala 1/3, en el laboratorio de la Universidad de California en Berkeley. Se adicionó un sistema de seguridad que entra en funcionamiento al presentarse la falla de los aisladores y consiste en apoyos adicionales que disipan energía por fricción y limitan los desplazamientos, aunque incrementan las aceleraciones transmitidas a la estructura.

Tyler y Robinson encontraron satisfactorio el comportamiento de aisladores de base con corazón de plomo, para deformaciones unitarias por corte mayores que el 100%. Estudios posteriores, realizados por Rodwll, han corroborado el buen comportamiento del aislador, para un gran número de ciclos de carga.

Fujita revisó los sistemas desarrollados en Japón para aislar equipos. Los sistemas se han combinado con amortiguadores de aceite y fricción y/o disipadores. Las ventajas del uso de aisladores de base han quedado demostradas por Constantinon y Tadjbakhsh, quienes realizaron un estudio analítico mediante la teoría de vibraciones aleatorias y modelaron la excitación como un proceso no estacionario. Este modelo permitió analizar un gran número de casos, en que se concluye que los desplazamientos y las fuerzas cortantes se reducen de manera muy importante, al incorporar los aisladores.

Kelly y su grupo de investigadores estudiaron la superestructura de un puente sobre aisladores con y sin corazón de plomo. El aislador con plomo resultó efectivo para disipar energía y limitar los desplazamientos laterales. Encontraron también adecuado el método lineal equivalente, para el análisis de la estructura.

Otros investigadores como Tadjbakhsh y Lin estudiaron el uso de aisladores con fricción proporcional al desplazamiento. La variación en la fricción se logra mediante la colocación de dos cables que producen un incremento de la fuerza axial sobre las placas, al desplazarse lateralmente los aisladores. Los resultados muestran que el incremento de fricción reduce la respuesta de manera importante.

Griffith junto con su grupo de colaboradores, valiéndose de un modelo experimental de siete niveles, a escala 1/5, estructurado con muros de concreto sobre aisladores de base, formados de placas de acero y hule. El modelo fue sometido a varios temblores, entre los que se encuentra la componente E-W de la estación SCT del temblor del 19 de septiembre de 1985, de México. Ante la acción de temblores de gran magnitud la estructura se separó de los apoyos. Para evitar tal separación se propuso implantar un aislador con un dispositivo en el centro, que le permita trabajar en tensión y reducir los desplazamientos. La efectividad del dispositivo se comprobó al estudiar sobre un modelo de nueve niveles, sometido a varios temblores.

Nagarajaiah, alrededor de la segunda mitad de la década de los ochenta, junto con su grupo de colaboradores, desarrollaron un programa de computadora para análisis tridimensional de estructuras aisladas y gracias a eso lograron calibrar los resultados con estudios experimentales de otros investigadores. Posteriormente, aplicaron este programa y demostraron que el comportamiento biaxial tiene mayor importancia en los aisladores con fricción, que en los aisladores con corazón de plomo.

Un aspecto poco estudiado es el relacionado con la fatiga de los aisladores, afortunadamente investigadores como Roedor, quien realizó varias pruebas de laboratorio con aisladores de hule y acero para determinar la importancia de los parámetros que intervienen en el fenómeno. De acuerdo con los resultados, la variación de la temperatura y la amplitud de los ciclos de histéresis son las variables que más contribuyen al fenómeno, que puede llegar a representar un aspecto importante en el diseño.

Otros investigadores como Zayas y Bozzo, han propuesto y estudiado un sistema de aislamiento de superficie cóncava, basado en el movimiento de un péndulo, conocido como *sistema péndulo de fricción*, el cual consiste en un sistema articulado, deslizante sobre una superficie cóncava esférica, con una cara de acero. La superficie deslizante se cubre con teflón; esto se hace para minimizar la fricción entre las dos superficies en contacto. Debido a esta fricción, la estructura que se encuentra sobre este sistema responde, ante fuerzas pequeñas, como si estuviera empotrada en su base. Una vez superada la fuerza de fricción, la estructura responde como un péndulo, cuya respuesta

dinámica está controlada por el periodo natural del péndulo, y su amortiguamiento por las fuerzas de fricción. Similamente, mientras se alcanza el umbral de cedencia y se mueve sobre la superficie esférica, la fuerza restitutiva de gravedad ayuda a traer de vuelta al péndulo a su posición de equilibrio. Así que, la fuerza restitutiva es proporcionada por la forma del dispositivo.

El material con que se fabrica el péndulo es acero y en la zona de deslizamiento, cromo. Esto se puede ver en la figura 3.18.



Articulación deslizante con fricción

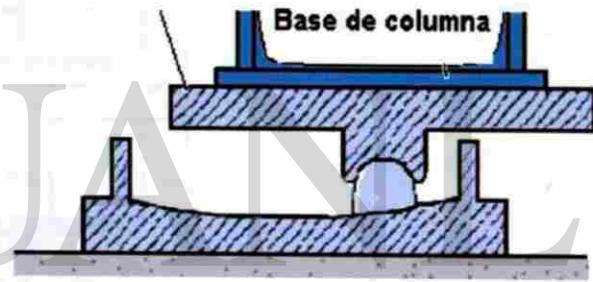


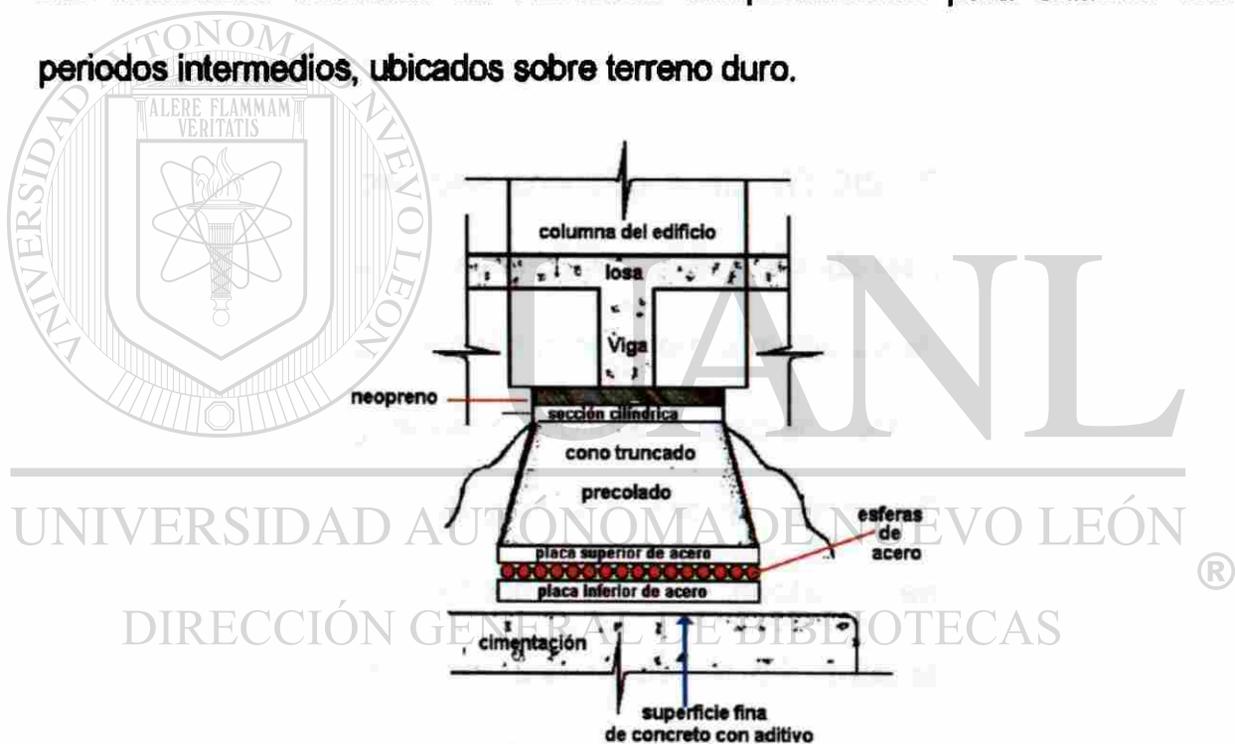
Fig. 3.18 Péndulo de fricción.

Debido a la geometría misma del aislador, el periodo no depende de la carga vertical aplicada y su rigidez es directamente proporcional a la carga, lo que hace que las torsiones provocadas por las concentraciones de masa en la estructura disminuyan en el nivel de aislamiento. Su principal desventaja es que el cromo, al igual que el teflón, se adhiere con el tiempo.

En México también se han hecho propuestas para utilizarlas como aislamiento de base. A mediados de los 60, el Ing. Manuel González Flores desarrolló un

sistema de aislamiento de base con placas de acero y balines (figura 3.19). Este sistema se incorporó a dos edificios de cinco niveles, que hasta la ahora han mostrado un buen comportamiento. La limitante principal de estos dispositivos es que carecen de un mecanismo disipador de energía que reduzca la demanda de disipación de la estructura. Sosa y Ruiz (1992) determinaron el comportamiento analítico de uno de los edificios de cinco niveles, incorporando disipadores de energía de solera en forma de "U".

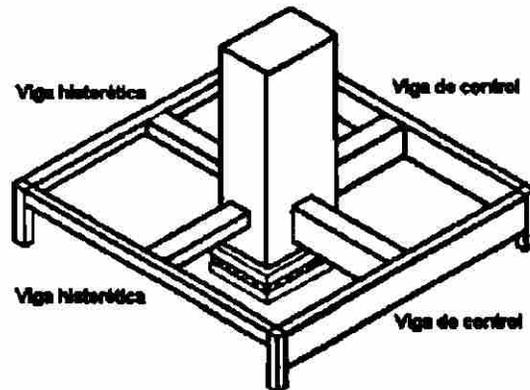
Los resultados muestran un adecuado comportamiento para edificios con periodos intermedios, ubicados sobre terreno duro.



**Fig. 3.19** Aislador de base, del Ing. Manuel González Flores.

Anderson propuso un sistema similar al del Ing. González, sólo que le incluyó dispositivos para el control de desplazamiento. Este sistema se aprecia en la figura 3.20. Según las pruebas hechas a un marco de diez niveles, reforzado con este sistema, gracias a este dispositivo se reducen en un 30 por ciento la

aceleración y los efectos  $P-\Delta$ , con respecto a otro marco que no se refuerza con este sistema.



**Fig. 3.20** Aislador con control de desplazamientos.

El Ing. Federico Garza Tamez, también mexicano, desarrolló un sistema de aislamiento sísmico pendular conocido como GT-BIS (Garza Tamez Base Isolator System). Este sistema incluye varias modalidades y tiene la ventaja de que se le puede incluir disipación de energía mediante el sistema que se ha denominado Amortiguamiento Rotular, también con dos modalidades, incluyendo y sin incluir amortiguamiento viscoso adicional. Este sistema tiene la facilidad de escoger el periodo natural de oscilación en los aisladores de manera que se puede lograr una reducción de hasta el 96 por ciento del cortante basal con respecto al que se produciría en una edificación empotrada en su base, además de que los efectos  $P\Delta$  no producen en este sistema efecto dañino alguno Garza, F. (2001). El sistema GT-BIS es un sistema de aislamiento cuyo funcionamiento se basa en la acción pendular y en el añadido de elementos que proporcionen el amortiguamiento previamente graduado considerado más conveniente; en este sistema no existe ningún tipo de daño asociado con grandes deformaciones. Se ha visto que el sistema GT-BIS es

por lo general más efectivo en reducir el cortante basal durante un sismo que otros tipos de aisladores. Garza, F. y Silva, F. L. (1999). Este sistema se ha usado para aislar la nave de prensa del periódico REFORMA en la ciudad de México y se han obtenido excelentes Resultados. Garza, F. y Silva, F. L. (1999).

Kaneko y su grupo de colaboradores estudiaron la efectividad de cuatro tipos de aisladores de base, colocados en estructuras reales, en Japón. Ellos analizaron dos aisladores de hule laminados, combinados con dispositivos amortiguadores viscosos y con disipadores formados por placas de acero; los aisladores de hule eran de alto amortiguamiento y los aisladores de hule, con corazón de plomo.

Dos de los edificios son de concreto reforzado de tres y cuatro niveles y uno de acero de ocho niveles. Estudiaron su comportamiento, según las solicitaciones de los sismos ocurridos en Japón, entre 1986 y 1989, con un intervalo de magnitudes entre 3.4 y 6.8. El comportamiento observado para estos eventos

muestra reducciones de entre el 40 y el 67 por ciento, en la máxima aceleración de la azotea, normalizada con respecto a la registrada en la cimentación. ®

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Algunos otros investigadores, entre ellos Buckle y Mayes determinaron analíticamente el comportamiento de un puente continuo de cuatro claros, colocando aisladores de base con corazón de plomo en los estribos. Se encontraron reducciones en los desplazamientos y fuerzas cortantes del 40% y 50% respectivamente.

Poco se ha avanzado en estudios que muestren la factibilidad económica de los sistemas aisladores de base. Kelly, junto con otros investigadores, hicieron una

estimación para una estructura aislada y otra sin aislar, según los métodos desarrollados por Ferrito (Jara, M. 1994). Las apreciaciones de los costos así obtenidas no pueden generalizarse, lo que reafirma la necesidad de realizar futuros estudios con este objetivo.

Como es bien sabido, la principal ventaja del aislamiento de base es que tiene la capacidad de reducir la respuesta de una estructura ante los sismos. Lo más importante es que el sistema de aislamiento de base reduce las aceleraciones que el terreno transmite hacia el edificio, lo que minimiza el daño a lo que este contiene. También el sistema de aislamiento de base es relativamente fácil de instalar y puede usarse en las estructuras como un sistema de refuerzo. Esto es particularmente ventajoso en el reforzamiento de los edificios históricos y los monumentos debido a que es mínimo su impacto en las formas arquitectónicas. Su principal desventaja consiste en que es funcional sólo para estructuras de

periodo corto, desplantadas en suelos que no presentan periodos dominantes largos y para las cuales las fuerzas del viento no dominan el diseño. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Un sistema de aislamiento de base requiere cierta rigidez para los diferentes grados de libertad que puede presentar la estructura. Como consecuencia de esto, en lugares donde no hay suficiente claridad para los requerimientos de rigidez, una estructura aislada está siempre en peligro de que su aislamiento no sea suficiente en alguna dirección y eso, para pulsos impredecibles en la aceleración, puede generar que la estructura sea vulnerable. En realidad, poco se sabe acerca de los efectos de plastificación de los aisladores, de cómo sus

propiedades físicas y químicas pueden variar al pasar el tiempo y de cómo estas propiedades se ven afectadas por los factores ambientales.

La integridad de un sistema de aislamiento de base depende totalmente de la integridad de los aisladores. El coeficiente de fricción de los sistemas deslizantes no puede determinarse con certeza; en particular, después de un periodo de inactividad. Las estructuras aisladas en su base necesitan ser analizadas para dos niveles de fuerzas sísmicas. Una que corresponda a las máximas fuerzas, antes de que el sistema empiece a trabajar y otra para la máxima intensidad sísmica, para la cual el sistema de aislamiento se supone completamente operativo.

Para los edificios con aislamiento sísmico, el modo fundamental de torsión está más cercano al modo fundamental de traslación de la estructura que su correspondiente caso de la estructura empotrada en su base. El aislamiento de base puede acercar los modos superiores de la estructura, a las frecuencias dominantes del movimiento del terreno que las excita. Como resultado de eso, puede incrementarse la respuesta de la estructura en estos modos superiores; también pueden afectarse las frecuencias altas de los elementos no estructurales. Debido a su comportamiento no lineal, los elementos amortiguadores añadidos a los sistemas aislantes para controlar los desplazamientos laterales pueden inducir aceleraciones altas en los pisos del edificio y puede que entonces ocurran daños en el interior.

Debido a la no linealidad de los sistemas de aislamiento y sus consideraciones para fuerzas grandes y pequeñas, el análisis para estructuras aisladas en su base se hace un tanto más complicado que el análisis convencional.

Presumiblemente, los edificios aislados son más caros que si se consideran empotrados. Como una generalidad se ha encontrado que no hay suficientes ahorros en el diseño de la superestructura para compensar los costos de los aisladores; pues el costo de una estructura con aislamiento es alrededor de un cinco por ciento más caro que lo que costaría una estructura empotrada.

Existe excepción en aquellas estructuras en las que se requieran dispositivos especiales para asegurar sus componentes no estructurales; por ejemplo, el edificio de dos niveles del Departamento de Bomberos en los Angeles resultó un seis por ciento más barato que lo que hubiera costado con un diseño convencional; sin embargo, los ahorros se compensan al no haber requerido dispositivos especiales para los componentes eléctricos o mecánicos.

Villaverde (1993), hace una revisión crítica de los sistemas de control activo y pasivo, y describe las principales estructuras en las que se han implantado. Del estudio se concluye que la aplicación de cada dispositivo depende de las propiedades dinámicas de los sismos y de las características propias de la estructura. Los costos actuales de estos sistemas deberán disminuir en un futuro, cuando su utilización se extienda de manera generalizada.

### 3.1.3 Osciladores resonantes

Un oscilador resonante está compuesto por una o varias masas adicionales, generalmente colocadas sobre el último nivel de la estructura o cercanas a éste, con ciertas propiedades dinámicas, cuyo propósito es reducir la respuesta de la estructura ante cargas dinámicas. La frecuencia de este sistema se escoge de tal forma para que se parezca a uno de los modos naturales del sistema. Se supone que estos dispositivos deben reaccionar y ser efectivos para excitaciones pequeñas.

El principio de operación de un sistema oscilador se basa en el hecho de que igualando su frecuencia a una de las frecuencias naturales de la estructura, ésta siempre se oponga al movimiento de la estructura y así desaparezca o disminuya la vibración de la estructura. Se ha aceptado que un sistema tal puede ser efectivo para reducir la respuesta de las estructuras sujetas a excitaciones de tipo armónico y también para contrarrestar las fuerzas de viento. Desafortunadamente no se puede extrapolar esto para los efectos que producen las cargas sísmicas.

La inclusión de una o varias masas adicionales, con propiedades dinámicas conocidas, sobre un edificio, puede reducir considerablemente su respuesta ante eventos sísmicos.

Den Hartog fue uno de los primeros investigadores interesados en el tema de sistemas con osciladores resonantes y demostró que con ciertos parámetros dinámicos del conjunto estructura- oscilador, pueden obtenerse reducciones

importantes de la respuesta. En un sistema de dos grados de libertad, si el periodo de la carga coincide con el periodo de vibrar del segundo nivel (piso adicional), el movimiento del primer nivel es nulo y el segundo se ve sometido a una fuerza de igual magnitud y sentido contrario a la fuerza de excitación. Debido a la existencia del amortiguamiento, ambas masas se mueven, pero los desplazamientos de la primera pueden reducirse de manera importante al elegir adecuadamente las propiedades dinámicas de la segunda masa. Cuando el sistema es elástico y las frecuencias están bien separadas, Den Hartog obtuvo expresiones para evaluar los parámetros del oscilador.

En la República de Armenia, investigadores como Korencv, Reznikov y Khachian, se han estudiado analíticamente y experimentalmente edificios de varios grados de libertad, con un piso adicional, sometidos a eventos sísmicos con características dinámicas diversas, obteniéndose reducciones de la respuesta a la mitad de la obtenida sin este (Jara, M. 1994).

Paniagua, es otro de los investigadores que han estudiado modelos matemáticos de un sistema de dos grados de libertad, considerando como masa adicional un tinaco con agua. La mayor reducción de la respuesta se encontró para excitaciones correspondientes a registros de la zona blanda del valle de México (temblores de banda angosta).

Generalmente, la masa y el amortiguamiento del piso adicional difieren considerablemente del resto de la estructura. Esto dificulta el análisis debido a la carencia de modos clásicos de vibrar. El problema ha sido tratado por varios

investigadores entre los que se encuentran: Warburton quien ha trabajado con Soni; Villaverde en colaboración con Newmark, Yang; Chen con ayuda de Soong, así como Ibrahim e Igusa. (Jara, M. 1994).

En la década pasada, se llevó a cabo un estudio analítico de un sistema de dos grados de libertad, en el que el primero representa a la estructura y el segundo a la masa adicional (Aguíñiga y Jara, 1993). Los resultados del análisis elástico permiten ver que una limitación importante para aplicar estos sistemas es que el oscilador se ve sometido a demandas de desplazamientos que resultan inalcanzables, desde un punto de vista práctico. No obstante, de acuerdo con lo hasta ahora obtenido, si se permite que la estructura tenga demandas de ductilidad moderadas, los desplazamientos del oscilador disminuyen considerablemente, lo que podría hacer aplicable al sistema. Los resultados no son todavía concluyentes, por lo que el estudio sigue en proceso.

Este tipo de dispositivos parecen ser una manera efectiva para añadirle amortiguamiento a una estructura y controlar así su respuesta dinámica. En comparación con otros sistemas de control de vibración, éstos ofrecen dos grandes ventajas: una es que su impacto en el diseño de la estructura es mínimo, debido a que una estructura en la que se utilicen estos medios no requiere procedimientos especiales de diseño y la otra es que son fáciles de diseñar y construir, no se requieren técnicas especiales y su construcción tampoco requiere personal muy calificado.

Como ventaja adicional, se tiene la particularidad de no depender de fuentes externas para su operación, que no interfieren con la trayectoria de cargas en la estructura, y que, además, pueden responder a pequeños niveles de excitación, sus propiedades pueden ser ajustadas en el campo, pueden ser considerados como sistemas de reforzamiento y una sola unidad puede ser efectiva para reducir las vibraciones inducidas por los sismos, el viento y el tráfico, requieren poco mantenimiento y pueden resultar costeables. La desventaja que puede presentar es que normalmente una masa grande requiere gran espacio para su instalación y su efectividad depende de su buena calibración.

Estos dispositivos son solamente efectivos para controlar la respuesta de uno de los modos de la estructura. Se requieren varias masas para controlar la respuesta de varios modos y su efectividad está limitada por la magnitud del máximo peso que pueda colocarse sobre la estructura.

#### 3.1.4 Cables de presfuerzo

Éstos se usan para rigidizar a la estructura e incrementar así la carga axial en las columnas, lo que se traduce en una reducción, sólo en algunas ocasiones, los giros en sus extremos. Estos sistemas tienen como objetivo aislar la cimentación, de la superestructura. Al colocarlos se alarga considerablemente el periodo fundamental de vibración de la estructura.

Los cables se han aplicado fundamentalmente en lugares donde los principales temblores que ocurren tienen gran contenido de frecuencias altas; de esa forma, la estructura se aleja de los periodos con amplificaciones importantes del

terreno. Los enormes daños provocados por los temblores de septiembre de 1985 obligaron a buscar sistemas alternativos de reparación y reforzamiento de las estructuras. Uno de los sistemas propuestos y usados en el reforzamiento de escuelas fue la inclusión de cables de presfuerzo, como contravientos de la estructura para incrementar su resistencia y rigidez, este sistema fue propuesto por Rioboo quien se ha preocupado por estudiar este tipo de fenómenos.

Se han llevado a cabo estudios analíticos y experimentales del comportamiento de estos sistemas, que muestran reducciones importantes en la respuesta al incorporar los cables. Aunque no es propiamente un sistema de disipación, el comportamiento de las estructuras analizadas con este dispositivo, lo hacen particularmente atractivo como una posible fuente para la reducción de daños sísmicos.

Los estudios anteriores se han limitado a estructuras pequeñas, con estructuras típicas de escuelas, sujetas a excitaciones sísmicas de registros cercanos a los epicentros (costa del pacífico de México) y alejados de ellos (Ciudad de México). Uno de los parámetros considerados en los análisis fue la variación de las fuerzas cortantes de entrepiso con la inclinación de los cables. Para los casos estudiados se concluye que, al graficar la fuerza cortante contra desplazamiento relativo del entrepiso, cuando se ha implantado el uso de los cables, el comportamiento lateral es prácticamente elástico, por lo que los edificios deben diseñarse para una demanda de ductilidad de uno.

La bondad del sistema se ha comprobado en estudios de edificios de uno y de dos niveles. La solución, sin embargo, es seductora para edificios pequeños y de mediana altura. Esto se comprueba en los estudios analíticos de Jara, *et. al.* (1992) y algunos otros investigadores como Gómez, donde se muestra que para edificios diseñados originalmente con demandas de ductilidad de dos y cuatro, éstas pueden reducirse de manera apreciable, al incluir los cables de presfuerzo (Jara, M. 1994).

### 3.2 Dispositivos de control activo

El control activo es un sistema que controla o modifica el movimiento de una estructura mediante fuerzas controladas externamente. En general, un sistema de control activo se haya compuesto por cuatro elementos: la estructura, los sensores, la unidad de control y los actuadores. Los sensores detectan la respuesta de la estructura y a la vez las características del movimiento del terreno que la excita.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La computadora procesa la información de los sensores, de acuerdo con un algoritmo, determina las fuerzas de control necesarias para contrarrestar el movimiento y activa los actuadores, los cuales, impulsados por una fuente de energía externa, inducen las fuerzas requeridas para compensar las fuerzas sísmicas o el cambio en las características dinámicas de la estructura.

Hasta la fecha, se han desarrollado dos tipos de control activo. En el primero, las fuerzas de control externo se usan directamente para balancear las fuerzas

símicas y en el segundo se utilizan para cambiar las propiedades dinámicas de la estructura, de tal forma que no pueda presentarse el fenómeno de resonancia de la estructura y el terreno. Así, el control activo se basa en el principio de eliminar las vibraciones de una estructura mediante la aplicación de fuerzas externas.

Se describen a continuación los principales sistemas desarrollados en la actualidad.

### 3.2.1 Masa activa

Este sistema es una extensión del sistema pasivo con osciladores resonantes.

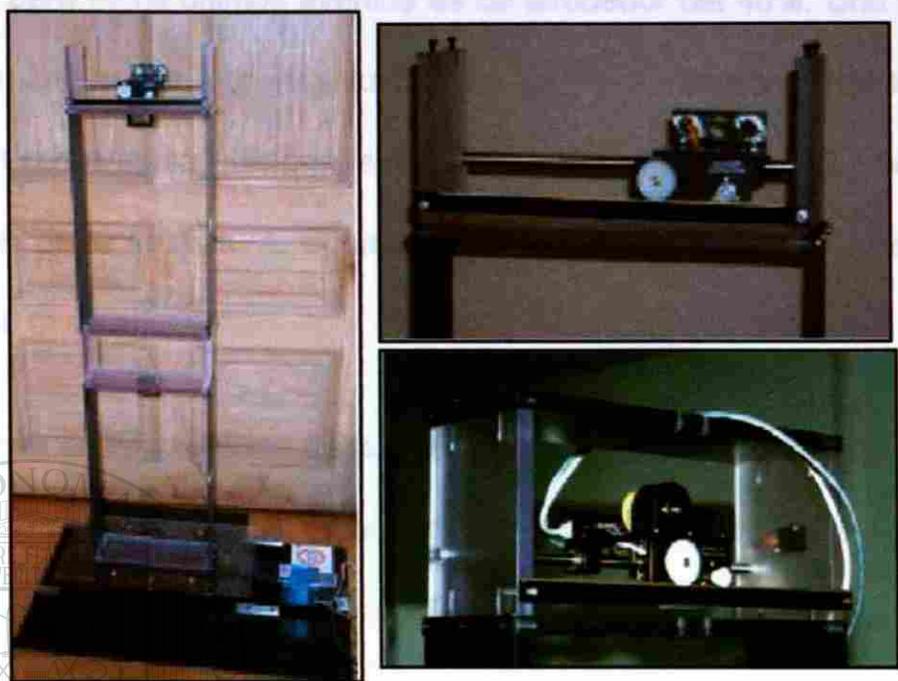
El movimiento de la masa sobre el último nivel de la estructura se controla por medio de una computadora que detecta el movimiento del edificio a través de los sensores y envía a los actuadores el movimiento que se debe aplicar a las

masas.

A diferencia del sistema pasivo, el activo controla el movimiento del edificio para temblores de banda angosta y de banda ancha.

La primera aplicación de este sistema se hizo en Japón, para un edificio de acero de 11 niveles, este proyecto fue desarrollado por Toyama. Las mediciones de la respuesta ante la acción del viento mostraron que el movimiento lateral del edificio es de alrededor del 30% del que tendría, si no existiera la masa activa.

La imagen de modelo a escala con dispositivos de masa activa se aprecia en la figura 3.21.



**Fig. 3.21** Modelos a escala, de masa activa.

Una de las principales desventajas de estos sistemas es la gran demanda de energía que se requiere para aplicar las fuerzas de control. Encaminados a ampliar la aplicación de estos dispositivos, se han propuesto diversos sistemas, como el descrito por Maebayash, quien propone un sistema de control similar al anterior, pero con el uso del sistema de masa tanto activa como pasiva, con lo que se logra disminuir la energía necesaria a la tercera parte, para el control de viento y sismos moderados. El sistema se encuentra instalado en Japón en un edificio de siete niveles (Jara, M. 1994).

Similar al anterior, Fujita, es otro investigador quien describe el estudio experimental de un modelo a escala natural, de seis niveles, en el que se

incorporó una masa de control activo para vientos y temblores moderados, que se convierte en pasiva para temblores de gran magnitud. La reducción de la respuesta para estos últimos eventos es de alrededor del 40%. Una propuesta similar es fue hecha por Kitaniura y su grupo de colaboradores, quienes incorporan como masa adicional seis tanques sobre aisladores de base, en el último nivel de la estructura. El sistema se incorporó en una estructura de 21 pisos y 130 m de altura.

La respuesta analítica de los desplazamientos con control activo representa el 35 % de la estructura sin control, cuando la masa actúa como sistema pasivo, la máxima reducción encontrada es del 10 %.

### 3.2.2 Tendones activos

Los tendones son contravientos colocados diagonalmente en forma de "X", que abarcan uno o varios niveles de la estructura. Las fuerzas que se requiere aplicar a los tendones se obtienen de manera similar al sistema anterior. ®

Se han desarrollado también tendones activos para modificar las propiedades dinámicas de la estructura, cuyo objetivo es alejar el periodo fundamental de la estructura, de las frecuencias dominantes del temblor, para cada instante a fin de evitar el efecto de resonancia. Una de las posibles alternativas es la de modificar la inclinación del tendón, con el tiempo, lo que permite cambiar la rigidez de los marcos.

### 3.2.3 Dispositivos de fricción activos

Akbay y Aktan, en la década de los noventas, propusieron un sistema de control activo, que disipa energía por fricción, similar al pasivo de Pali. El sistema puede controlar la fuerza umbral de deslizamiento de los dispositivos, en condiciones de servicio y en condiciones últimas.

Además de los sistemas descritos, existen también los del tipo "híbridos", que combinan las bondades de los sistemas activo y pasivo. Tales sistemas híbridos son capaces de superar algunas de las limitaciones de los sistemas activos y pasivos, actuando cada uno por separado, esto se traduce en una gran bondad, si se compara contra los sistemas convencionales activos; la principal ventaja es que reducen los requerimientos de fuerza que debe proporcionar el actuador y la fuente de poder. Ejemplos de este tipo de sistemas híbridos son: el amortiguador de masa oscilante y el sistema activo de aislamiento de base.

El concepto de control activo es interesante. Debido a que este tipo de sistema constantemente está monitoreando las características de la excitación y la respuesta estructural; en principio, la efectividad es independiente de las características de excitación y las condiciones del sitio, lo único que lo limita es la capacidad de los actuadores. En principio, es efectivo para reducir las vibraciones inducidas por las excitaciones pequeñas, moderadas o de gran intensidad. Además, puede usarse para proteger a la estructura de acciones tan fuertes como los sismos y los vientos fuertes; pero, al mismo tiempo, para

eliminar las vibraciones constantes inducidas por el viento y el tráfico. Sin embargo, tiene también sus desventajas.

Debido al equipo tan sofisticado que se requiere, este tipo de sistemas resultan muy caros; su mantenimiento tienen que ser continuo y es de suma importancia que siempre esté bien calibrado; en particular, cuando el sistema se usa con frecuencia. Un sistema de control activo depende mucho de la fuente de poder, sin embargo, éstas son vulnerables a sismos severos y es posible que lleguen a fallar cuando más se les necesite; así que es conveniente que se tenga una fuente de poder de reserva, para considerar esta posibilidad; sin embargo, tener esa fuente de reserva aumenta el costo considerablemente.

El control de obras civiles requiere que fuerzas de gran magnitud sean aplicadas a altas velocidades; es por ello que la aplicación del control activo a estas estructuras requiere actuadores que sean capaces de desarrollar esas

fuerzas. A causa de que la respuesta de los actuadores requiere tiempo para calcular y determinar la magnitud de las fuerza en ellos, siempre se tendrá un tiempo inherente al retardo entre el tiempo de lectura y el tiempo de respuesta.

Un sistema de control activo puede resultar fatal si los actuadores no responden en el tiempo correcto. Se requiere de un algoritmo para calcular las fuerzas en los actuadores; sin embargo, este cálculo se hace basándose en la suposición de que el modelo se comporta linealmente, aseveración que no necesariamente es cierta.

### 3.3 Comentarios

Con base en el análisis presentado, es muy importante destacar que cada uno de los sistemas resulta una alternativa atractiva para utilizarse como solución para los problemas sísmicos; sin embargo, es necesario que cada uno de estos sistemas siga siendo estudiado y, sobre todo, aceptado como una alternativa más, para el diseño ante sollicitaciones sísmicas, en la práctica profesional, siempre y cuando se compruebe su efectividad en cada caso en particular.

Además de que cada dispositivo tiene que estudiarse para cada caso específico, por ejemplo, en el caso del aislamiento de base, es posible que los desplazamientos que resulten sean muy grandes y debido a esto pueda ocurrir que la estructura resulte vulnerable ante los efectos de torsión, estos son casos que no se han estudiado aún lo suficiente y por ello, todavía hay que ahondar en esa línea.

En el caso de los híbridos, como el sistema de masa activa controlada y el sistema activo de aislamiento de base, algunas preguntas permanecen sin respuesta, la efectividad o certidumbre en los algoritmos utilizados y lograr que los actuadores tengan la suficiente potencia para producir las fuerzas necesarias para oponerse al movimiento.

Para las masas resonantes, aún no se ha encontrado una solución satisfactoria para integrar la masa necesaria al diseño de la estructura, para minimizar las fuerzas de fricción debidas a la oscilación libre de esa masa y garantizar así que la masa permanezca calibrada todo el tiempo.

En el caso de los dispositivos ADAS, hay que asegurar que no ocurran corrimientos en las placas, definir el número óptimo de dispositivos y su localización así como la elección del adecuado umbral de cedencia, son algunas preguntas que siguen en el aire. La aplicación de los sistemas anteriores depende de parámetros, que involucran las características de los eventos sísmicos, la localización y el tipo de estructura.

Los disipadores de energía son una opción viable para la disminución de los daños provocados por temblores en la República Mexicana, para ciertas características de las edificaciones. Sin embargo, es necesario comparar su comportamiento con sistemas alternativos que permitan elegir el más adecuado económica y estructuralmente. Por la manera en que disipan energía (mediante desplazamientos relativos entre dos niveles consecutivos) y de acuerdo con los resultados hasta ahora obtenidos, su utilización resulta atractiva para edificios pequeños y de mediana altura.

El principal objetivo de los aisladores de base consiste en flexibilizar la estructura. La esbeltez es uno de los parámetros que restringe su uso, debido a los momentos de volteo y a los desplazamientos laterales. Las mayores reducciones de la respuesta se obtienen en estructuras con periodos pequeños, bajo excitaciones con grandes contenidos de frecuencias altas. Debido a lo anterior y a los posibles asentamientos diferenciales, no parece atractivo su uso en la zona blanda de la ciudad de México, aunque sí en otras partes de la República, como son las costas del Pacífico.

El oscilador resonante es un sistema promisorio para estructuras con comportamiento lineal. Los estudios que actualmente se llevan a cabo permitirán definir la aplicabilidad de este sistema. El incremento de la capacidad de disipación del sistema se podría lograr con la incorporación de disipadores de energía, o bien con un piso adicional de comportamiento elastoplástico y adecuada ductilidad. Otra posibilidad que hace atractivo al sistema es permitir demandas de ductilidad pequeñas en la estructura, cuando ésta se vea sometida a eventos sísmicos de gran magnitud.

Los cables de prefuerzo son una solución atractiva para estructuras pequeñas y de mediana altura y para cierto tipo de temblores. Aunque no modifican, de manera importante, la capacidad de disipación de energía de la estructura, incrementan su rigidez y resistencia, y mejoran el comportamiento sísmico, con la contribución de la estructura existente.

Los sistemas de control activo se encuentran en desventaja, en nuestro país, con respecto a los pasivos, por su elevado costo y la necesidad de mantenimiento periódico; aunque se sabe que pueden controlar más eficazmente el movimiento de la estructura.

Es de esperarse que en el futuro se desarrollen con mayor frecuencia combinaciones de sistemas pasivos y activos (sistemas híbridos) que disminuyan las limitaciones de los primeros y reduzcan las fuerzas de control necesarias, con la consecuente disminución del costo.

## CAPÍTULO 4

### ZONIFICACIÓN SÍSMICA Y EFECTOS DE SITIO

**Introducción.** La zonificación sísmica consiste en dividir una región en porciones, en cada una de ellas se especifican los parámetros constantes de diseño sísmico. Las leyes de atenuación reflejan la propagación de las ondas sísmicas en la roca de la corteza. El movimiento de la superficie del terreno en un sitio dado puede diferir radicalmente del que se tiene en la roca base, debido a alteraciones de las ondas causadas por efectos geológicos, topográficos y de rigidez del subsuelo. La importancia de estas alteraciones, llamadas en términos generales efectos locales, ha sido considerada cada vez más en los años recientes y ha conducido a la necesidad de realizar estudios de microzonificación de las áreas de asentamientos humanos, para detectar aquellas zonas que presentan problemas especiales.

#### 4.1 Zonificación sísmica

Las zonas de suelos inestables tienen fenómenos locales extremos, donde la vibración sísmica puede provocar fallas de suelo como el de deslizamiento de ladera o problemas de licuación. Estas zonas deben identificarse mediante estudios geotécnicos específicos.

La presencia de estratos de suelo blando por los que transitan las ondas sísmicas para llegar a la superficie, impacta en la forma y las características de las ondas. Las ondas de periodo corto se filtran y se amplifican las ondas de periodo largo. En general, la intensidad sísmica aumenta en los sitios en donde el terreno es blando y se ha observado que los daños producidos por los sismos de gran magnitud han sido sistemáticamente más graves en estos sitios que en los de terreno firme.

Si existe un lugar en donde ocurren fenómenos de amplificación de ondas que impactan de una manera extraordinaria, ese es el valle de México. Este sitio se encuentra lejos de la costa del Pacífico, en donde se generan los sismos de gran magnitud y se ubica en una región de peligro sísmico moderado (Zona "B" según la regionalización de la figura 4.1). El peligro sísmico aumenta de la zona "A" hacia la "D".



Fig. 4.1 Regionalización sísmica de México.

Sin embargo, existen condiciones geológicas particulares que producen una amplificación generalizada de las ondas sísmicas en toda la región, independientemente del tipo de terreno. No obstante, el efecto de suelo local más importante es que las ondas que llegan al valle por la roca base sufren modificaciones y amplificaciones extraordinarias, al transmitirse hacia la superficie a través de los estratos de arcilla sumamente compresible que existen en las zonas correspondientes a los lechos de los antiguos lagos que hubo en el valle de México.

La importancia del problema se aprecia en la representación de la figura 4.2, donde se reproducen, en una misma escala, los acelerogramas registrados en distintos sitios del valle de México, durante un sismo de magnitud moderada, originado en la costa del Pacífico.

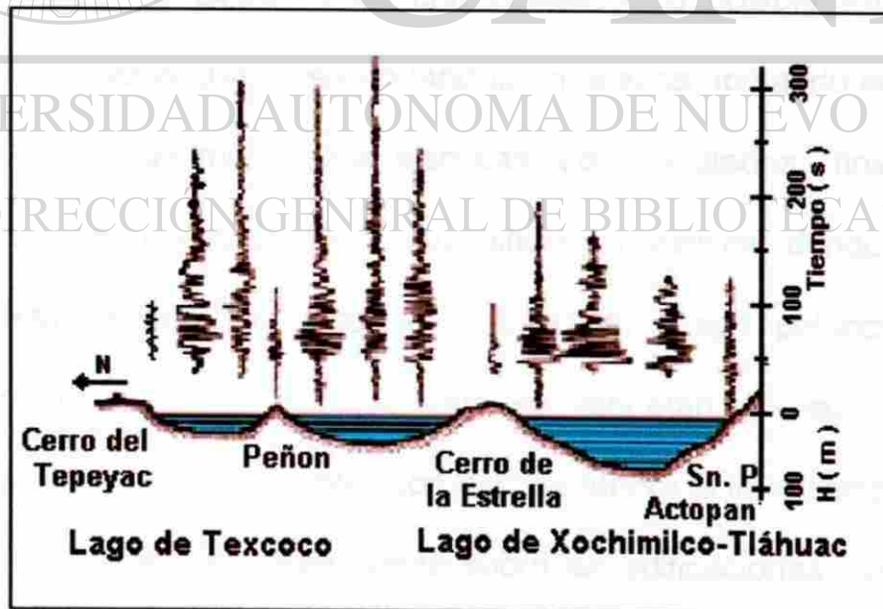


Fig. 4.2 Corte N-S, del valle de México

Consistentemente, las amplitudes del movimiento son varias veces mayores en terreno blando que en terreno firme. El tránsito por un grueso estrato de arcillas blandas filtra, y hace prácticamente desaparecer, las ondas que tienen frecuencias de vibración diferentes a la frecuencia fundamental del estrato. De esta manera el movimiento que llega a la superficie es prácticamente un movimiento armónico, con un periodo de vibración que es el del estrato de arcilla subyacente y que en el valle varía principalmente con el espesor de los estratos de arcilla.

#### 4.2 Microzonificación

Los estudios de microzonificación sísmica consisten en estudios multidisciplinarios, que en general abarcan unos pocos kilómetros, delimitados por la zona urbana existente de una ciudad y su posible expansión. Se consideran los efectos que un sismo tendría en la zona, tomando en cuenta los efectos de sitio y las microzonas sísmicas. Los resultados finales quedan representados en un mapa de microzonificación sísmica, donde el área de estudio queda dividida en sectores de diferente riesgo potencial, también llamados zonas de riesgo sísmico, que se etiquetan, de acuerdo con su peligrosidad, en orden ascendente. Con esto se tendrá la información necesaria para inferir los efectos de un terremoto sobre las edificaciones, dentro de una ciudad.

La microzonificación sísmica se divide en cuatro fases para su estudio. La primera fase consiste en definir las zonas sismogénicas, a partir del estudio de la sismicidad.

La segunda fase se refiere al desarrollo de diversos mapas de la zona, como: geológico, morfológico, geotécnico, de daños por sismos y otros; al integrar todos estos mapas se establecen las microzonas.

La tercera fase es el monitoreo sísmico utilizando diferentes tipos de registro: para determinar movimientos fuertes, débiles y la vibración ambiental en las microzonas estimadas en la segunda fase. Con esto se conocerán las diversas respuestas sísmicas que tendrán las diferentes microzonas (efectos de sitio).

Una de las técnicas más populares para estimar los efectos de sitio, en regiones de moderada a alta sismicidad, es el uso de la razón espectral (de espectros de Fourier) de registros de temblores (conocida como razón espectral estándar), obtenidos simultáneamente en estaciones ubicadas sobre suelo blando, con respecto a una estación de referencia ubicada en suelo firme (asumiéndola libre de efectos de sitio). Sin embargo, el registro de temblores fuertes, con un arreglo de acelerógrafos, conduce a un mayor tiempo de espera para llevar a cabo la evaluación, ya que la ocurrencia de temblores mayores ( $M_s > 7$ ) no es tan frecuente como la de los débiles. Por ello, una buena alternativa es utilizar razones espectrales de temblores débiles. Por otra parte, esta técnica tiene otra particularidad en zonas urbanas, debido al alto nivel de ruido ambiental provocado principalmente por el tráfico vehicular; esto limita el

período de obtención de registros útiles, a las horas en que el ruido disminuye (por ejemplo la madrugada), lo que aumenta, a su vez, el tiempo del trabajo de campo.

Otra técnica, introducida recientemente, es la estimación de la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (Técnica de Nakamura o REHV), propuesta originalmente por Nakamura para interpretar mediciones de vibración ambiental. Esta técnica fue aplicada a la parte intensa de las ondas "S", en registros de movimientos débiles por Lermo, y Chávez García. Los resultados sugieren que, si el efecto de sitio es causado por una geología simple (la misma condición requiere para la razón espectral estándar) REHV proporciona una estimación gruesa de la frecuencia y la amplitud del primer modo de resonancia. La ventaja más importante de esta técnica es que elimina el requerimiento de una estación de referencia. Esto es muy usual cuando la estación de referencia falla o presenta efectos debido a condiciones topográficas, o bien cuando es diferente el registro obtenido por las estaciones en sitios de suelo blando.

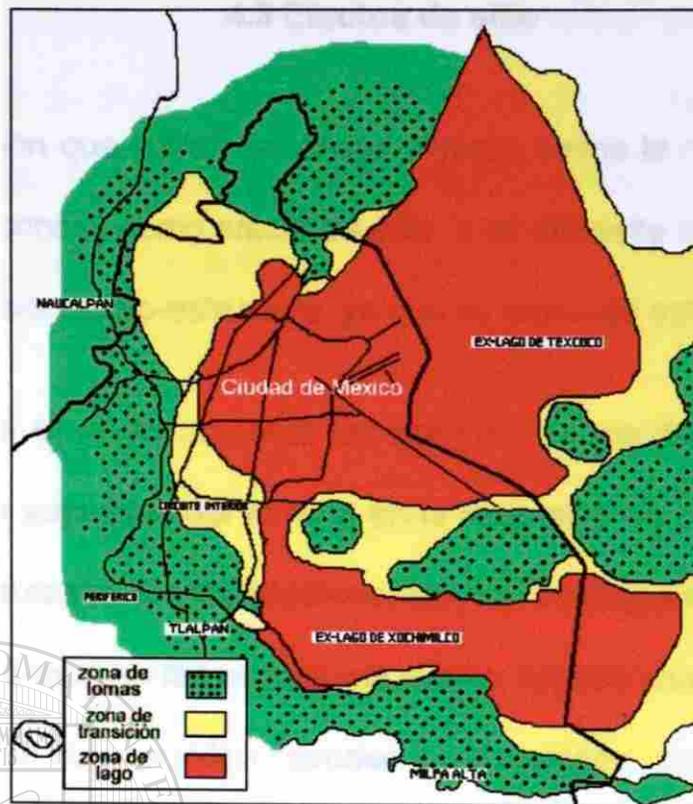
El uso de vibración ambiental para obtener la estimación de la respuesta de un sitio fue introducido en Japón, por los años 50. A pesar de que algunos investigadores como Udwadia y Trifunac han hecho cuestionamientos sobre su utilidad, las mediciones de esta vibración presentan un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo, como por la rapidez con que permiten obtener resultados. Son básicamente tres las técnicas más usadas para el análisis de los registros de

vibración ambiental: la determinación de la frecuencia máxima, directamente desde la densidad espectral de potencia; el cálculo de la razón espectral, siguiendo la técnica recién descrita para registros de temblores y la técnica REHV. Las tres técnicas fueron revisadas por Lermo y Chávez-García (1994), quienes comparan resultados de vibración ambiental contra la razón espectral estándar de registros de temblores. Ellos concluyen que esta vibración, cuando se analiza con REHV, permite la determinación, con buena precisión, del período dominante ( $T_0$ ) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.3 y 5 Hz, junto con una estimación preliminar del nivel de amplificación ( $A_r$ ).

La cuarta fase consiste en la clasificación de las microzonas por orden de peligrosidad y seleccionar puntos idóneos para la construcción y puesta en marcha de estaciones acelerográficas permanentes, si es que se cuenta con este equipo, así como establecer algunas recomendaciones para el uso de estos mapas.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La micozonificación de la ciudad de México ha dado lugar a su subdivisión en tres zonas, como se representa en la figura 4.3. La zona de *Lomas* es de terreno firme y de peligro sísmico menor. La zona del *Lago*, la cual tiene depósitos de arcilla de por lo menos 20 m de espesor y corresponde al peligro sísmico mayor. Entre estas dos zonas existe una *Transición*, donde los estratos de arcilla son de menor espesor y producen amplificaciones importantes, pero menos graves que en la zona del Lago.



**Fig. 4.3** Zonificación del Distrito Federal, según el tipo de suelo.

La microzonificación sísmica persigue la finalidad de evaluar los riesgos sísmicos minuciosamente para lograr una aceptable planificación regional y urbanística y para ponderar los niveles de las fuerzas o movimientos para la concepción de estructuras antisísmicas. La mayoría de los estudios sobre la distribución de las calamidades causadas por los sismos indican que las zonas de daños intensos están bien localizadas y que la envergadura de esos daños puede cambiar bruscamente, en una distancia apenas de 0.5 a 1 kilómetro.

Se ha observado que las intensidades de las sacudidas sísmicas varían considerablemente a distancias muy cortas. Esto ha llevado a pensar que el factor esencial para la evaluación del daño de las estructuras son las condiciones del subsuelo local, es decir, los *efectos de sitio*.

### 4.3 Efectos de sitio

A la transformación que sufren las ondas sísmicas desde la roca base, hasta la superficie, se le conoce como *efecto de sitio* y es diferente e independiente del efecto de interacción suelo-estructura, ya que se presenta esté o no un edificio.

Pueden influir de diversas maneras las condiciones geológicas y de suelos subyacentes a la superficie del terreno en la respuesta de un lugar dado a un sismo. En ciertos casos, los desplazamientos permanentes del terreno pueden originar la deformación de las estructuras que se apoyan en ellos. Por ejemplo, los suelos granulados pueden quedar compactados por las vibraciones suscitadas por el sismo, a consecuencia de lo cual pueden producirse asentamientos importantes y diferenciales de la superficie del terreno. En algunos casos, donde ocurren materiales granulares sueltos y saturados, la compactación puede engendrar presiones hidrostáticas de magnitud suficiente como para provocar una licuación del suelo, produciendo grandes asentamientos e inclinaciones de las estructuras. Una combinación de los esfuerzos dinámicos unidos a las presiones intersticiales en los sedimentos de arcilla blanda y arena, pueden causar grandes deslizamientos de tierra. Se asocian también efectos similares, pero a gran escala, con los desplazamientos de falla, cuando las estructuras están situadas en su traza. La mayoría de estos efectos se toman en consideración en los métodos de microzonificación sísmica, conjuntamente con los relacionados con la sacudida del terreno.

Las amplitudes y formas de las ondas sísmicas dependen del mecanismo focal y de la cantidad de energía liberada, así como de la trayectoria y de las condiciones locales. El mecanismo focal define la manera en que la energía es irradiada en el espacio y en el tiempo. Es indudable que la distribución de la intensidad sísmica está ligada con las características de la ruptura. Sin embargo, las ondas sísmicas, una vez emitidas por la fuente, dependen fundamentalmente de las propiedades de los medios en que se propagan y de las dimensiones de la falta de homogeneidad o irregularidades que encuentra en su trayecto. Esto es aplicable al describir los efectos de las condiciones locales.

Si el cambio de propiedades en una interfase es grande o si el tamaño de las irregularidades es comparable o mayor que la longitud de las ondas incidentales, las reflexiones, las refracciones y la difracción de las ondas ocasionarán cambios significativos en el movimiento. Interesa entender la naturaleza de esos cambios, pues pueden dar lugar al fenómeno de amplificación local y a variaciones significativas del movimiento del terreno en distancias relativamente pequeñas. Además, existe evidencia de los efectos locales en el estudio de la distribución espacial del daño en temblores. Si bien el daño depende de la calidad de las construcciones, en muchos casos los daños severos están asociados a fenómenos de amplificación.

Los efectos de las formaciones geológicas sobre los movimientos sísmicos existen y pueden ser muy grandes. Dos ejemplos de tales efectos son:

a) El área de San Francisco, California, en la que las amplificaciones sobre sedimentos no consolidados han sido responsables de variaciones de intensidad de hasta dos grados en escala MM, durante los terremotos de San Francisco de 1906, Loma Prieta de 1989 y Northridge en 1994.

b) El valle de la ciudad de México, donde los depósitos de arcilla lacustre indujeron fenómenos de amplificación que provocaron pérdidas de vidas humanas y económicas durante el terremoto de 1985. La respuesta de los sedimentos de ese valle ha sido ampliamente estudiada.

En 1994 ocurrió el terremoto de Northridge que ha sido el desastre natural más costoso en los Estados Unidos de América. Aun así, el costo no fue más alto debido a que el daño en los edificios fue menor que el esperado, porque el suelo absorbió una parte significativa de la energía de la onda incidente, debido a un comportamiento no lineal en su respuesta. El aumento de amortiguamiento fue tan importante que se equiparó a un mecanismo de aislamiento de base pasivo y el número total de los edificios severamente dañados se redujo en un factor de dos o más.

El acoplamiento del periodo natural de un edificio con el del suelo causa una amplificación de la respuesta. A este fenómeno se le conoce con el nombre de *resonancia* y se hizo presente durante el sismo de la Ciudad de México de 1985. Dicho terremoto proporcionó una amplia experiencia a los ingenieros sísmicos del mundo, ya que los edificios de esa ciudad sufrieron daños debidos a movimiento de periodos relativamente largos, entre 1 y 3 segundos. Hubo

una doble resonancia, primero entre la onda sísmica incidente y la estructura de la cuenca debajo de la ciudad y después, entre el movimiento en la superficie y los edificios.

La resonancia entre el lecho rocoso y los sedimentos superficiales fue producida por una capa de arcilla de 20 a 30 m de espesor, que provocó una amplificación de 12.3 veces las ondas sísmicas, llevando a aceleraciones comparables a las del epicentro localizado a 400 Km. El colapso de muchos de los edificios pudo haber ocurrido debido a que la aceleración producida por el sismo y su duración crearon articulaciones plásticas en las columnas superiores de los edificios colapsados. Este mecanismo de falla se debe, entre otras causas, a la degradación de la rigidez, debido a la fatiga de los elementos, ocasionada por la resonancia ocurrida entre el suelo y el edificio.

La mayoría de los inmuebles colapsados o que sufrieron daños graves durante el sismo de 1985 de la ciudad de México, eran edificios flexibles con periodos iniciales mayores o iguales que 0.7 s y debido a la larga duración del sismo (alrededor de 180 segundos) estos incursionaron dentro del intervalo de comportamiento no lineal, aumentando así su periodo, acercándolo cada vez más al del terreno. Esto intensificó las aceleraciones que experimentaron hasta llegar a la resonancia. En cambio, los edificios antiguos, construidos en la zona del lago, no sufrieron daño debido a su corta altura (dos o tres niveles) que hizo que sus periodos naturales (menores a 0.5 s) quedaran fuera del intervalo de resonancia del terreno.

El concepto de que la aceleración del terreno y la incidencia del daño ocasionado en los edificios estén relacionados con las condiciones locales del suelo se ilustra en la figura 4.4, donde se muestran las máximas aceleraciones del terreno en lugares situados, aproximadamente, a una misma distancia de la zona de liberación de la energía. Se observa que las aceleraciones en lugares adyacentes tuvieron variaciones hasta del cien por ciento por causa de las diferentes condiciones de suelo existentes.

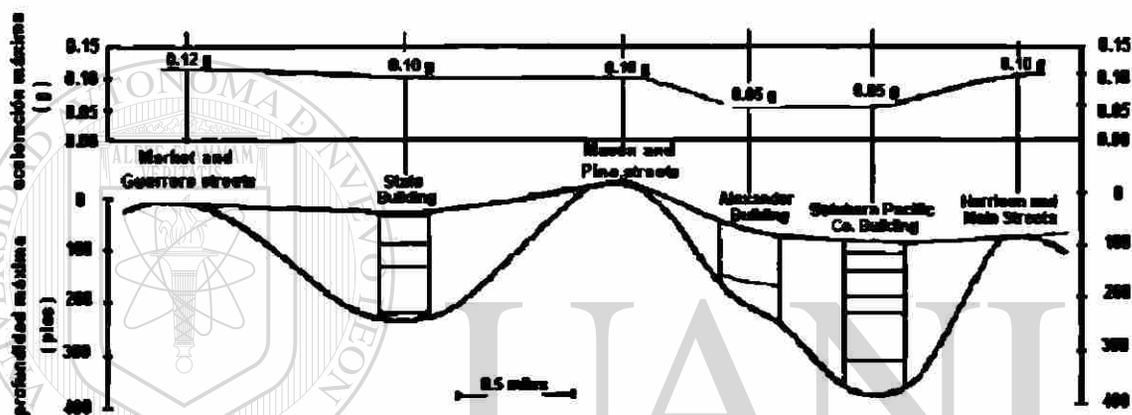


Fig. 4.4 Condiciones de suelo y aceleraciones máximas registradas durante el sismo de San Francisco, de 1957.

Europa no está exenta de este tipo de particularidades del terreno; las características geotécnicas del suelo de Barcelona, por ejemplo, han sido estudiadas por Cid (1999) quien realizó una zonificación sísmica basada en métodos de simulación numérica de los efectos locales clasificando la ciudad en cuatro zonas correspondientes al afloramiento rocoso ( Zona 0), que se toma de referencia, materiales deltaicos ( Zona I), y las Zonas II y III que se caracterizan por materiales aflorantes pleistocenos y que se diferencian por la presencia de

diferentes espesores de materiales terciarios que diferencian también la respuesta sísmica.

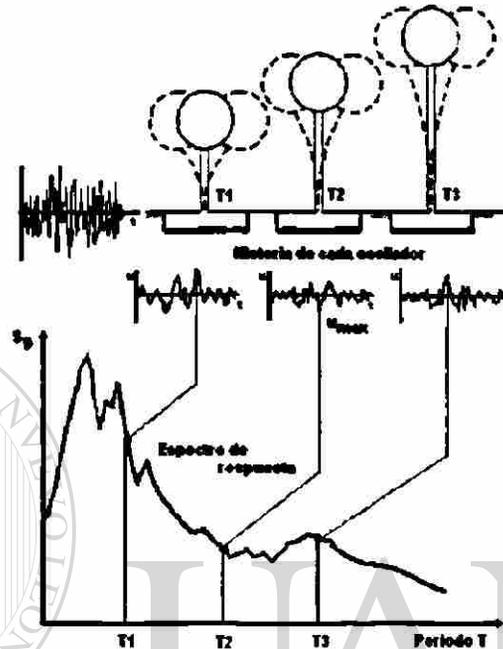
Para este caso, el código de diseño propone espectros elásticos de tres tipos de suelos:

- i) Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso, cuya velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla  $V_s > 750$  m/s.
- ii) Terrenos granulares o cohesivos de compacidad media a dura, cuya velocidad de onda de corte es de  $750 \text{ m/s} < V_s < 400$  m/s.
- iii) Suelo granular suelto a medio, o suelo cohesivo medio a blando, cuya velocidad de propagación es  $V_s < 400$  m/s.

#### 4.4 Espectros de respuesta

Los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por Biot, en el año 1932 y luego desarrollados por Housner, Newmark y muchos otros investigadores. En la actualidad, el concepto de espectro de respuesta es una herramienta importante de la dinámica estructural, de gran utilidad en el área del diseño sismorresistente. De manera general, un espectro es *un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada, en una estructura u oscilador, de un grado de libertad.* En los espectros, se representa en abscisas el periodo propio de la estructura, o

la frecuencia, según el caso, y en las ordenadas la respuesta máxima calculada para uno o varios factores de amortiguamiento  $\xi$ . La figura 4.5, indica, de una manera gráfica, el método para la determinación del espectro de respuesta.



**Fig. 4.5.** Gráfico indicativo del método de determinación del espectro de respuesta.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La importancia de los espectros en el diseño de estructuras radica en el hecho de que estos gráficos condensan la compleja respuesta dinámica en un parámetro clave: los valores de respuesta máxima, que son usualmente los requeridos por el diseñador para el cálculo de las estructuras. Cabe aclarar, sin embargo, que los espectros de respuesta, desafortunadamente, debido a la forma en que se construyen, omiten información importante, dado que los efectos del terremoto sobre la estructura dependen no sólo de la respuesta máxima sino también de la duración del movimiento y del número de ciclos con demanda significativa de desplazamientos.

#### 4.4.1 Tipos de espectros

Como se mencionó con anterioridad, el concepto de espectro ha ganado una amplia aceptación como herramienta de la dinámica estructural. Es por ello que se han desarrollado varios tipos de espectros, los cuales presentan características diferentes y se utilizan con distintos objetivos. En particular se discutirán tres de los espectros más comunes:

a) *Espectros de respuesta elástica.* Representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Vale la pena mencionar, que para la construcción de este tipo de espectros se considera que el material tiene un comportamiento elástico lineal y que no se presentan efectos de segundo orden. Estos espectros se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto.

b) *Espectros de respuesta inelástica.* Este tipo de espectros son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en el rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que, por razones prácticas y económicas, la mayoría de las

construcciones se diseñan según la hipótesis de que incursionarán en campo plástico. Como ejemplo, de este tipo se puede mencionar los espectros de ductilidad; recordando que ductilidad de desplazamientos es la relación entre el desplazamiento máximo que experimenta la estructura y el desplazamiento de fluencia.

Estos espectros representan la ductilidad requerida por un terremoto dado, en función del periodo de vibración de la estructura y se grafican usualmente para distintos niveles de resistencia. También, se construyen espectros de aceleración, desplazamiento de fluencia o desplazamiento último de sistemas inelásticos, en donde se consideran distintos niveles de ductilidad o distintos tipos de comportamiento histerético de la estructura, como se indica en la figura 4.6.

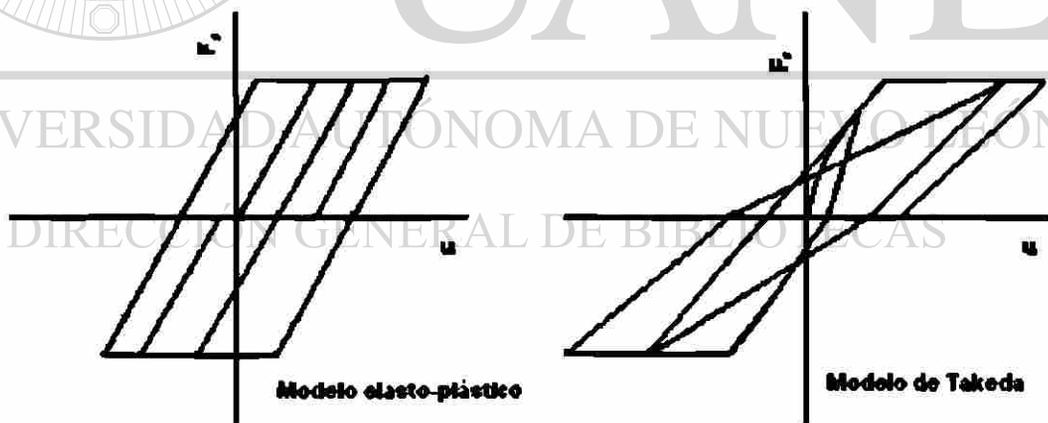


Fig. 4.6. Ejemplos de modelos de histéresis.

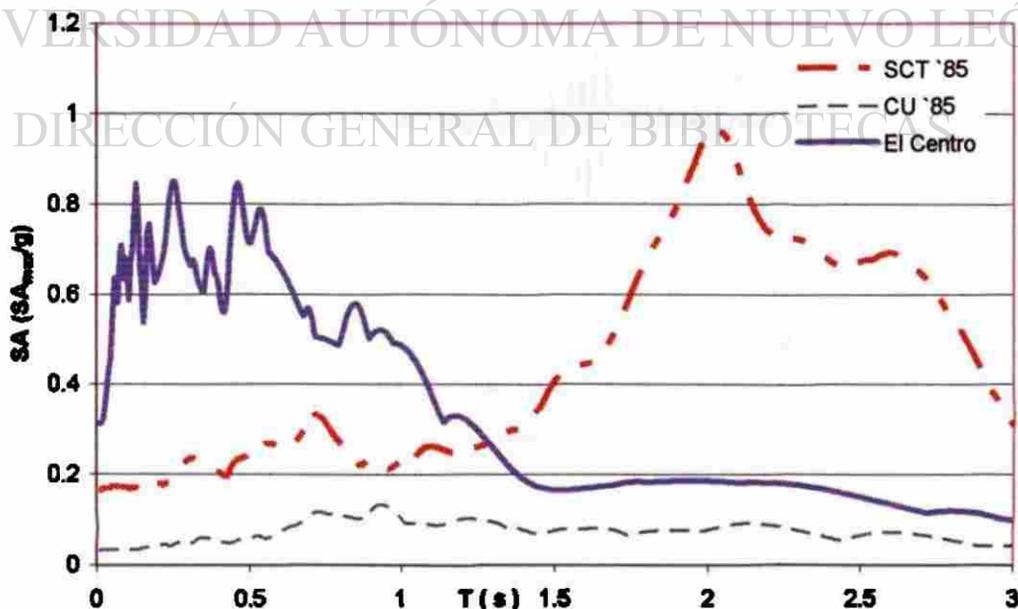
Los modelos histeréticos indican la relación entre la fuerza restitutiva  $F_s$  y el desplazamiento  $u$ . En una estructura lineal y elástica se verifica que  $F_s = K u$ , siendo  $K$  la rigidez, mientras que en sistemas no-lineales que incursionan en

el rango plástico, la fuerza  $F_s$  es una función no-lineal de  $u$  y de la historia de desplazamientos experimentados previamente, lo que se conoce como fenómeno de histéresis. En este último caso, la relación  $F_s - u$  es mucho más compleja y se define mediante modelos histeréticos como los indicados en la figura 4.6.

- c) *Espectros de diseño.* Las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular, en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica, descriptos previamente, no pueden utilizarse para el diseño sismorresistente. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismorresistentes se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos, cuya descripción detallada escapa al alcance de este trabajo. Es muy importante distinguir entre los espectros de respuesta, que se obtienen para un terremoto dado, y los espectros de diseño, los cuales se aplican al cálculo y verificación de estructuras y representan la sismicidad probable del lugar.
- d) Se han desarrollado otros tipos de espectros, como los espectros de piso, que son de utilidad para ciertas aplicaciones específicas.

#### 4.4.2 Factores que afectan los espectros de respuesta

Las curvas espectrales dependen, como ya se mencionó, del periodo de vibración de la estructura y del factor de amortiguamiento considerado. Es obvio, también, que los resultados serán además afectados por las características particulares del registro de aceleración. Son muchas las variables que pueden influir de manera importante sobre los registros de aceleración y por ende, sobre los espectros de respuesta. Entre las más importantes se pueden mencionar: los valores máximos del movimiento del terreno (aceleración, velocidad y desplazamiento), el contenido de frecuencias del terremoto, la duración del movimiento fuerte, el mecanismo de generación del terremoto, la magnitud, el tipo de suelo, etc. Esto se ve reflejado, por ejemplo, en las curvas de aceleración espectral, graficadas en la figura 4.7, que corresponden a tres terremotos diferentes.

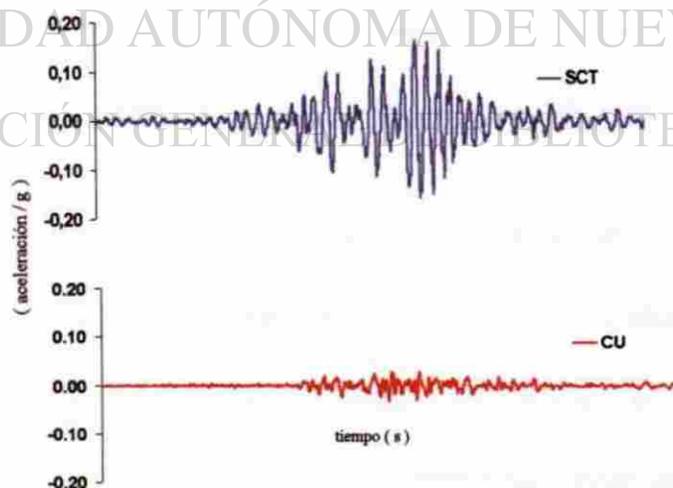


**Fig. 4.7** Comparación de espectros de pseudo aceleración para distintos terremotos (factor de amortiguamiento 5%).

Puede observarse claramente, en esta figura, cómo una misma estructura (igual periodo de vibración e igual factor de amortiguamiento) experimentará aceleraciones máximas notablemente diferentes para los distintos terremotos.

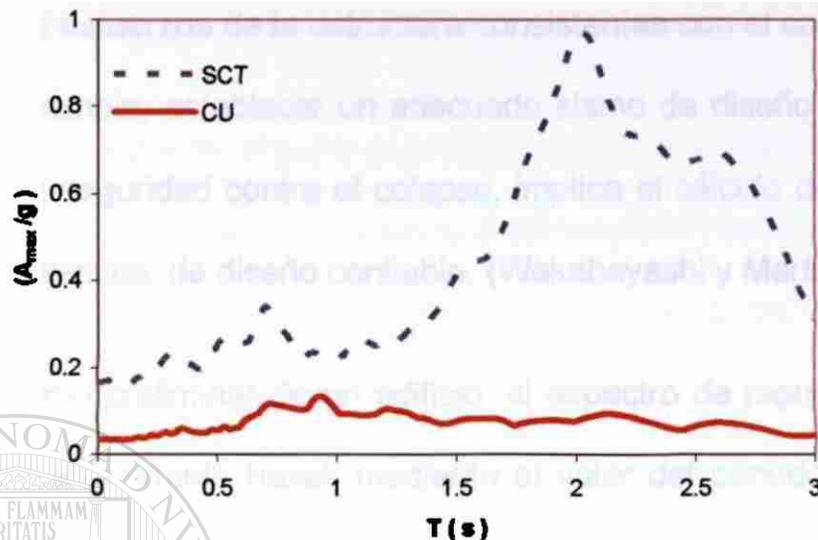
También, como ya se mencionó una de las variables que más impactan en el diseño sismorresistente es el tipo de suelo, lo que se definió como efectos de sitio. Los estudios realizados con registros de aceleración, tomados en distintos terremotos y en distintos lugares, muestran que en estratos de suelos blandos puede originarse una amplificación del movimiento con respecto al movimiento medido en la roca o en suelos firmes.

La figura 4.8 muestra los registros medidos en dos estaciones diferentes, una localizada sobre un estrato rocoso (CU) y la otra ubicada sobre un estrato de arcillas blandas (SCT), en la zona que se encuentra construida sobre un antiguo lago seco.



**Fig. 4.8** Registros de aceleración de SCT y CU (1985)

Se observan las diferencias significativas de ambos registros. Su efecto en los espectros de respuesta se pone en evidencia en la figura 4.9.



**Fig. 4.9** Espectros de aceleración correspondientes a los registros de la figura 4.19 (terremoto de Michoacán, México, 1985).

#### 4.4.3 Espectros de diseño

Para definir el sismo de diseño sismorresistente de un edificio se suelen considerar tres estados límite de las estructuras, con respecto a su respuesta:

- a) *El Nivel de servicio*, o nivel en el cual se espera que el edificio, continúe proporcionando la función primordial para la cual fue creado.
- b) *El Nivel de daño esperado*, donde se limita el daño a niveles predeterminados de economía, ya que pueden ser reparados.
- c) *El Nivel de seguridad contra el colapso*, donde ningún nivel de daño que sufra el edificio ha de poner en riesgo la vida de sus ocupantes.

Para mantener los límites de servicio de los edificios, el espectro de respuesta de diseño debe ajustarse a las condiciones de sitio, a los valores esperados del amortiguamiento, a métodos para el cálculo de los periodos naturales de los edificios y de los esfuerzos de la estructura consistentes con el comportamiento esperado. En cambio, establecer un adecuado sismo de diseño para estados límite de daño y seguridad contra el colapso, implica el cálculo de un espectro de respuesta inelástica, de diseño confiable. (Wakabayashi y Martínez, 1988).

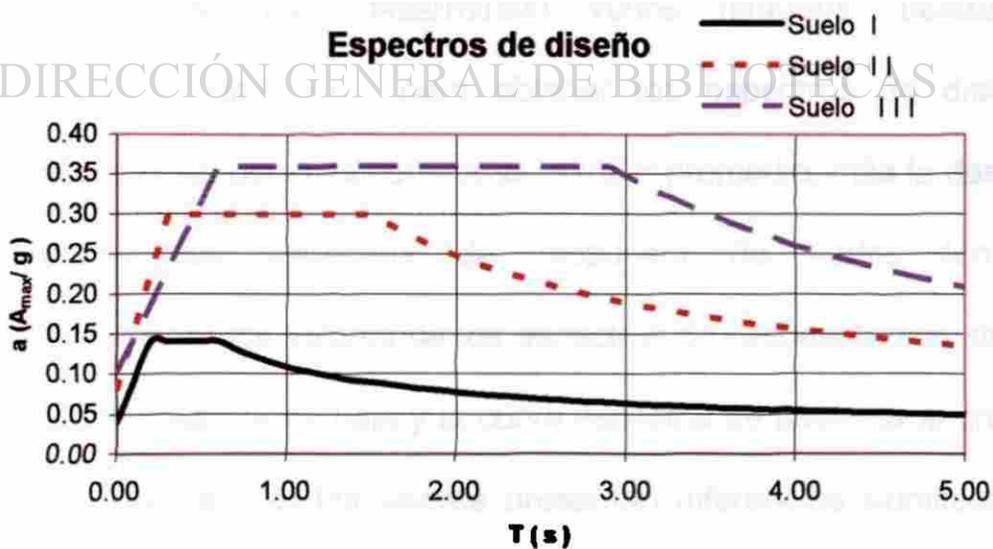
Al hacer un diseño preliminar de un edificio, el espectro de respuesta se utiliza para el cálculo del cortante basal, mediante el valor del periodo fundamental estimado con la fórmula de Rayleigh o con una fórmula empírica. Con el periodo fundamental del edificio que se pretende diseñar, la información del suelo y utilizando el espectro que corresponda, se determina la aceleración de diseño que sirve para el cálculo de la fuerza cortante basal.

Con el conocimiento de las características sísmicas del lugar y las propiedades dinámicas del suelo; entre ellas el módulo dinámico de elasticidad a cortante y la velocidad de onda "s", los profesionistas de diseño pueden estimar los efectos sísmicos de la estructura del edificio y su cimentación, incluyendo su interacción con el suelo (Zeevaert, 1991)

Durante el sismo de México, de 1985, se puso de manifiesto que no es posible aplicar en forma indiscriminada un enfoque simplista para determinar el periodo fundamental de una estructura, el cual se emplea para la selección apropiada del valor del cortante basal. Las ecuaciones empíricas que evalúan el periodo en función del número de niveles de un edificio, basándose en relativamente

pocos datos experimentales de vibraciones medidas en edificios existentes, puede conducir a valores erróneos del periodo fundamental de la estructura. Además, resulta importante considerar el efecto rigidizante de los muros interiores, que por lo general se desprecia al calcular el periodo de esa forma.

Desde el punto de vista de seguridad contra el daño de edificios, lo que más afecta de los terremotos, son las fuerzas que ellos inducen en las estructuras y para la estimación de esas fuerzas es importante el conocimiento del periodo fundamental. En la parte superior de un edificio, la máxima aceleración espectral "a" será igual a la aceleración espectral correspondiente al periodo fundamental (figura 4.10) y la máxima fuerza lateral será aproximadamente igual a  $W a / g$ , donde  $W$  es el peso de la estructura y  $g$  la aceleración de la gravedad. Para edificios de varios niveles, otros modos de vibración, además del primero, influyen en la respuesta, pero la del primer modo proporciona una muy buena aproximación de las fuerzas inducidas.



**Fig. 4.10** Espectros de diseño, para diferentes tipos de suelos.

Debido a que las aceleraciones espectrales varían con el periodo de la estructura y las formas de los espectros varían dependiendo de las condiciones del suelo, edificios con el mismo periodo, desplantados en lugares diferentes, pueden estar sujetos a diferentes fuerzas laterales dinámicas máximas.

a) *Espectros de diseño de aceleración.* Con anterioridad se han descrito, en forma general, los espectros de diseño y ahora se verá con mayor detalle este concepto. Los espectros son una herramienta de gran utilidad en el diseño de construcciones sismorresistentes, debido a que el ingeniero estructural puede estimar el valor máximo de la respuesta (usualmente en términos de aceleración) sin necesidad de evaluar la historia temporal completa. Sin embargo, en el diseño de estructuras no pueden utilizarse los espectros de respuesta, ya que éstos se obtienen para un terremoto dado. Las curvas espectrales para diseño deben considerar el efecto de varios terremotos, es decir, deben ser representativos de la sismicidad propia de cada región. Se han desarrollado varios métodos, basados en procedimientos estadísticos, para obtener los espectros de diseño. El procedimiento más usual es considerar el valor promedio, más la desviación estándar de los espectros de respuesta de varios terremotos representativos. Si los valores de los espectros de respuesta son similares, la desviación estándar es baja y la curva espectral se asemeja al promedio. En el caso contrario, si los valores presentan diferencias significativas, la desviación estándar es alta y la curva espectral se acerca al valor máximo, o

incluso puede superarlo. De modo que este procedimiento toma en cuenta la mayor o menor dispersión de los datos y conduce a resultados confiables.

Para efectos del diseño, resulta conveniente que las curvas espectrales se suavicen con líneas envolventes, para evitar los valles o variaciones bruscas que surgen de las formas complejas que presentan los espectros de respuesta. Es por ello que los espectros de diseño que definen los códigos están formados por una serie de líneas o curvas, las cuales pueden expresarse mediante ecuaciones simples. Los espectros de diseño de aceleración suelen presentar una rama lineal creciente, con origen en un valor de aceleración máxima, correspondiente a la aceleración del terreno, luego una zona de aceleración constante, o meseta, con un valor 2 a 3 veces superior a la aceleración máxima del terreno y, finalmente, una o más curvas decrecientes.

b) Espectros de diseño de desplazamiento. En la última década se ha desarrollado un nuevo criterio de diseño para construcciones sismorresistentes que se basa en desplazamientos. Es decir, que el ingeniero estructural, en lugar de evaluar la demanda sísmica en términos de fuerzas laterales (o aceleraciones) realiza el diseño a partir de la demanda de desplazamiento lateral inducida por la acción sísmica. Este nuevo criterio aún no se ha desarrollado completamente, pero se espera que en el futuro reemplace al método tradicional, basado en fuerzas, debido a que permite considerar en forma explícita distintos niveles de daño. El método basado en desplazamientos requiere, obviamente, de un espectro de diseño de desplazamientos. Es por ello que muchos investigadores

trabajan actualmente para evaluar y proponer espectros de diseño de desplazamiento.

El concepto de espectros, en sus distintas modalidades, es una herramienta de gran utilidad en la ingeniería sísmica, ya sea para comprender y evaluar el efecto de los terremotos sobre las construcciones, así como también para estimar la demanda sísmica en el diseño de estructuras. Es por ello que resulta de suma importancia para el ingeniero estructural comprender la teoría que lo fundamenta, los métodos para su obtención, el campo de validez y la forma práctica de empleo.

#### **4.5 Beneficios esperados**

En países como el nuestro, donde, debido al crecimiento excesivo y descontrolado de las ciudades y al nivel económico de la población, se construyen viviendas sin asesoramiento técnico y de forma irregular y, por lo tanto, sin la adecuada seguridad sísmica, los estudios de microzonificación sísmica desempeñan un papel de gran importancia para la seguridad de la población. Estos estudios permiten determinar el comportamiento de las diferentes zonas, tomar las precauciones necesarias, e incluso establecer prohibiciones de construcción de cierto tipo de edificaciones, en algunas zonas de la ciudad.

#### **4.6 Espectros de respuesta para sitios no instrumentados y efectos de interacción suelo–estructura**

Es sabido que la flexibilidad del suelo incrementa el periodo fundamental y modifica el amortiguamiento de la estructura supuesta con apoyo indeformable, es decir, en la condición de campo libre. Avilés y Pérez–Rocha (1996) indican que para estructuras esbeltas se tienen incrementos de consideración en el periodo y amortiguamiento estructurales. En cambio, para relaciones de esbeltez pequeñas, encontraron que los incrementos en el periodo no son significativos, pero que van acompañados de reducciones del amortiguamiento que pueden introducir incrementos importantes en las ordenadas del espectro de respuesta.

Obtener espectros de sitio, a partir de instrumentaciones, da una idea más realista del comportamiento de las estructuras en diferentes tipos de suelo. El análisis de los registros de aceleración que se obtienen de las instrumentaciones, permite, en ocasiones, sentar bases para considerar una reducción racional del coeficiente sísmico reglamentario, sin menoscabar la seguridad estructural. En principio, estas reducciones se reflejarían principalmente en la respuesta dinámica de los modos superiores estructurales. Este efecto reductivo, se debe a la interacción cinemática entre el suelo y la cimentación. Ya se han iniciado estudios detallados que permitan, en breve plazo, incorporar estos efectos en el reglamento para la construcción de obras civiles en el valle de México.

## **CAPÍTULO 5**

### **MODELAJE MATEMÁTICO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES PROVISTOS CON DISPOSITIVOS DISIPADORES**

El estudio de disipadores de energía ha atraído la atención de varios investigadores, en los últimos años. En México, se han concentrado los recursos en los disipadores de tipo histeréticos, entre los que destacan los del tipo Solera, los ADAS y los TADAS. Se han realizado diversos estudios paramétricos, cuyo objetivo es evaluar la factibilidad de aplicar este tipo de dispositivos disipadores de energía como una solución técnicamente eficiente en la reducción de la respuesta sísmica de estructuras. Hay autores (Tena, 1988, 2000) que han realizado investigaciones para validar los distintos modelos elásticos y no lineales que se han utilizado para representar elementos disipadores de energía por histéresis del material, en particular los tipo Solera y los ADAS, que son los que más se emplean en nuestro país.

#### **5.1 Modelado para análisis elásticos**

Uno de los grandes retos a los que se enfrenta el diseñador estructural al estudiar los dispositivos disipadores de energía, es el desarrollar un modelo representativo de la estructura que se está estudiando, de tal suerte que resulte eficiente en análisis y diseño, es decir, que por cada minuto que se dedique a la

elaboración de ese modelo se obtenga el máximo beneficio. En México, como en otros países, el diseño de edificios con disipadores de energía se acostumbra a realizar con programas de análisis tridimensional elástico, debido a que aún resulta algo difícil realizar análisis no lineales tridimensionales, con todo rigor, sin embargo, es posible hacer análisis tridimensionales "híbridos", con programas como el ETABS o el SAP-2000, los cuales brindan la posibilidad de modelar elementos que trabajen elásticamente y otros que incurrieren en el intervalo inelástico.

La gran mayoría de los disipadores de energía, del tipo histeréticos, requieren ser colocados en contravientos concéntricos o del tipo chevrón, como se aprecia en la figura 5.1. Al utilizar este tipo de dispositivos, resulta imperativo establecer métodos prácticos para analizarlos y posteriormente diseñarlos mediante el uso de programas convencionales de análisis estructural.

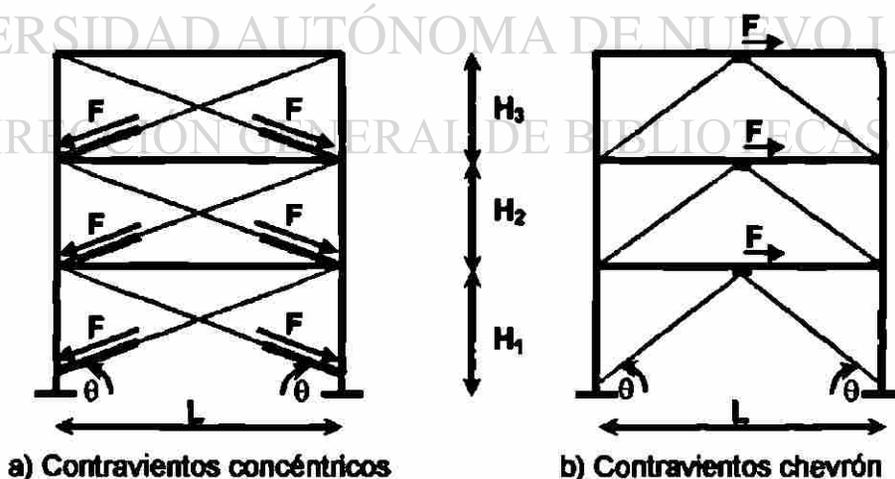


Fig. 5.1 Formas convencionales de colocar los dispositivos disipadores de energías.

Debido a que los disipadores de energía se montan generalmente en contravientos metálicos, una manera fácil de modelarlos, en su intervalo de comportamiento elástico, consiste en modelar al sistema contraviento- disipador como elementos diagonales equivalentes, cuya rigidez axial es función de la geometría del sistema, de las rigideces relativas de los elementos disipadores y de los contravientos utilizados, según la hipótesis de que el sistema contraviento-disipador funciona esencialmente como un sistema de resortes en serie, que trabajan en el rango elástico.

Para el caso de disipadores colocados en diagonales concéntricas y que trabajan axialmente, (fig 5.1a), la rigidez equivalente ( $K_{eq}$ ), con respecto a su eje principal longitudinal, está definida por la expresión:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{1}{K_{dis}} \quad (5-1)$$

donde  $K_{diag}$  es la rigidez axial elástica del contraviento y  $K_{dis}$  es la rigidez elástica del disipador.

Cuando el arreglo que se utiliza es el de tipo chevrón, los disipadores trabajan en el mismo sentido lateral de la estructura, pero en una dirección oblicua con respecto al eje longitudinal de las diagonales que forman el contraviento. En este caso, si el contraviento chevrón tiene diagonales de igual longitud y el mismo ángulo de inclinación, con respecto al eje horizontal ( $\theta$ ), la rigidez axial de cada diagonal equivalente ( $K_{eq}$ ), con respecto a su eje longitudinal principal, está definida como:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{2\cos^2\theta}{K_{dis}} \quad (5-2)$$

en donde  $K_{diag}$  es la rigidez axial elástica de cada una de las diagonales y  $K_{dis}$  es la rigidez elástica del dispositivo disipador.

Con esta forma de obtener la rigidez axial equivalente de las diagonales es posible emplear algún programa de análisis estructural que modele el comportamiento únicamente elástico, para así obtener una buena aproximación.

Afortunadamente, en la actualidad, como ya se mencionó antes, existen programas de computadora, como el ETABS o el SAP2000, que permiten modelar explícitamente a los dispositivos disipadores, considerando el comportamiento inelástico que éstos tienen.

### 5.1.1 Dispositivos solera

En los dispositivos solera, la disipación de energía se produce por la histéresis asociada al rolado, por flexión de las soleras.

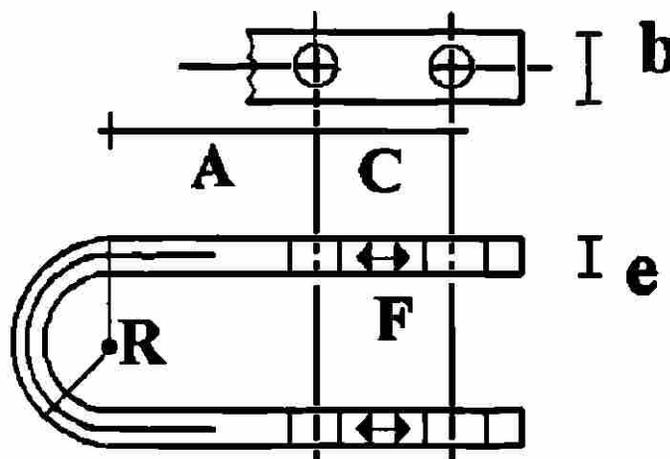


Fig. 5.2 Geometría típica de los dispositivos solera.

Cuando los dispositivos se colocan en un arreglo con diagonales concéntricas, éstos trabajan en la misma dirección que las diagonales, mientras que en un arreglo con contraviento chevrón, trabaja, en la dirección horizontal, oblicua a las diagonales. Por tanto, para fines de cálculo de las diagonales equivalentes definidas por las ecuaciones 5-1 y 5-2;  $K_{dis}$  es igual a la rigidez elástica inicial del dispositivo solera. De acuerdo con el modelo histerético general propuesto por Aguirre y Sánchez (1992), con base en sus ensayos experimentales, la curva primaria de cualquier dispositivo solera está dada por las siguientes expresiones:

$$K_{dis} = 4.24 \frac{F_u}{e} \quad (5-3)$$

$$K_2 = 0.134 \frac{F_u}{e} = 0.032 K_{dis} \quad (5-4)$$

$$F_u = F_{uds} = \frac{M_p}{R} = \frac{\sigma_u b e^2}{4R} \quad (5-5)$$

$$\Delta_y = 0.1782e \quad (5-6)$$

$$\Delta_u = 2e \quad (5-7)$$

$$F_y = 0.756 F_{uds} \quad (5-8)$$

donde  $\sigma_u$  es el esfuerzo último del acero con que se hace la solera; b el ancho de cada solera; R representa al radio medio de curvatura de la solera; e el espesor de ésta;  $K_2$  la rigidez posterior a la fluencia del dispositivo solera;  $F_y$  la fuerza de fluencia;  $F_u$  es la capacidad última del conjunto de soleras;  $D_y$  es el desplazamiento de fluencia y  $D_u$  el desplazamiento último.

De acuerdo con el estudio de Aguirre y Sánchez, para que un elemento solera sea capaz de resistir 100 ciclos al desplazamiento máximo ( $\pm 2e$ ), se debe cumplir que:

$$R = 3.57e \quad (5-9)$$

Por lo que, en este caso, la rigidez elástica inicial y la capacidad última del dispositivo solera se pueden estimar como (Tena 2000):

$$K_{da} = n(0.297\sigma_u b) \quad (5-10)$$

$$F_u = n(0.07\sigma_u b e) \quad (5-11)$$

donde  $n$  es el número de soleras en forma de "U", que constituyen parte del dispositivo. De acuerdo con los estudios de Aguirre y Sánchez, se recomienda utilizar soleras cuyo ancho sea tres veces su espesor ( $b = 3e$ ) y con un esfuerzo último  $\sigma_u = 4200 \text{ kg/cm}^2$ . (Tena-Colunga, 2000)

## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### 5.1.2 Dispositivos ADAS

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los ADAS están formados por placas de acero estructural, de sección variable, cuya forma se asemeja al perfil de un reloj de arena. Trabajan básicamente a cortante, plastificándose casi en su totalidad en una doble curvatura. para disipar energía por histéresis. (Tena-Colunga, 2000)

y Whittaker *et al*, que la definen como:

$$F_U = V_{ADAS} = n \left( \frac{\sigma_y b_{1eq} t^2}{2h} \right) \quad (5-18)$$

donde el esfuerzo de fluencia del acero utilizado para las placas de los ADAS es  $\sigma_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ , puesto que se utiliza acero A-36. El correspondiente desplazamiento de fluencia está definido por:

$$\Delta_y = \frac{V_{ADAS}}{K_{ADAS}} \quad (5-19)$$

En estudios previos (Whittaker, 1989, Tena 1995, Tena-Colunga 1997) se ha puesto de manifiesto que los desplazamientos de fluencia calculados con los procedimientos analíticos aquí presentados son subestimados con respecto a los que se obtiene en pruebas experimentales, debido a que en ellas no se logra proporcionar la condición de empotramiento perfecto que se supone en los métodos analíticos, ya que las placas que forman parte del dispositivo ADAS experimentan deslizamientos y rotaciones en sus extremos.

Si se persiguen fines de diseño y de análisis no lineal, se puede considerar, de una manera conservadora, que los dispositivos ADAS tienen un comportamiento elasto-plástico perfecto ( $K_2 = 0$ ), o más acorde con el comportamiento observado en estas pruebas experimentales, que presentan un comportamiento bilineal; cuya pendiente post-fluencia varía entre el 2 y el 10 por ciento; sin embargo, para fines prácticos, es razonable considerar que esta

pendiente es aproximadamente el 5 por ciento de la pendiente elástica, esto es,  $K_2 = 0.05 K_{ADAS}$ .

En ensayos experimentales se ha observado que los ADAS son capaces de desarrollar demandas de ductilidad locales del orden de 10, es decir,  $\Delta_u = 10\Delta_y$ , sin sufrir degradación en su resistencia, por lo que es éste el valor que debe ser tomado como un indicador del nivel de deformación que se puede tolerar para fines de diseño. En un experimento realizado por Whittaker, se reportó que un dispositivo fue sujeto a 160 ciclos de carga, de los cuales, en 124 se alcanzaron demandas de ductilidad locales entre 10 y 14. Los lazos histeréticos mostraron un comportamiento estable.

### 5.1.3 Dispositivos TADAS

Estos dispositivos, de geometría triangular, están formados por placas de acero y son, en realidad, una variante de los ADAS, por lo que también trabajan a cortante, con la salvedad que la plastificación se produce en curvatura simple, ya que se encuentran articulados en su vértice. De igual forma que los ADAS, es conveniente que los TADAS se coloquen en contravientos tipo chevrón, ya que de esa forma se consigue que los esfuerzos que hacen fluir a las placas sean de cortante, y es así como estos dispositivos trabajan mejor. La rigidez elástica inicial del dispositivo TADAS, de acuerdo con Tsai et al, está dada por:

$$K_{dis} = K_{TADAS} = n \left[ \frac{1}{8} E b \left( \frac{t}{h} \right)^3 \right] \quad (5-20)$$

donde  $n$  es el número de placas que constituyen el sistema TADAS,  $b$  es el ancho de las placas en sus extremos (figura 5.4),  $h$  es la altura de las placas y  $E$  es el módulo de elasticidad del acero con que se fabrican. El cortante de fluencia y el cortante último de los TADAS se calculan como:

$$V_{YTADAS} = n \left( \frac{\sigma_y b t^2}{6h} \right) \quad (5-21)$$

$$F_u = V_{TADAS} n \left( \frac{\sigma_y b t^2}{4h} \right) \quad (5-22)$$

en donde el esfuerzo de fluencia del acero utilizado para las placas que forman los dispositivos es  $\sigma_y = 2530 \text{ Kg/cm}^2$ , si se emplea un acero A-36, que con el que normalmente se fabrican las placas.

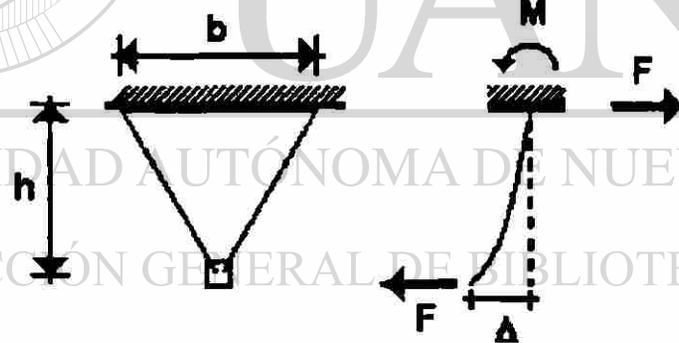


Fig. 5.4 Geometría y comportamiento los dispositivos TADAS.

El desplazamiento de fluencia de los TADAS queda definido de la siguiente forma:

$$\Delta_y = \frac{\sigma_y h^2}{Et} \quad (5-23)$$

Se han realizado pruebas experimentales a los dispositivos TADAS y los resultados muestran que el comportamiento histerético que tienen es bilineal estable (Tena-Colunga, 2000). Para fines de análisis no lineal y de diseño, es posible considerar que los sistemas TADAS tienen un comportamiento bilineal con una pendiente posterior a al fluencia entre el 3 y el 5 por ciento de la pendiente elástica.

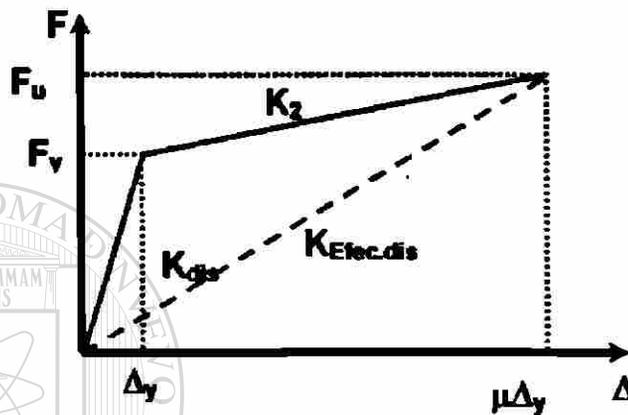
Según las pruebas experimentales hechas por Tasai *et al.*, esos dispositivos son capaces de desarrollar demandas de ductilidad locales del orden de ocho ( $\Delta_u = 8\Delta_y$ ) antes de que se presente el endurecimiento por deformación y de diez al presentarlos, así que este intervalo puede ser considerado como un indicador del nivel de deformación que puede aceptarse para fines de diseño.

## 5.2 Modelado para análisis no lineal

El análisis no lineal de estructuras con disipadores de energía, desde el punto de vista de investigación, es muy importante, ya que ello permite complementar los conocimientos que se tienen sobre el comportamiento de los sistemas que tienen este tipo de dispositivos disipadores de energía, lo que en un futuro, permitirá desarrollar procedimientos de diseño y, sobre todo, de reglamentación más racionales para implantar esta tecnología en el diseño cotidiano.

### 5.2.1 Rigidez efectiva de un disipador

En el diseño de estructuras con disipadores de energía, debe cuidarse que los disipadores y los elementos estructurales convencionales puedan soportar las fuerzas sísmicas de diseño; si, a priori, se supone una cierta ductilidad  $\mu$  de los disipadores.



**Fig. 5.5** Curva típica fuerza-deformación de un dispositivo con comportamiento bilineal.

De acuerdo con la figura anterior, la rigidez efectiva del disipador se calcula como:

$$K_{Efec.dis} = \frac{K_{dis} + K_2(\mu - 1)}{\mu} \quad (5-24)$$

### 5.2.2 Método de la diagonal equivalente

Este es un procedimiento que ha sido muy socorrido en los análisis no lineales. Consiste en definir diagonales no lineales que simulen al conjunto diagonal-disipador, cuya rigidez inicial se calcula según las ecuaciones 5-1 y 5-2, y la capacidad del elemento diagonal equivalente se define como una función de la

capacidad del elemento disipador  $F_u$ , de acuerdo con el arreglo utilizado. Las características de histéresis de la diagonal equivalente son las del elemento disipador.

Algunos autores (Tena-Colunga, 2000), plantean que esta no es la mejor forma de modelar a los disipadores, debido a que las bases en las que se fundamenta no son del todo sólidas y a que como lo que se modela es un conjunto, no se puede monitorear por separado el comportamiento de los disipadores y las diagonales.

### 5.2.3 Método del elemento axial equivalente

Este método sugiere que se modelen las diagonales por separado de los elementos disipadores, los cuales se incluyen utilizando elementos axiales equivalentes, cuyas propiedades de rigidez, resistencia e histéresis corresponden a las del disipador. Este modelado no es del todo idóneo, pero resulta más apropiado que el de la diagonal no lineal equivalente. Sobre todo en el caso de utilizar contravientos tipo chevrón (Tena-Colunga, 2000).

### 5.2.4 Métodos rigurosos

Debido a que el empleo de dispositivos disipadores parece ser exclusivo de los investigadores, es precisamente este tipo de métodos el que más se ha utilizado para incursionar en la investigación del comportamiento de los sistemas disipadores. Utilizar estos métodos permite monitorear por separado

el comportamiento de las diagonales y los disipadores, así como observar el trabajo que ambos tienen en conjunto, cosa que no es posible hacer con los métodos antes descritos.

El aumento en el número de los grados de libertad es en realidad mínimo y, como ya se mencionó, permite establecer un modelo más fiel a las condiciones de apoyo y conexión, así como una evaluación directa de las incertidumbres que puedan surgir. Se han hecho comparaciones de los métodos rigurosos con pruebas experimentales en la mesa vibradora y concluye que, para fines prácticos, es posible estimar los desplazamientos así como los cortantes mediante modelos analíticos rigurosos y de esa forma estudiar el comportamiento de los disipadores (Tena-Colunga, 1997, 2000). Algunas de sus recomendaciones son:

- i) El modelo de la diagonal equivalente debe utilizarse sólo en el análisis elástico y para fines de prediseño.
- ii) Al hacer análisis no lineales de estructuras con disipadores de energía, conviene modelar con rigor y de forma independiente los disipadores y los contravientos para monitorear por separado el comportamiento de cada uno de los elementos del conjunto del conjunto mismo y así tener una mejor aproximación a la realidad y evaluar las incertidumbres que puedan surgir.

- iii) En el caso particular del análisis no lineal de estructuras con disipadores ADAS, recomienda idealizar al disipador con un modelo bilineal y no un comportamiento elasto-plástico perfecto.

### 5.2.5 Modelos histeréticos

En los métodos convencionales de análisis y diseño estructural no se considera que existan variaciones de las propiedades dinámicas de los sistemas estructurales, ya que se utilizan para ese propósito programas de computadora que toman en cuenta exclusivamente un comportamiento lineal de la estructura, por lo que los modelos matemáticos elaborados de esa forma tienen propiedades dinámicas invariantes en el tiempo.

No obstante, evidencias experimentales muestran que los edificios presentan variaciones dignas de consideración de sus características dinámicas durante movimientos sísmicos, inclusive en eventos de intensidad moderada, esto se ha constatado con la experiencia de los sismos ocurridos y también en el laboratorio (González *et al*, 1994).

Cuando se observan cambios permanentes en las características de una estructura, esto puede ser un indicador de que se hay un deterioro de rigidez, el cual puede acumularse conforme el sistema se somete a excitaciones sísmicas durante su vida útil. Existe un gran número de investigaciones enfocadas a establecer modelos matemáticos representativos del comportamiento no lineal

de las estructuras. Dentro de los modelos matemáticos más utilizados destacan:

**El modelo bilineal.** Este modelo, conjuntamente con el elasto-plástico son unos de los modelos más simples para representar el comportamiento histerético no lineal de los elementos. El modelo de histéresis bilineal (figura 5.6), es similar al modelo elasto-plástico, excepto por el hecho de que se le asigna a la rigidez después de la fluencia una pendiente positiva, para simular las características de endurecimiento del acero por deformación. Este modelo se utiliza para modelar elementos de concreto reforzado.

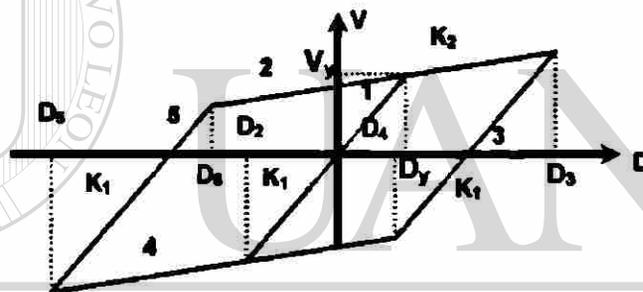


Fig. 5.6 Modelo bilineal.

El comportamiento histerético de los modelos antes mencionados sigue las siguientes reglas:

De acuerdo con la figura 5.6, que representa un ciclo de histéresis del comportamiento del elemento en donde:  $V_y$  es el cortante de fluencia;  $D_y$  la deformación de fluencia;  $K_1$  la pendiente elástica inicial y  $K_2$  la pendiente después de la fluencia.

Considerando que  $D_n$  es la deformación predicha, el comportamiento del elemento se puede resumir con las siguientes tres reglas:

Si se denomina a  $D_y$ ,  $D_3$  o  $D_6$  como  $D_{max}$  y a  $D_2$ ,  $D_4$  o  $D_5$  como  $D_{min}$ , entonces:

i) El elemento está en la condición de la rama 1, 3 ó 5:

- Si  $D_n > D_{max}$ , cambia a la rama 2
- Si  $D_n < D_{min}$ , cambia a la rama 4

ii) El elemento está en la condición de la rama 2:

- $D_n = D_{max}$
- $D_{min} = D_n - 2D_y$

iii) El elemento está en la condición de la rama 4:

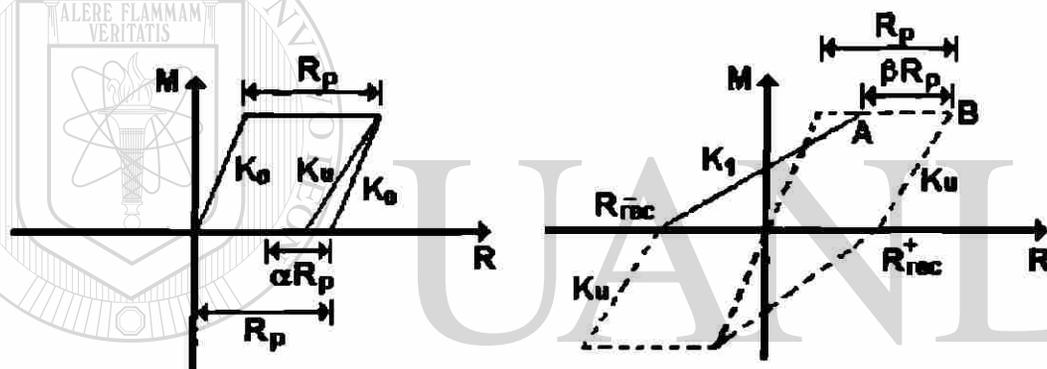
Si ocurre una descarga, se cambia a la rama 1, 3 ó 5, según el caso y se determina:

- $D_{max} = D_n + 2D_y$
- $D_{min} = D_n$

**El modelo de Takeda, con degradación de la rigidez.** En 1970, Takeda propuso un modelo de comportamiento histerético, posteriormente, Powell en 1975 hizo algunas modificaciones al modelo original. Las extensiones hechas al modelo se muestran en las siguientes figuras: 5.7 y 5.8. En ellas se incluyen:

- i) Una reducción de la rigidez a la descarga, por una cantidad que depende de la máxima rotación previa.
- ii) La incorporación de una rigidez en la recarga variable, la cual es mayor que la del modelo de Takeda original y también depende de la historia de las rotaciones del extremo del elemento.

La rigidez a la descarga,  $K_u$ , depende de la rotación máxima y es controlada por el parámetro  $\alpha$ , el cual sirve para localizar el "punto de recobre"  $R_{rec}$ , como se muestra en la figura 5.7a. Este parámetro siempre es positivo y toma valores típicos entre 0 y 0.4. Sin importar cuál es el valor de  $\alpha$ , la pendiente de descarga siempre será mayor que la pendiente de recarga en el otro sentido, pues de otra manera se producirían ciclos de histéresis con un área negativa. La rigidez de recarga,  $K_1$ , también depende de la rotación máxima y es gobernada por el parámetro  $\beta$  (figura 5.7 b). Este parámetro siempre es positivo y toma valores entre 0 y 0.6.



a) Rigidez en la descarga

b) Rigidez en la recarga

Fig. 5.7 Rigidez del modelo de Takeda.

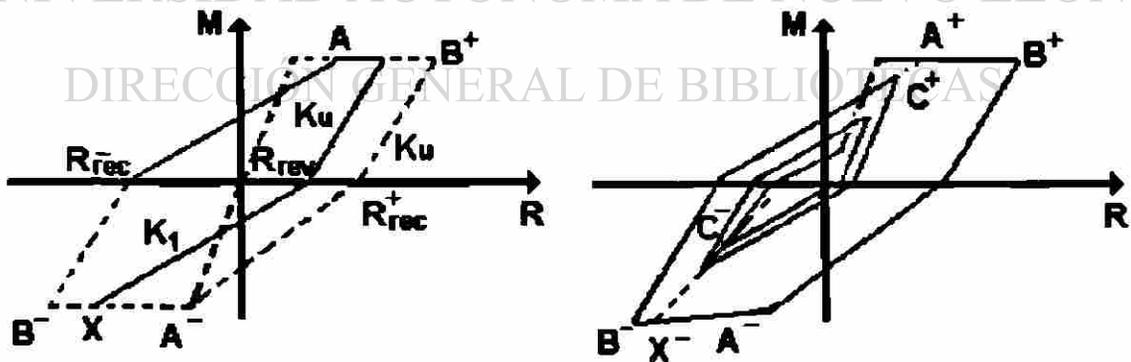
Las relaciones para las amplitudes pequeñas se suponen similares a las del modelo de Takeda, pero se formulan reglas adicionales para el cálculo de la rigidez a la recarga.

De acuerdo con la figura 5.8 a, el punto de inversión del signo de la carga,  $R_{rev}$ , cae dentro del punto de recobre positivo,  $R_{rec}^+$ , debido a que la excursión inelástica no alcanza el punto máximo previo,  $\beta^*$ . En esta situación, no es probable que la pendiente de recarga negativa se dirija al punto  $A^*$ , el cual sería

el punto de recarga definido en términos del parámetro  $\beta$  y el punto máximo previo  $B^-$ . Si se supone la trayectoria de la recarga hacia el punto  $A^-$ , la pendiente de la recarga tenderá a ser excesivamente alta y puede llegar a ser negativa si el punto  $R_{rev}$  cae a la izquierda  $A^-$ . Para evitar esto, se supone que la trayectoria a la recarga se dirige a un punto  $X$  que cae entre los punto  $A$  y  $B$ , en un lugar que depende de la localización de  $R_{rev}$  entre  $R_{rec}^-$  y  $R_{rec}^+$ . La relación específica, en este caso para la recarga negativa, es:

$$\frac{AX}{AB} = \left[ \frac{R_{rec}^+ - R_{rev}}{R_{rec}^+ - R_{rec}^-} \right]^N \quad (5-25)$$

Con una relación similar para la recarga positiva. Para  $N=1$ ,  $X$  está posicionado entre  $A$  y  $B$  en igual proporción como  $R_{rev}$  está entre  $R_{rec}^+$  y  $R_{rec}^-$ . Para  $N>1$ ,  $X$  está más cargado hacia el punto  $A$  y para  $N<1$  hacia el punto  $B$ . Si  $\beta$  es igual a cero, la recarga es siempre hacia el punto  $B$ .



a) Recarga después de un ciclo de fluencia completo b) Comportamiento amplitudes pequeñas

Fig. 5.8 Comportamiento en ciclos del modelo de Takeda.

En la figura 5.8 b se muestra una serie de ciclos para amplitudes pequeñas. El comportamiento es idéntico al del modelo de Takeda, excepto que la rigidez a la recarga, desde el punto C a la línea AB, está basada en la posición del punto de inversión de signo, de la carga más reciente.

Algunas de las características de este modelo, sobre todo las asociadas con las oscilaciones de las amplitudes pequeñas; se han seleccionada basándose en el juicio del ingeniero para evitar patrones de comportamiento inconsistentes. Esto se debe a al falta de datos y pruebas experimentales que apoyen el modelo.

**El modelo de Ramberg-Osgood.** Este modelo ha sido empleado sobre todo para idealizar el comportamiento no lineal de estructuras metálicas. Este modelo es atractivo matemáticamente debido a que posee muchas propiedades que simplifican la integración de las ecuaciones diferenciales de los sistemas.

(González, 1995).

**El modelo de Wang y Shah.** Es un modelo que considera el deterioro de rigidez de la estructura basado en el concepto de daño acumulado por fatiga. Ha sido aplicado con éxito para conexiones viga-columna, pero es posible aplicarlo a diferentes tipos de fenómenos asociados a fatiga (González, 1995).

**El modelo de Wen.** Este modelo es el modelo histerético más utilizado recientemente, en problemas de identificación de parámetros de sistemas estructurales no lineales, sobre todo cuando se utilizan estrategias recursivas de estimación, como la del Filtro de Kalman Extendido. Este modelo es

atractivo matemáticamente, porque mediante él es posible representar, de una manera sencilla, diferentes formas histeréticas del sistema, con base en cambios en las constantes que caracterizan el modelo, aunque tiene limitaciones, cuando se le somete a ciertas condiciones de carga. (González, 1995).

**El modelo de Iwan.** Este modelo guarda una mayor relación con el fenómeno físico de histeréticos y, matemáticamente es más estable que el modelo de Wen (González, 1995).

Los modelos matemáticos que se utilizan generalmente para representar sistemas estructurales no lineales consideran exclusivamente el comportamiento global del sistema, despreciando algunos efectos que pueden gobernar la respuesta dinámicas del sistema, como por ejemplo, el efecto de acoplamiento entre los movimientos de traslación y torsión del sistema y la participación de algunos modos superiores.

El intento de incorporar las leyes constitutivas en modelos de sistemas de múltiples grados de libertad, a fin de considerar los efectos ya mencionados, es un reto desde el punto de vista matemático, dado que el número de parámetros a identificar en el sistema se incrementa significativamente, acarreado problemas de estabilidad y convergencia en los algoritmos de estimación (González, 1995).

## 5.3 Modelaje de edificios

### 5.3.1 Generalidades del enfoque sismorresistente

Admitiendo que los sismos son una expresión de la Tierra para liberar su energía interna, todas las construcciones que reciben parte de esta energía ( $E_i$ ), tendrán que disiparla o distribuirla de alguna manera. Por lo general, se sabe que la energía de entrada ( $E_i$ ) en una edificación se disipa mediante cuatro formas; a saber, energía de deformación elástica ( $E_s$ ), energía de movimiento, o energía cinética ( $E_k$ ), energía de amortiguamiento ( $E_D$ ), asociada al amortiguamiento modal de la estructura, el cual se expresa como una fracción del amortiguamiento crítico y, energía por comportamiento inelástico ( $E_H$ ), también llamada energía por comportamiento no lineal o ductilidad, el caso en el que se emplean dispositivos ADAS como elementos reductores de la respuesta,  $E_H = E_{ADAS}$ . El balance de energías queda como:

$$E_i = E_s + E_k + E_D + E_H \quad (5-25)$$

Hasta ahora, la mayoría de los reglamentos establecen el hecho de que la mayor contribución de estas cuatro formas de disipar energía de un sismo en un edificio, sea aquella en que los nudos entre las vigas y columnas, o bien, ciertas partes de vigas solamente, llamados eslabones de cortante (shear-link) en los sistemas estructurados con contravientos excéntricos, puedan disipar mediante su trabajo inelástico; es decir, mediante los múltiples ciclos histeréticos de carga

y descarga que dichos nudos o porciones de viga desarrollan durante la duración del sismo.

Dicho de otra manera, la energía que se disipa por ductilidad:  $E_H$  es, según los códigos actuales de diseño sísmico, la mayor fuente de disipación de energía de la estructura de un edificio, ya que se ha comprobado que las otras tres fuentes de disipación  $E_s$ ,  $E_K$  y  $E_D$ , representan por lo general una pequeña porción de la disipación total de energía, es decir que:  $E_H > E_s + E_K + E_D$ .

De este enfoque reglamentario actual se derivan distintas formas de interpretar la reserva inelástica de resistencia de los sistemas estructurales y estimar su comportamiento inelástico, haciendo consideraciones tales que mediante la utilización de métodos de análisis lineales sencillos, ya sean planos o tridimensionales, se tome en cuenta de una manera global y simplista, la forma de las articulaciones plásticas del sistema estructural que definen los mecanismos de colapso y carga última de los mismo. Así, los valores de los factores  $Q$  de algunos reglamentos y  $R$  de otros, permiten reducir los espectros de diseño reglamentarios a otros, con los cuales las estructuras se comportan, supuestamente, de una manera elástico-lineal.

En esta investigación, la herramienta utilizada para analizar los edificios estudiados fue el programa ETABS, en su versión 8.06. Este *software* fue concebido para el análisis de edificios y, debido a eso, permite realizar análisis de modelos espaciales considerando, simultáneamente, un comportamiento lineal para algunos elementos y otro no lineal para otros. También permite realizar análisis paso a paso y tiene la particularidad de que al hacer este tipo

de análisis puede calcular las energías de entrada, cinética, potencial, disipada por comportamiento modal y por histéresis, de acuerdo con la ecuación de equilibrio dinámico, en términos de energía planteada por Chia-Ming y Bertero (1988). Es por ello que se consideró el empleo de este programa para analizar la influencia de los ADAS en los edificios estudiados.

#### 5.4 Tipos de análisis utilizados

El tipo de análisis empleado para los edificios de este estudio fue un análisis no lineal, paso a paso. Considerando tres acelerogramas de tres sismos diferentes: El Centro, SCT y CU. El primero, El Centro, se utilizó para un edificio de cuatro niveles, de igual forma el de CU, mientras que el de SCT se empleó para el análisis de los edificios de veinte niveles y la Torre Ángel.

Para la modelación de las estructuras estudiadas en este trabajo, se utilizó el programa de análisis tridimensional ETABS, versión 8.06 (Extended Three - Dimensional Analysis of Building Systems), incorporando en el modelo tridimensional de las estructuras los elementos ADAS. Para representar estos elementos, se utilizó el elemento *link*, en su versión *no-lineal Plastic1*, cuya rigidez elástica está definida por  $K_{ADAS} = K_d = F_y / \Delta_y$  (Fuerza y desplazamiento de fluencia).

El programa ETABS, como ya se mencionó antes, es capaz de realizar análisis considerando la no linealidad de los elementos disipadores de energía y al mismo tiempo considerar comportamiento lineal para el resto de los elementos.

## 5.5 Consideraciones de análisis

Las consideraciones hechas para este trabajo se presentan a continuación, a manera de puntos:

- i) **Análisis tridimensional de las estructuras.** Se hace de esta manera para considerar la influencia de todos los elementos que componen el edificio, además, al hacer un análisis en tres dimensiones es posible tomar en cuenta fenómenos como el de torsión, que en algunos casos puede ser importante, sobre todo cuando la rigidez en planta no se haya distribuida de una manera más o menos simétrica.
- ii) **El material que constituye a los elementos que componen la estructura es homogéneo e isotrópico; es decir, que se comporta con las mismas propiedades en todas sus direcciones y que es elástico lineal.**
- iii) **La unión entre elementos es tal, que se considera que existe una zona rígida en ese punto.**
- iv) **Existe un diafragma rígido en cada entrepiso. Todos los puntos de un entrepiso se desplazan la misma distancia en su plano. Esta consideración es posible, gracias a que existe una losa que tiene suficiente rigidez en las direcciones ortogonales a su plano.**
- v) **La unión entre columnas y la cimentación es infinitamente rígida, lo que permite no tomar en cuenta la interacción suelo-estructura.**

- vi) El sismo es linealmente independiente en dos direcciones perpendiculares en la planta del edificio. Para cada uno de los edificios se hace el análisis justamente en la dirección en que trabajan los disipadores de energía, es esa la dirección de análisis.
- vii) Comportamiento bilineal de los disipadores. Para el análisis del comportamiento de los ADAS, se considera que éstos siguen las reglas de un modelo bilineal cuya pendiente post-fluencia es el cinco por ciento de la rigidez inicial.
- viii) Los edificios tienen un amortiguamiento modal, cuyo valor es el tres por ciento del amortiguamiento crítico. Se considera que este valor es representativo del que tienen las estructuras, con características similares a los edificios analizados.

## CAPÍTULO 6

### INFLUENCIA DE DISPOSITIVOS EN EDIFICIOS DE PERIODO CORTO

En este capítulo se analiza el primer caso de estudio teórico: en él se estudia la influencia que tienen los disipadores en un edificio de cuatro niveles, cuyo periodo inicial es de 0.5 segundos. El objetivo de tratar este caso, como ya se mencionó con anterioridad, es porque en este modelo se controlan los parámetros que se consideran importantes en el comportamiento de los dispositivos histeréticos, como lo son: el porcentaje de rigidez lateral que toman los ADAS y el umbral de cedencia de los disipadores.

#### 6.1 Descripción del edificio

Este edificio tiene cuatro niveles, cuya altura de entrepiso es de 3 m; las dimensiones en planta son: 19 m, en la dirección "X" y 16 m, en la dirección "Y", lo que da un área de 304 m<sup>2</sup>. La estructura está formada por cuatro marcos, cada uno de tres claros, conectados a momento, de perfiles de acero estructural A-36, en la dirección de análisis y cuatro marcos, de tres claros también, en la dirección perpendicular. Estos marcos, al igual que los principales, están formados por acero A-36, pero conectados únicamente a cortante. Todos los marcos están constituidos por vigas y columnas del tipo IPR.

En la dirección de análisis, en este caso la dirección "X", en el claro central que es el claro mayor (7 m), se colocan los disipadores de energía, en los contravientos que son del tipo chevrón, ya que, como se discutió en capítulos anteriores, es precisamente este tipo de contravientos el que permite el mejor desempeño de los disipadores histeréticos, del tipo ADAS.

Cabe mencionar que para poder controlar las variables de estudio se colocan los disipadores en una sola dirección, además de que es únicamente en esa dirección en la que se aplica los acelerogramas de los sismos utilizados; por ello, en la dirección que no es la de análisis, además de que no se aplican componentes de los sismos, no se utilizan los disipadores. Sin embargo, si se considera un análisis tridimensional de la estructura y por ello si intervienen en el análisis del edificio la participación modal de los modos correspondientes a la dirección perpendicular a la de análisis y los modos de torsión, participación que no se considera si se analizan marcos planos.

En la dirección perpendicular a la dirección de análisis, dirección "Y", también en el claro central que corresponde al claro de mayor longitud (6 m), se colocan contravientos sin disipadores; en este caso, del tipo cruz, cuyo fin es darle rigidez lateral al edificio en esa dirección.

El sistema de piso lo constituye una losa de concreto de 20 cm, porque se considera que este espesor da a la losa suficiente rigidez en su plano, como para aplicar la hipótesis del diafragma rígido.

Para este edificio se estudiaron tres diferentes combinaciones de rigidez lateral: la primera, cuando los marcos toman el 75 % de la rigidez lateral y los ADAS toman el 25 %; la segunda, en la cual los marcos toman el 50 % y los dispositivos ADAS el otro 50 %; y, por último, una distribución de rigideces tal que los marcos toman el 25 % y los ADAS el otro 75 %. Para conseguir esto se variaron los perfiles que forman los marcos, de tal forma que el periodo inicial de la estructura fuera siempre  $T = 0.5$  s.

La carga, con la que se calcula el peso considerado para cada nivel, ya considerando el peso propio y la carga viva, fue de  $W = 692$  kg/m<sup>2</sup>. Es en función de esta carga que se calcula el peso y las masas correspondientes a cada nivel.

Se utilizan dos diferentes pendientes post-fluencia para los dispositivos ADAS. Para los dos primeros niveles se asigna una pendiente igual al 100 por ciento de la rigidez que le toca a cada disipador, en función del cortante basal y los niveles superiores la pendiente, después de la fluencia se toma como la mitad de la pendiente de los disipadores de los primeros niveles, esto con la idea de que es precisamente en los niveles de abajo en donde el cortante es mayor y por eso deben tener un nivel de fluencia mayor que los de los niveles superiores.

Para calcular el valor de esa pendiente se divide el cortante basal entre el número de disipadores que se tienen en el primer nivel y ese valor, como ya se dijo, se le asigna a los dos primeros niveles, mientras que un valor

correspondiente a la mitad de ese se les asigna a los disipadores de los dos niveles superiores.

## 6.2 Acelerogramas de análisis

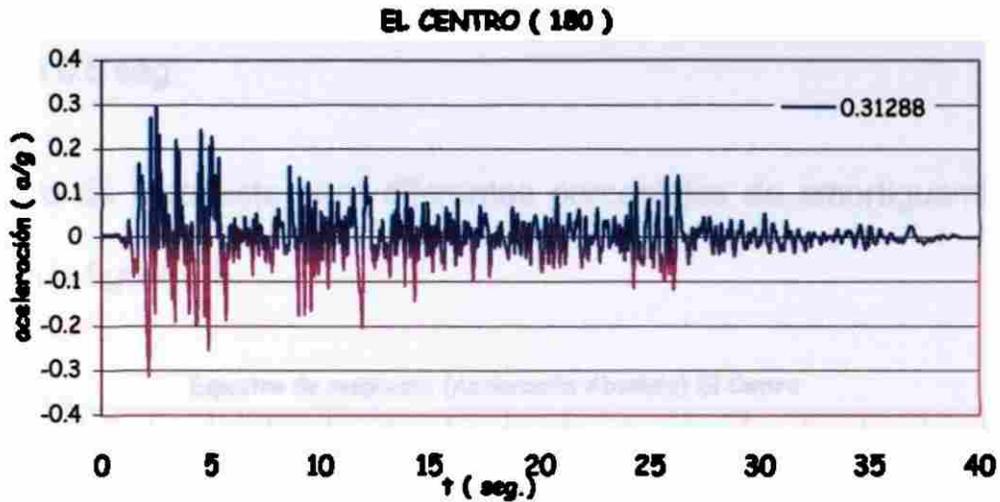
Este edificio se analiza suponiéndolo bajo la acción de dos acelerogramas, ambos registrados en terreno firme. Estos dos acelerogramas son: *El Centro*, registrado en Imperial Valley en 1940 y la componente E-W del acelerograma de CU '85, registrado en la Ciudad Universitaria, en el Distrito Federal, en 1985.

### 6.2.1 Acelerograma del sismo El Centro

El registro de aceleraciones que se considera del sismo de El Centro tiene una duración de cuarenta segundos, con una aceleración máxima registrada de 0.3129 g. El acelerograma presenta una fase intensa antes de los cinco segundos en donde se manifiestan los valores máximos de aceleración; posterior a esto mantiene respuestas de alrededor de 0.12 g.

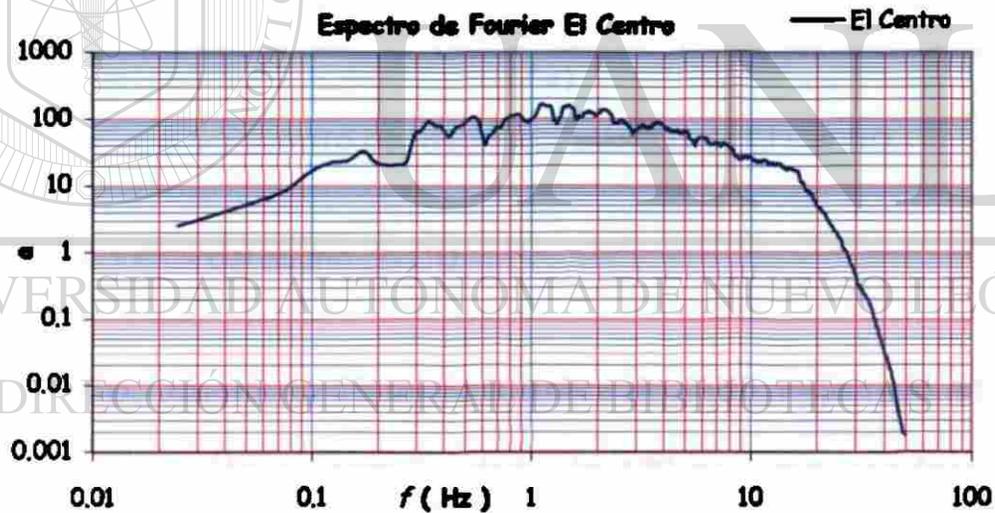
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la figura 6.3 se muestra, de manera gráfica, el acelerograma utilizado. En el gráfico es posible notar la fase intensa del sismo, al principio del movimiento y cómo esta fase no dura por un tiempo prolongado; sino que, posterior a la fase intensa, mantiene aceleraciones no mayores que 0.15g. Así mismo, se indica en el cuadro superior derecho del acelerograma el valor máximo de aceleración registrado en este sismo.



**Fig. 6.3** Acelerograma del sismo de El Centro.

En el Espectro de Fourier puede verse que el contenido de frecuencias de este sismo es amplio y va desde 0.1 hasta 10 Hz. (figura 6.4)

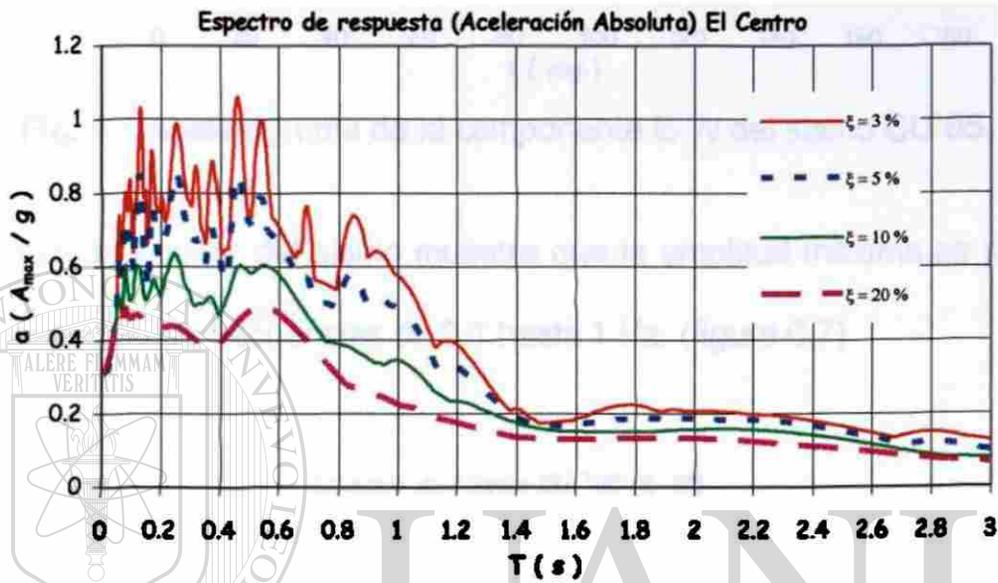


**Fig. 6.4** Espectro de Fourier de El Centro.

El espectro de respuesta elástico, correspondiente a este sismo, alcanza sus valores máximos para periodos que van desde 0.1 hasta 1 seg; después de este periodo se nota una disminución en la respuesta; sin embargo, no en todo el conjunto de periodos de máxima respuesta se mantiene constante, sino que hay crestas muy marcadas en el espectro, y una de esas crestas está

localizada en 0.55 seg, punto para el cual la respuesta es mayor que la que alcanza en 0.5 seg.

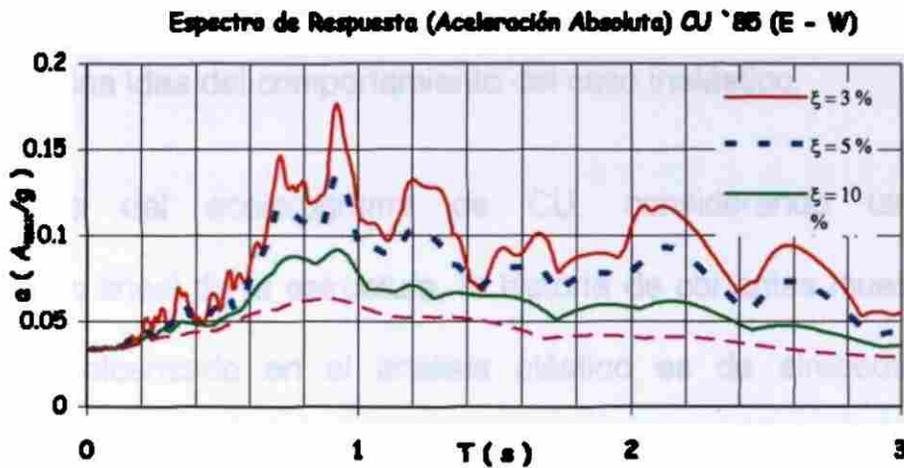
El espectro de respuesta para diferentes porcentajes de amortiguamiento se aprecia en la figura 6.5.



**Fig. 6.5** Espectro de respuesta elástico de El Centro.

### 6.2.2 Acelerograma del sismo de CU

El sismo de CU, ocurrido el 19 de Septiembre de 1985, registrado en terreno firme tuvo una duración de aproximadamente 180 seg, con una fase intensa entre los 40 y 60 segundos; alcanzando un valor máximo de 0.0293 g para la componente en la dirección Este- Oeste (E-W), el acelerograma se puede ver en la figura 6.6.



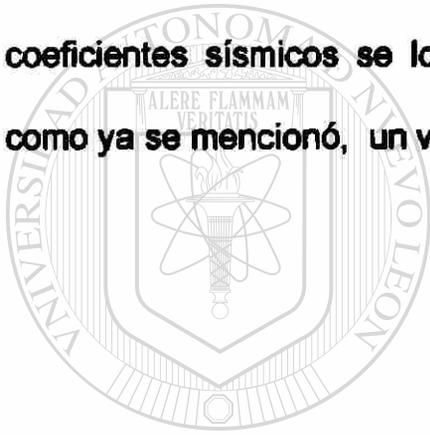
**Fig. 6.8** Espectro de respuesta elástico del acelerograma de CU '85 (E-W).

### 6.3 Coeficiente sísmico ( $C_s$ )

La historia de cortantes elásticos para este sismo muestra que el valor máximo de cortante en la base alcanza un valor de 584 Ton. (figura 6.9 a). Por otro lado, la historia de coeficientes sísmicos para el sismo de El Centro, en un análisis lineal del edificio, es decir, considerando que los dispositivos se comportan como resortes cuya rigidez es constante, muestra que el valor máximo que éste alcanza está cercano a 0.4 (figura 6.9 b), a partir de este valor máximo es que se eligen los diferentes umbrales de cedencia que se estudiarán posteriormente para este edificio; recordando que el umbral de cedencia se escoge a partir del coeficiente sísmico, ya que la idea es que los dispositivos disipadores trabajen y cumplan así su función, disipar energía. Esto se puede lograr eligiendo un umbral tal que la estructura no se comporte elásticamente a lo largo de la historia de las aceleraciones a las que se le somete, aunque hay que recordar que una vez que los disipadores fluyen, la estructura pierde rigidez y debido a ello el periodo de la estructura aumenta, lo que hace que el caso

lineal sea diferente del caso no lineal, sin embargo, es posible considerar que el caso lineal da una idea del comportamiento del caso inelástico.

Para el caso del acelerograma de CU, considerando también un comportamiento lineal de la estructura, la historia de cortantes muestra que el valor máximo alcanzado en el análisis elástico es de alrededor de 177 toneladas (figura 6.10 a). En la correspondiente historia de coeficientes sísmicos  $C_s$  se aprecia un valor máximo cercano a 0.12 g, según se aprecia en la figura 6.10 b. Para este caso, los valores máximos que se muestran en la historia de coeficientes sísmicos se localizan entre los 40 y 60 segundos; alcanzando, como ya se mencionó, un valor máximo alcanzado de 0.12 g.



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cortante en la Base y Coeficiente Sísmico (CU '85 E-W)  
Edificio de Cuatro Niveles

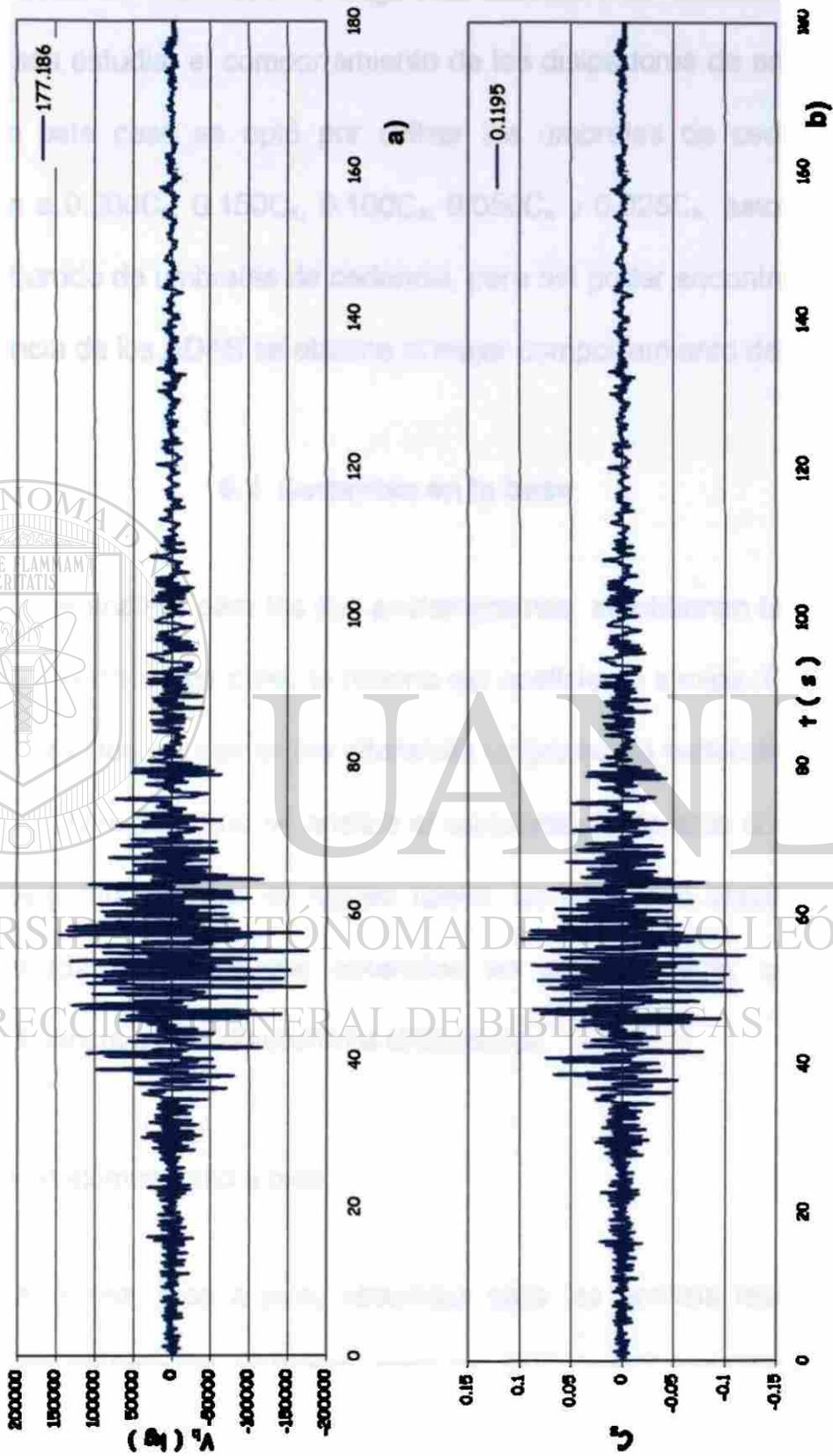


Fig. 6.10 Cortante en la base y Coeficiente sísmico (CU '85 (E-W)).

Una vez que se observan los valores del coeficiente sísmico, para cada uno de los acelerogramas de análisis, se escogen los umbrales de cedencia; para los cuales se desea estudiar el comportamiento de los disipadores de energía. En particular, en este caso se optó por utilizar los umbrales de cedencia que corresponden a  $0.200C_s$ ,  $0.150C_s$ ,  $0.100C_s$ ,  $0.050C_s$  y  $0.025C_s$ , esto con el fin de hacer un barrido de umbrales de cedencia, para así poder encontrar con que límite de fluencia de los ADAS se obtiene el mejor comportamiento del edificio.

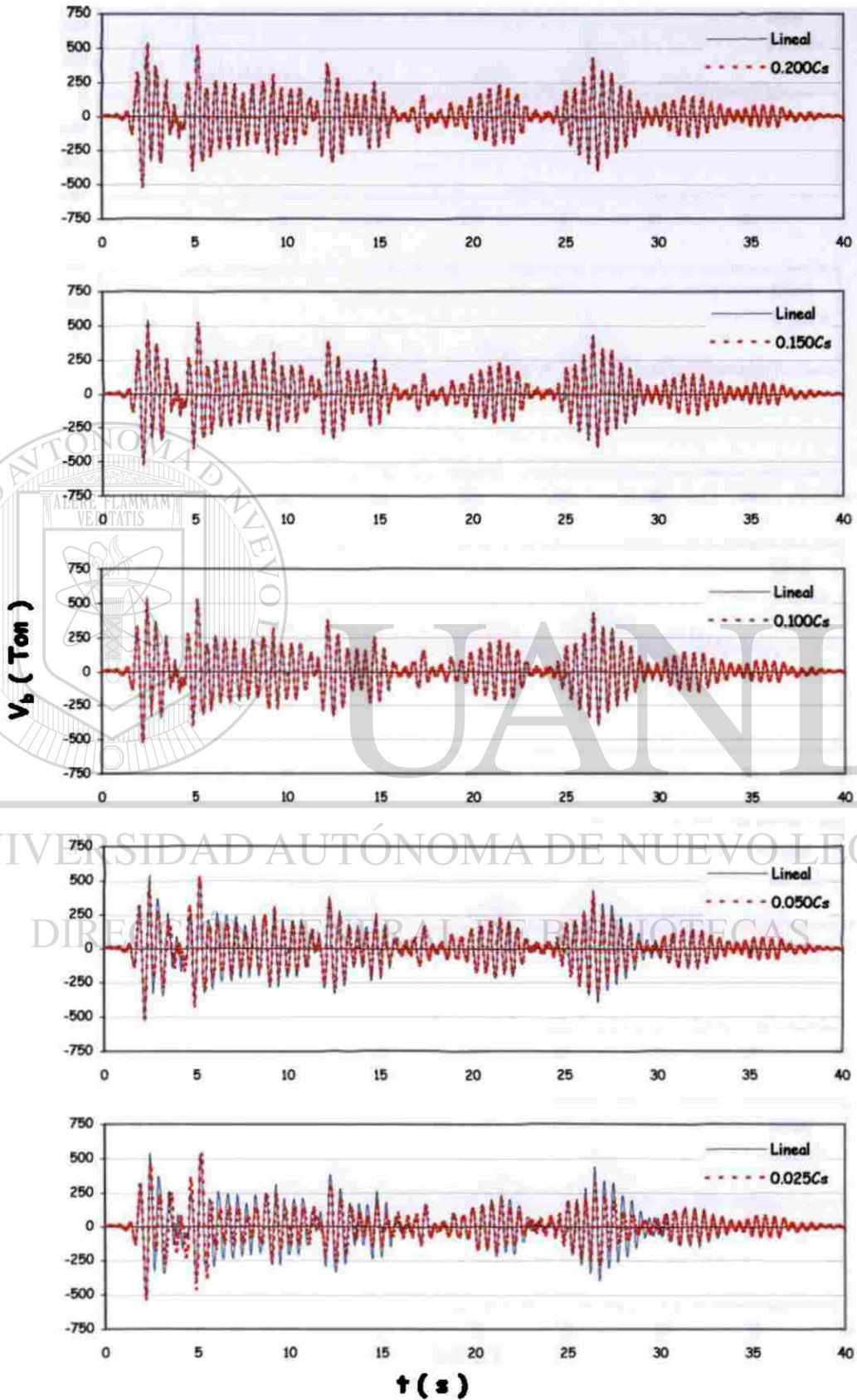
#### 6.4 Cortantes en la base

Una vez hecho el análisis para los dos acelerogramas, se obtienen las historias de cortantes en la base, así como la historia del coeficiente sísmico ( $C_s$ ), historia que sirve para fijar los valores de los diferentes umbrales de cedencia utilizados en este análisis. Debido a que se analiza el comportamiento ante dos sismos y tres diferentes combinaciones de rigidez lateral, es necesario separar de una manera ordenada los resultados obtenidos en cada análisis, para poder observar la influencia de los dispositivos disipadores.

##### 6.4.1 Valores máximos, pico a pico

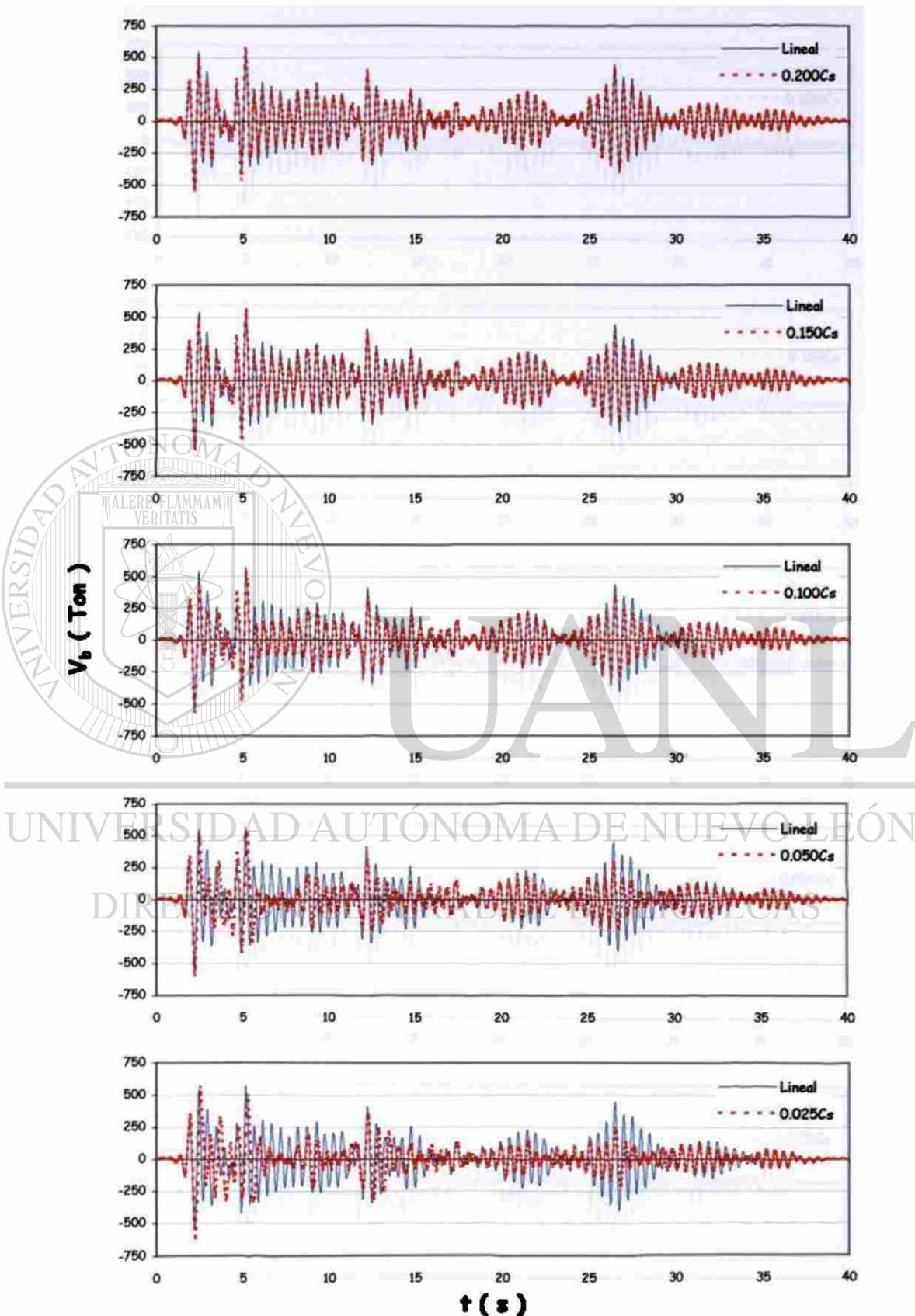
Los valores máximos, pico a pico, obtenidos para los análisis realizados se obtienen de las gráficas de cortantes, para los dos sismos considerados. Las historias de cortantes se presentan en las figuras 6.11 a 6.16.

**Cortante en la Base ( El Centro )**  
**Edificio de Cuatro Niveles**



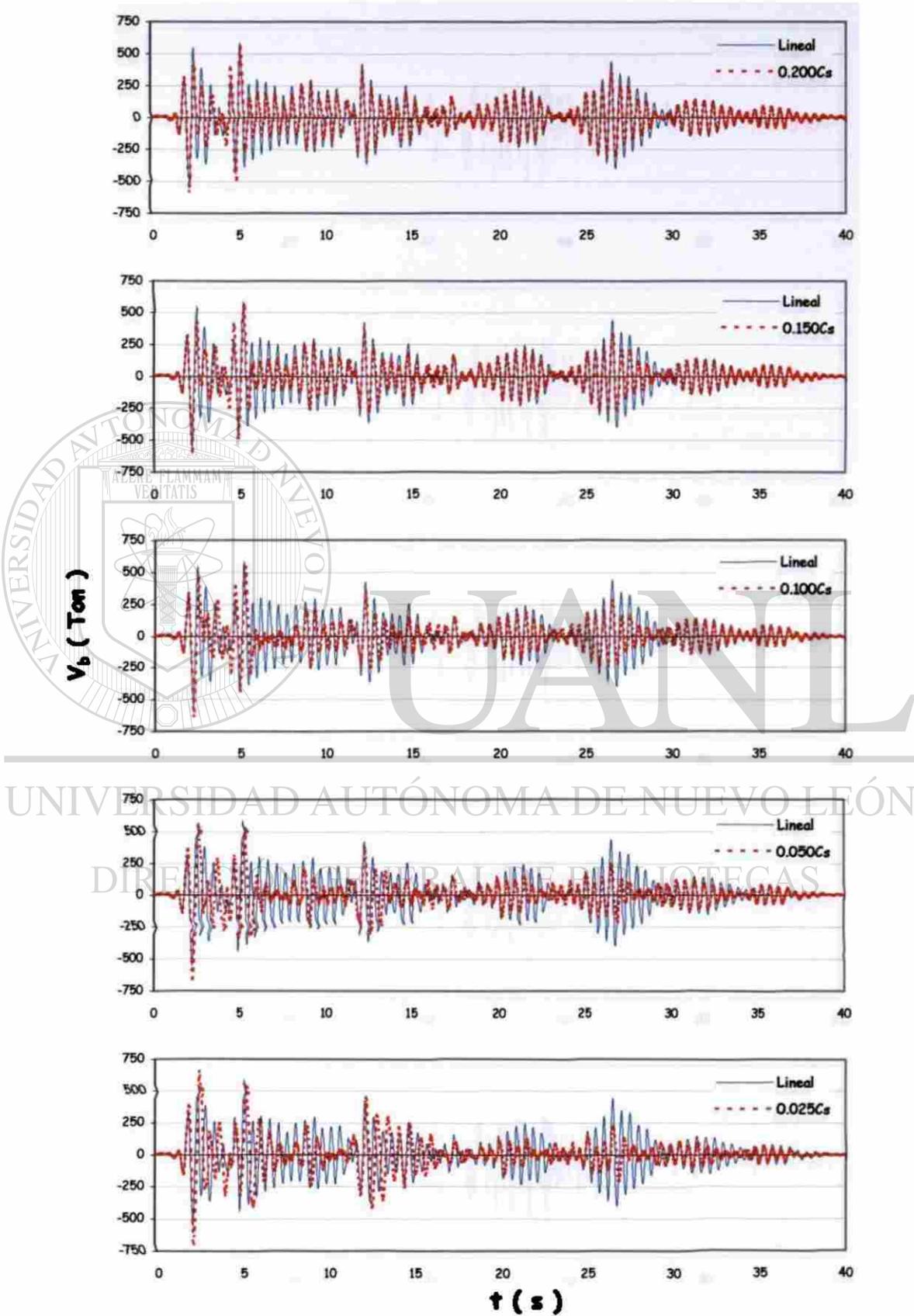
**Fig. 6.11** Historia de cortantes en la base (El Centro);  $K_{ADAS} = 25 \%$ .

**Cortantes en la Base (El Centro)**  
**Edificio de Cuatro Niveles**



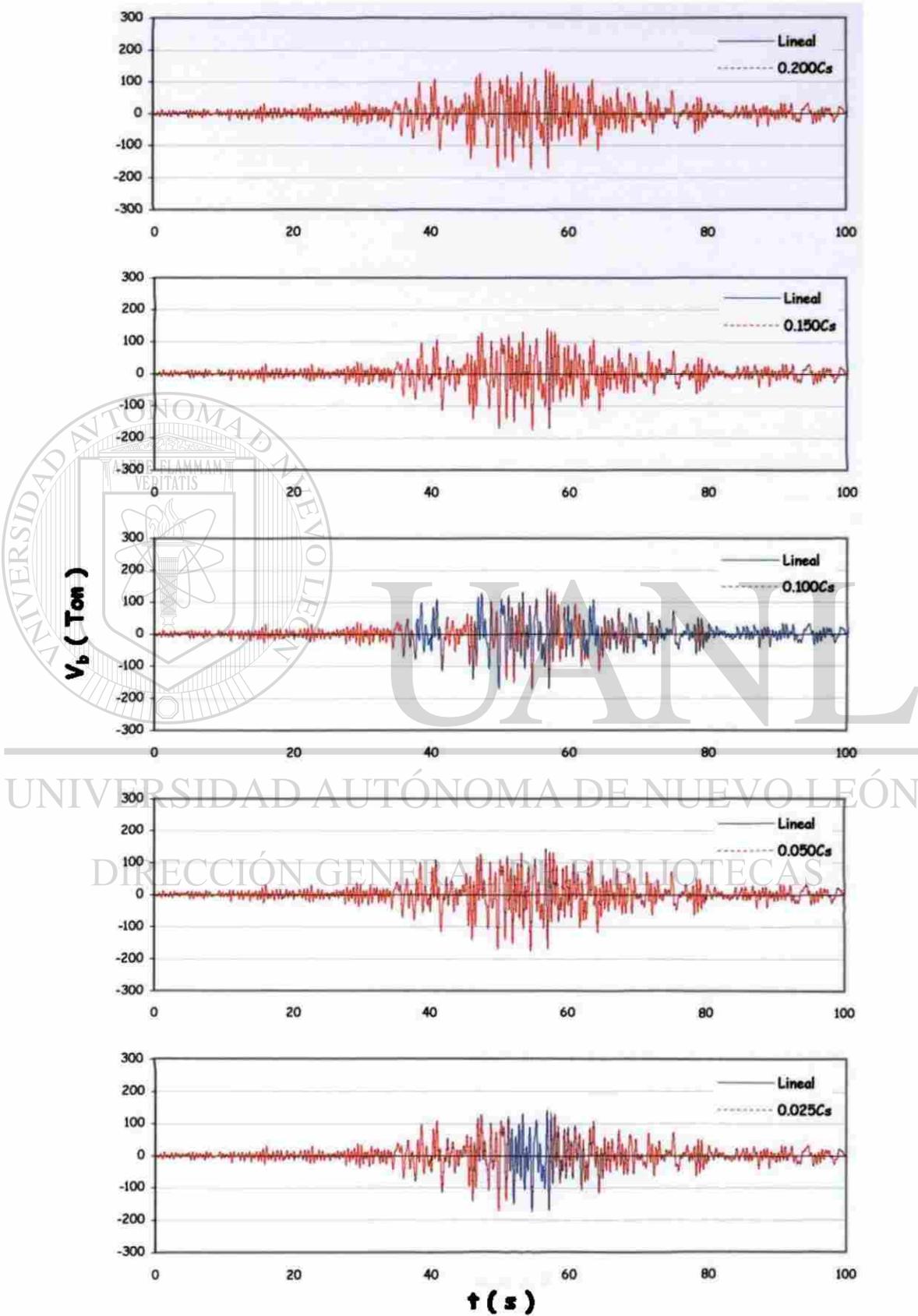
**Fig. 6.12** Historia de cortantes en la base (El Centro);  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

**Cortante en la Base ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles**



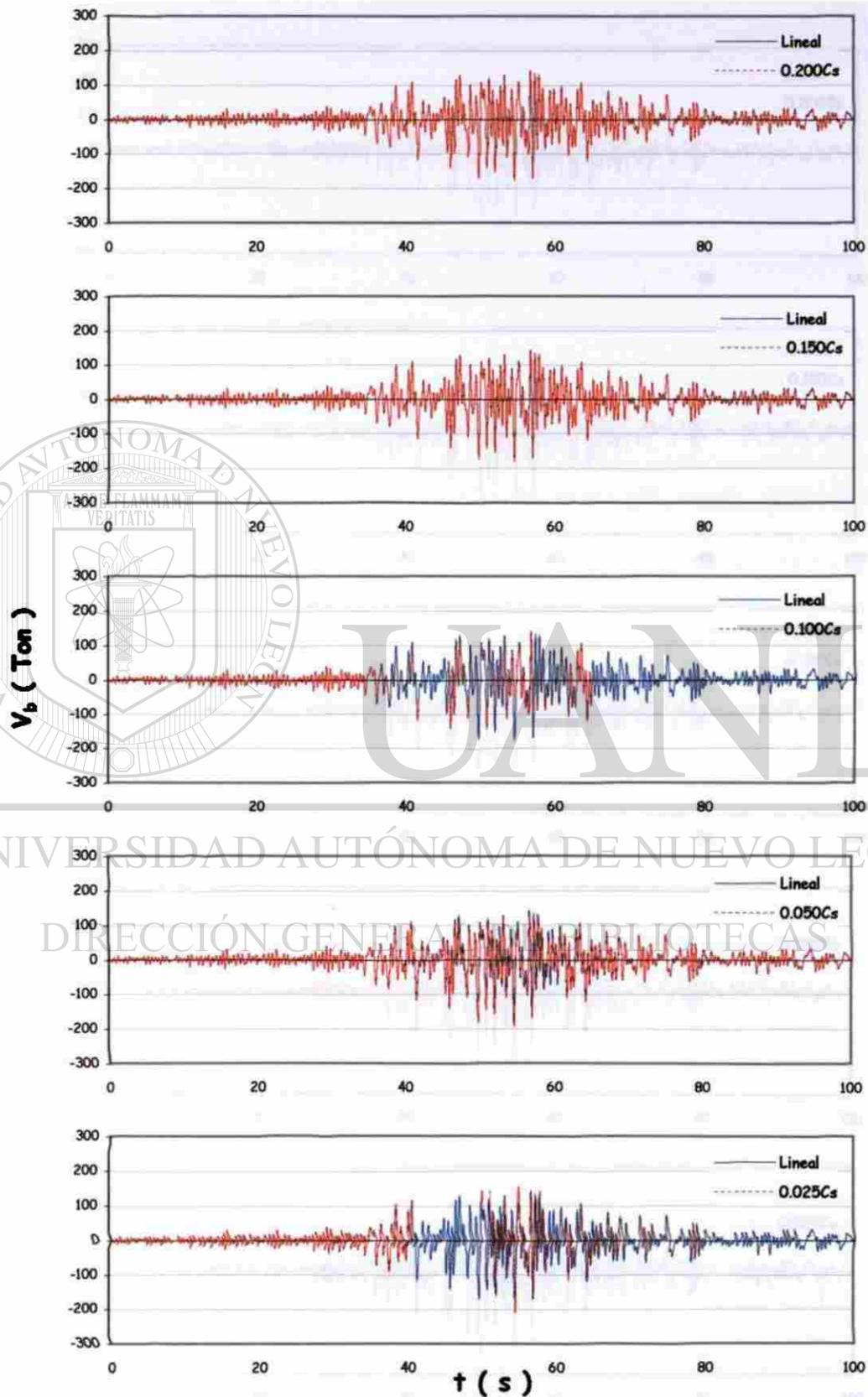
**Fig. 6.13** Historia de cortantes en la base (El Centro);  $K_{ADAS} = 75 \%$ .

**Cortante en la Base ( CU `85 E-W )**  
**Edificio de Cuatro Niveles**



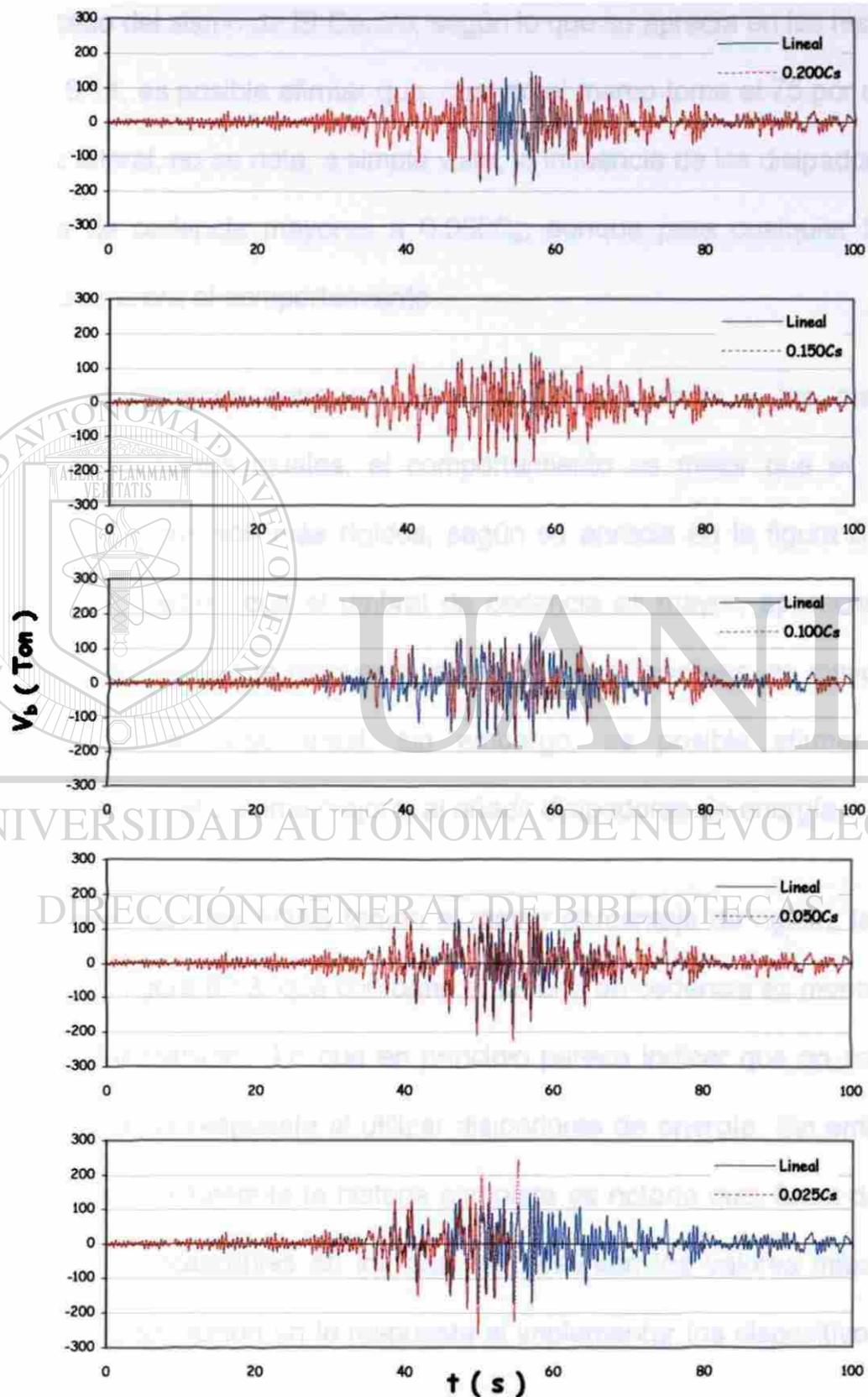
**Fig. 6.14** Historia de cortantes en la base (CU `85 (E-W));  $K_{ADAS} = 25 \%$ .

**Cortantes en la Base ( CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles**



**Fig. 6.15** Historia de cortantes en la base (CU `85);  $K_{ADAs} = 50 \%$ .

**Cortante en la Base ( CU `85 E-W )**  
**Edificio de Cuatro Niveles**



**Fig. 6.16** Historia de cortantes en la base (CU `85);  $K_{ADAS} = 75 \%$ .

En las gráficas anteriores se observaron las historias de cortantes para los dos sismos considerados en este análisis, el sismo de El Centro y el de CU.

Para el caso del sismo de El Centro, según lo que se aprecia en las historias de la figura 6.11, es posible afirmar que, cuando el marco toma el 75 por ciento de la rigidez lateral, no se nota, a simple vista, la influencia de los disipadores, para umbrales de cedencia mayores a  $0.050C_s$ ; aunque para cualquier límite de fluencia se mejora el comportamiento.

Cuando las rigideces entre los dispositivos disipadores y los marcos se distribuyen en partes iguales, el comportamiento es mejor que el obtenido cuando los marcos son más rígidos, según se aprecia en la figura 6.12; sólo que ahora, a medida que el umbral de cedencia es mayor, aparecen puntos localizados en los que la respuesta, al incluir los disipadores, es mayor que la obtenida para el caso lineal; sin embargo, es posible afirmar que el comportamiento del sistema mejora, al añadir disipadores de energía.

En el caso en que los ADAS toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, se aprecia en la figura 6.13, que conforme el umbral de cedencia es menor, mayor es el cortante máximo. Lo que en principio parece indicar que no se obtiene una mejoría en la respuesta al utilizar disipadores de energía. Sin embargo, si se observa detenidamente la historia completa es notorio que, fuera de puntos perfectamente localizables en los que se presentan los valores máximos, se obtiene una disminución en la respuesta al implementar los dispositivos ADAS,

sobre todo a partir de los veinte segundos, una vez que ha pasado la fase más intensa del sismo.

Para el sismo de CU, se observó que cuando la rigidez que toman los marcos es el 75 por ciento de la rigidez lateral total, los valores obtenidos para los distintos umbrales de cedencia muestran, como se aprecia en la figura 6.14, que conforme el umbral de cedencia es menor, los cortantes máximos son mayores. Comparando la respuesta de cada uno de los casos contra el caso lineal, no se aprecia gran mejoría en el comportamiento del edificio.

En el caso en que los ADAS toman la mitad de la rigidez lateral, según se observa en la figura 6.15, se presentan crestas en la respuesta para cuando los dispositivos están trabajando en conjunto con el marco. Al comparar cada una de las respuestas obtenidas para los diferentes umbrales de cedencia es notorio que conforme el umbral de cedencia es menor, mejora el comportamiento global del edificio, ya que se observa que los valores máximos encontrados son, en todo momento, mayores que los que se presentan para el caso lineal.

Cuando los marcos proporcionan el 25 por ciento de la rigidez lateral, según lo que se observa en la figura 6.16, es posible apreciar, a lo largo de la historia, que los cortantes máximos son mayores, conforme el umbral de cedencia es menor. Se observa que, en general, el comportamiento mejora, salvo en puntos máximos, localizados en el intervalo de 40 a 65 segundos, en donde los valores

de respuesta que se obtienen al utilizar los dispositivos disipadores son mayores que los obtenidos para el caso lineal.

#### 6.4.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia

Los resultados en rms son un mejor indicador del comportamiento global de la estructura; en este caso, el edificio analizado, ya que ponderan los valores obtenidos a lo largo de la historia; es por eso que se obtienen y comparan las respuestas, utilizando este índice para evaluar la conducta que tiene el edificio, con los valores máximos obtenidos pico a pico. Esto se hace para cada caso de rigidez estudiado, para los dos sismos de análisis.

En este caso, se presentan las gráficas que comparan los valores máximos tanto en valores pico a pico, como en rms, para los distintos umbrales de cedencia estudiados. Estas gráficas se muestran en las de las figuras 6.17 a 6.22 y se incluye en cada una de ellas una línea que muestra la tendencia del comportamiento de los valores máximos, en valores pico y en rms, encontrados para cada límite de fluencia. Es gracias a esa línea de tendencia, que se obtiene el punto óptimo del umbral de cedencia, tanto en valores pico, como utilizando el índice de rms.

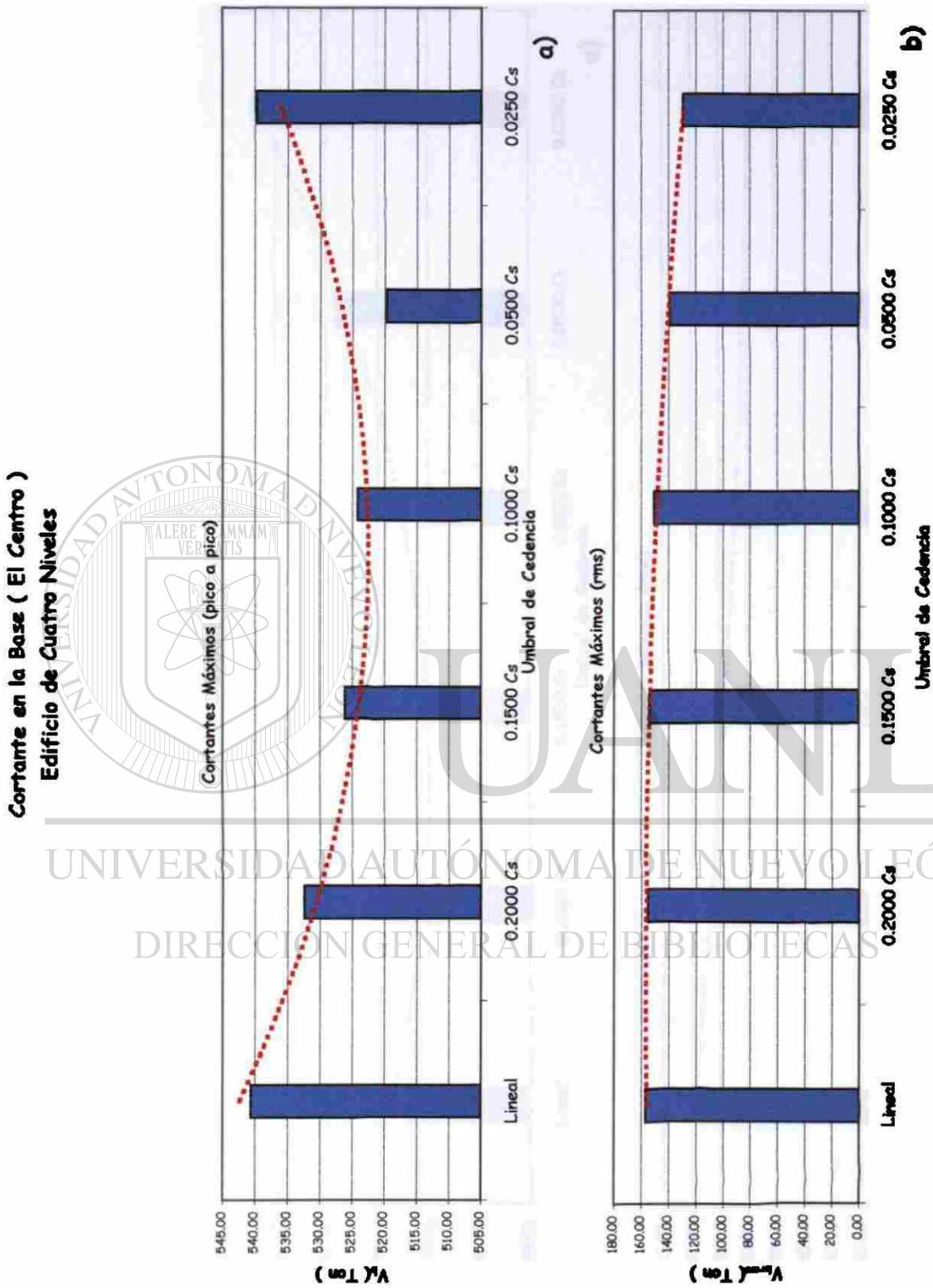


Fig. 6.17 Valores máximos de cortantes (El Centro);  $K_{ADAS} = 25\%$ .

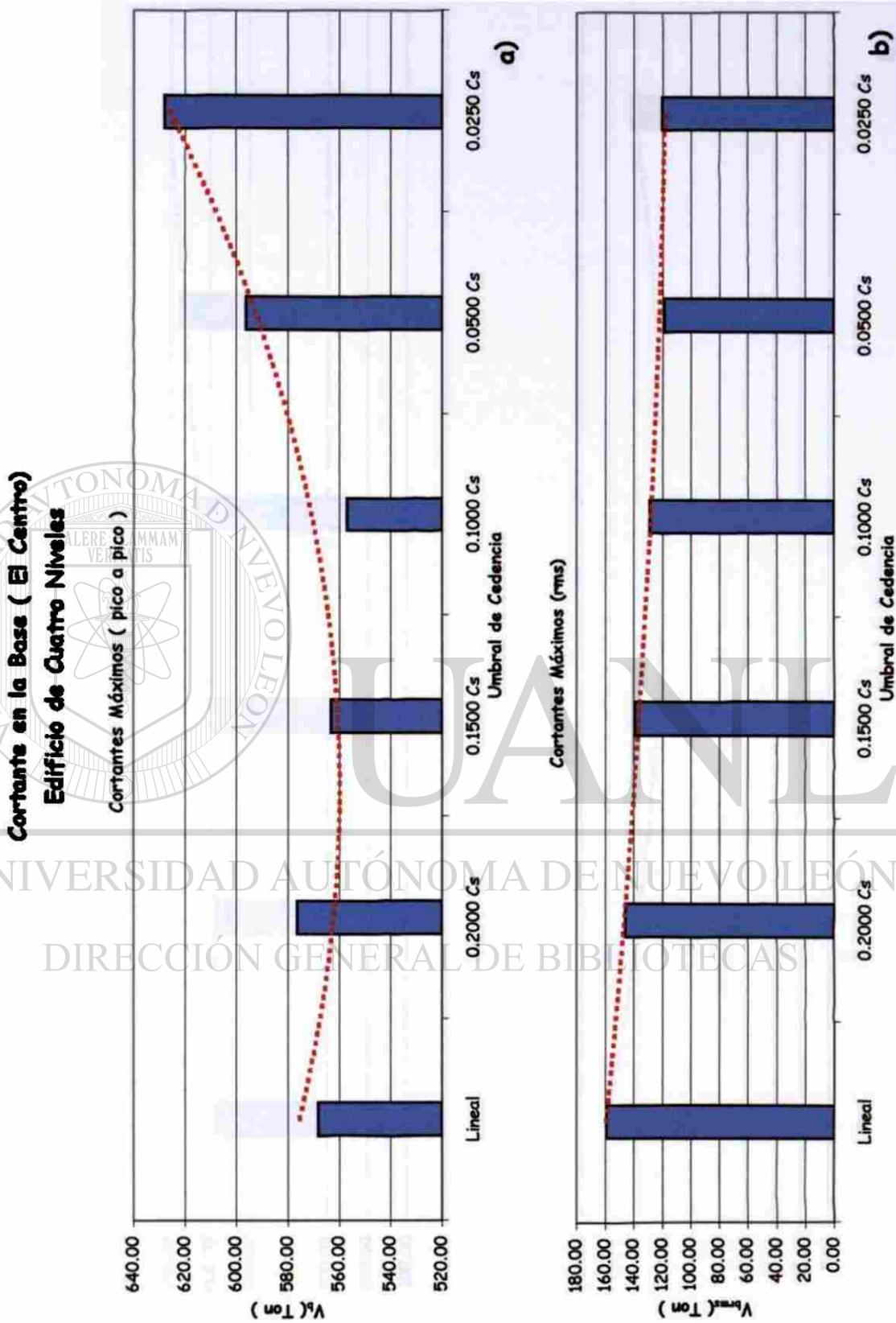


Fig. 6.18 Valores máximos de cortantes (El Centro);  $K_{ADAS} = 50\%$ .

Comparación de Cortantes en la Base ( El Centro )

Edificio de Cuatro Niveles

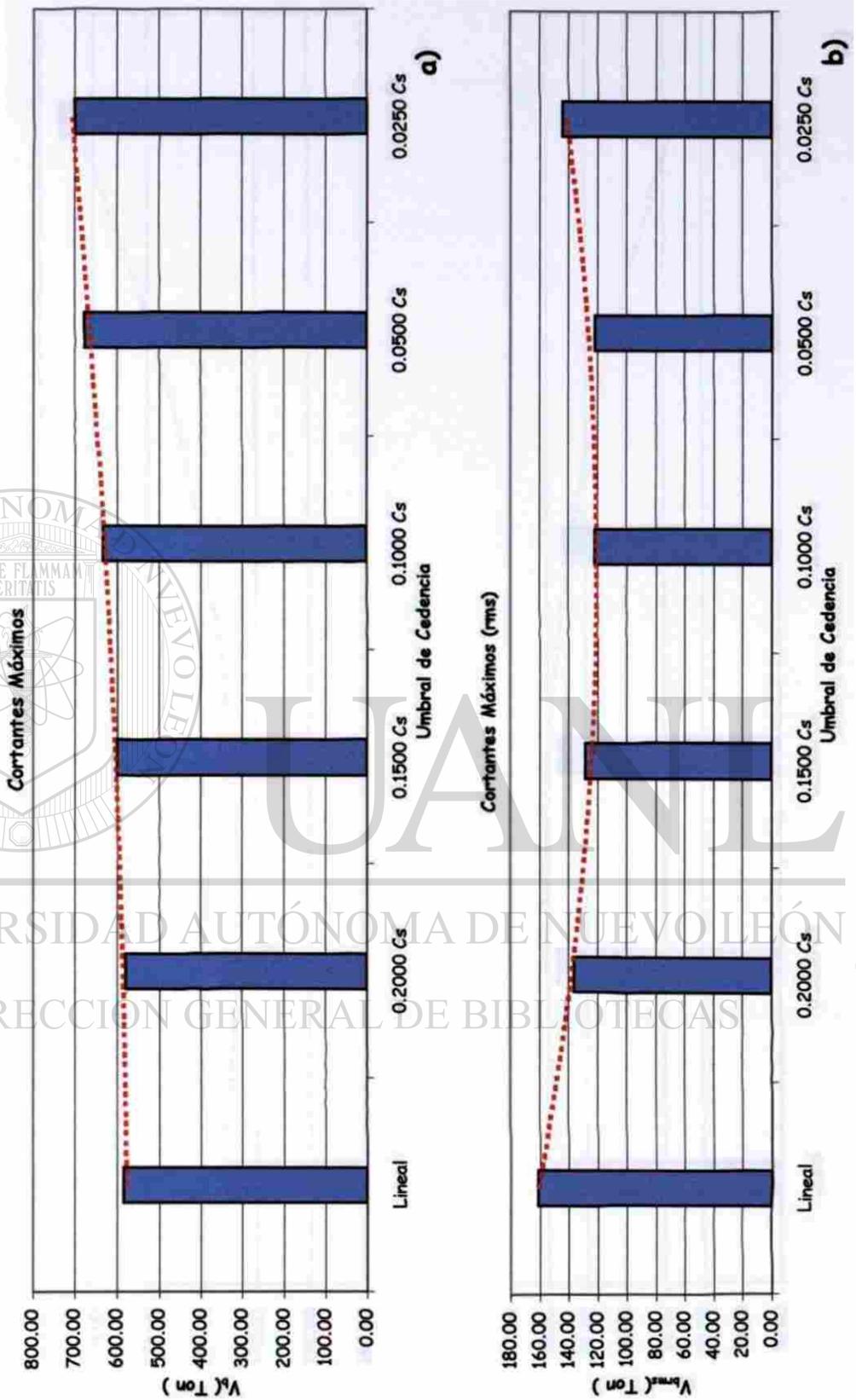


Fig. 6.19 Valores máximos de cortantes (El Centro);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Cortantes en la Base ( CU `85 E-W )

Edificio de Cuatro Niveles

Cortantes Máximos ( pico a pico )

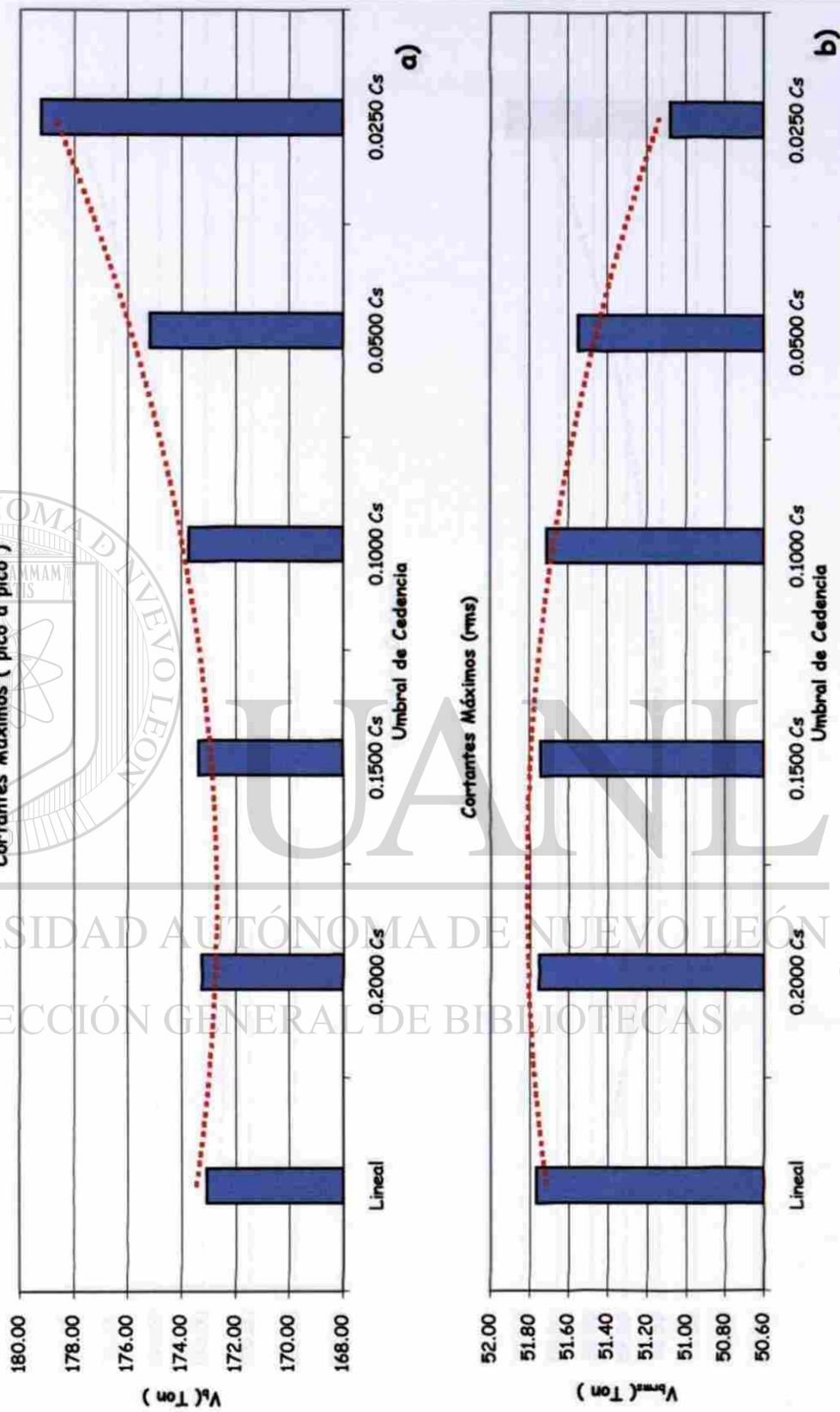


Fig. 6.20 Valores máximos de cortantes (CU `85);  $K_{ADAS} = 25 \%$ .

Comparación de Cortantes en la Base (CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

Cortantes Máximos ( pico a pico )

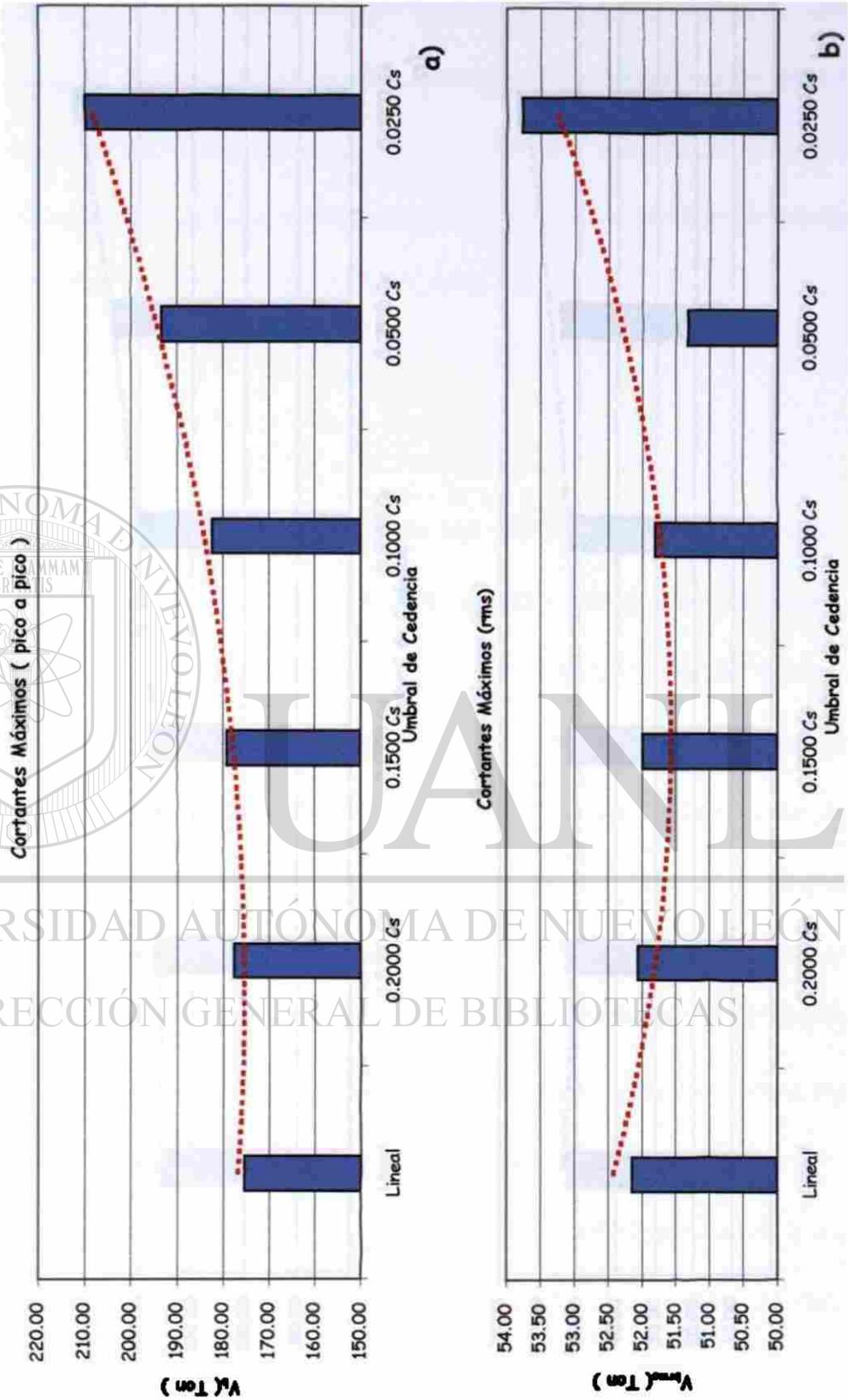


Fig. 6.21 Valores máximos de cortantes (CU `85);  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

Comparación de Cortantes en la Base ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

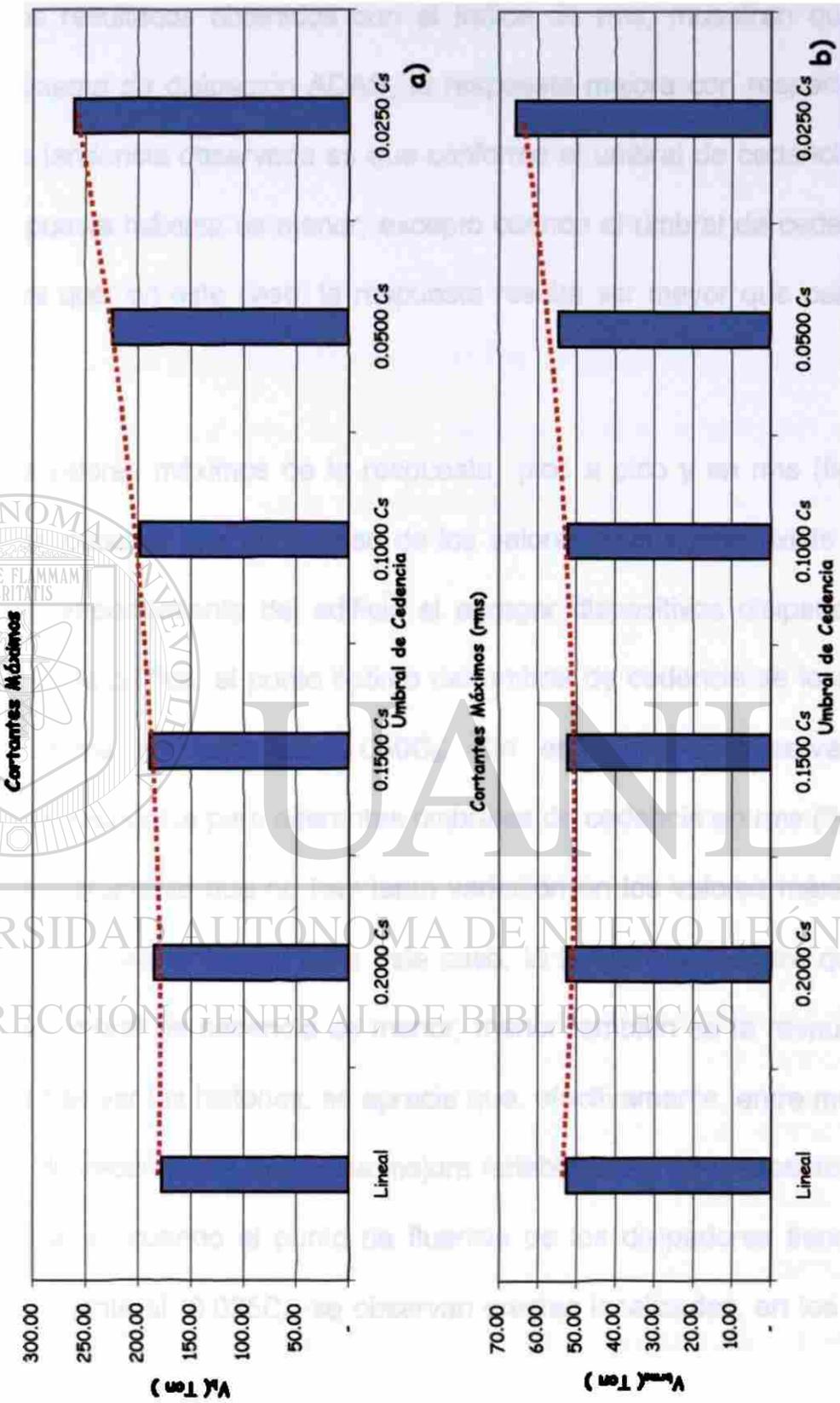


Fig. 6.22 Valores máximos de cortantes (CU '85);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Para el sismo de El Centro, cuando es tomado por el marco el mayor porcentaje de rigidez, los resultados obtenidos con el índice de rms, muestran que al agregar un sistema de disipación ADAS, la respuesta mejora con respecto al caso lineal, la tendencia observada es que conforme el umbral de cedencia es menor, la respuesta máxima es menor, excepto cuando el umbral de cedencia es  $0.025C_u$ , ya que, en este caso, la respuesta resulta ser mayor que para el caso lineal.

Al graficar los valores máximos de la respuesta pico a pico y en rms (figura 6.17 a y b), se observa que en el caso de los valores pico a pico existe una mejora en el comportamiento del edificio al agregar dispositivos disipadores; más aún, según la gráfica, el punto óptimo del umbral de cedencia se localiza cuando éste toma un valor de  $0.050C_u$ . Sin embargo, al observar la comparación de respuesta para diferentes umbrales de cedencia en rms (figura 6.17 b), se ve claramente que no hay tanta variación en los valores máximos reportados en rms; sin embargo, para este caso, la tendencia muestra que a medida que el umbral de cedencia es menor, menor también es la respuesta obtenida. Al observar las historias, se aprecia que, efectivamente, entre menor sea el umbral de cedencia, la respuesta mejora notablemente con respecto a la lineal; sin embargo, cuando el punto de fluencia de los disipadores tiene un valor correspondiente al  $0.025C_u$ , se observan crestas localizadas, en los que la respuesta obtenida para el caso plástico es mayor que la obtenida para el caso lineal.

En el mismo sismo de El Centro, sólo que cuando las rigideces laterales se comparten por mitades, si se observa la comparación de respuesta máximas en la figura 6.18 a y b, se aprecia que para los valores máximos pico a pico, el punto óptimo del umbral se obtiene cuando éste tiene un valor de  $0.100C_s$ ; sin embargo, al comparar la respuesta en rms, es notorio que la tendencia es que a medida que el valor del punto de fluencia es menor, menor será también la respuesta. Al observar la historia completa de los cortantes en la base (figura 6.12), se ve claramente que esto es cierto, salvo en puntos localizados en la fase intensa del sismo, en los que la respuesta del caso inelástico es mayor que la respuesta del caso lineal.

Ahora, en el caso en el que los ADAS toman mayor porcentaje de rigidez lateral que los marcos, para el sismo de El Centro, las comparaciones de valores máximos presentadas en las figuras 6.19a y b muestran que el punto óptimo de los disipadores ADAS, en rms, se localiza entre  $0.100C_s$  y  $0.050C_s$ , ya que son justamente estos dos valores los que presentan la menor respuesta.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Ya se había visto en las historias de cortantes (figura 6.13) que, efectivamente, la respuesta mejora al agregar los dispositivos disipadores con respecto al caso lineal, pero que aparecen puntos, en la fase intensa, en los que los valores para el caso inelástico resultan ser mayores que para el caso lineal; sin embargo, una vez que ha pasado la primera mitad del evento, después de los veinte segundos, se nota que al comparar la historia lineal contra cualquiera otra respuesta inelástica, siempre se obtienen valores menores para los casos no-lineales.

En general, para este sismo y con las proporciones de rigideces estudiadas, es posible afirmar que, de acuerdo con los resultados obtenidos en cuestión de cortantes, al adoptar el índice de rms, los valores máximos obtenidos para cualquiera de los casos de umbral de cedencia resultan menores que los que reportan los casos lineales, lo que indica que los disipadores son una buena opción para reducir la respuesta en cortantes.

Para el sismo de CU, al comparar las respuestas máximas obtenidas para los distintos puntos de fluencia de los disipadores, en el caso en que los marcos toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, según se observó en la figura 6.20a y b. En valores pico a pico, la tendencia muestra que a medida que menor es el umbral de cedencia mayor resulta ser la respuesta que se obtiene, y los casos inelásticos, siempre presentan respuestas mayores que el caso lineal. Sin embargo, se comparan los valores máximos en rms, se observa que la tendencia cambia radicalmente, ya que con este índice la tendencia es que a medida que el umbral de cedencia es menor, menor es también la respuesta, en particular resalta que para cuando el umbral de cedencia es  $0.025C_s$ , la respuesta es mucho menor que para cualquiera de los otros caso, inclusive el caso lineal.

En el mismo sismo de CU, pero cuando la rigidez que toman los ADAS es la mitad de la rigidez lateral la tendencia que se obtiene al graficar las respuestas máximas para los distintos umbrales de cedencia, figura 6.21 a y b, se aprecia que para valores pico a pico, la respuesta tiende a ser mayor, a medida que el umbral de cedencia es menor, y en todos los casos no lineales, la respuesta

máxima obtenida resulta mayor que para los casos lineales; no obstante, la respuesta en rms muestra que para todos los casos no lineales, excepto para cuando el punto de fluencia es en  $0.025C_s$ , el comportamiento mejora; es decir, que la respuesta es menor; más aún, es notorio que en  $0.050C_s$  es cuando mejor se comporta la estructura, si se utiliza el índice de rms. Lo anterior se puede constatar si se observa la historia completa de cortantes para este punto de fluencia (figura 6.15). Es notorio que la respuesta para el caso inelástico es mejor, con respecto al caso lineal, en especial en la fase intensa del sismo, entre los 40 y 65 seg; sin embargo, es cierto que existen algunos puntos en donde la respuesta del caso inelástico resulta mayor que la que se obtiene para el caso lineal.

En el caso en que los ADAS toman el 75 por ciento de la rigidez lateral, según lo visto en las figuras 6.22 a y b, es posible afirmar que en valores pico a pico la tendencia es que, a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es la respuesta máxima obtenida; no obstante, al observar los resultados obtenidos en rms, éstos muestran que la estructura se comporta prácticamente sin mejora alguna.

En el análisis hecho a este edificio con el sismo de CU '85, se pudo observar que al implementar disipadores de energía en la estructura no se encontraron mejorías dignas de consideración en la respuesta en cortantes. En valores pico a pico se vio que los cortantes para los casos con ADAS, comparados con las respuestas lineales resultaron siempre mayores. Se aplicó el índice rms para eliminar las crestas no representativas y se encontró que en los tres casos de

porcentajes de rigidez estudiados, las disminuciones obtenidas en cortantes no fueron mayores que el 1.6% ( $K_{ADAS} = 50\%$ ). Debido a ello, es posible afirmar que en este caso no se obtienen grandes beneficios en cortantes, al usar los dispositivos ADAS.

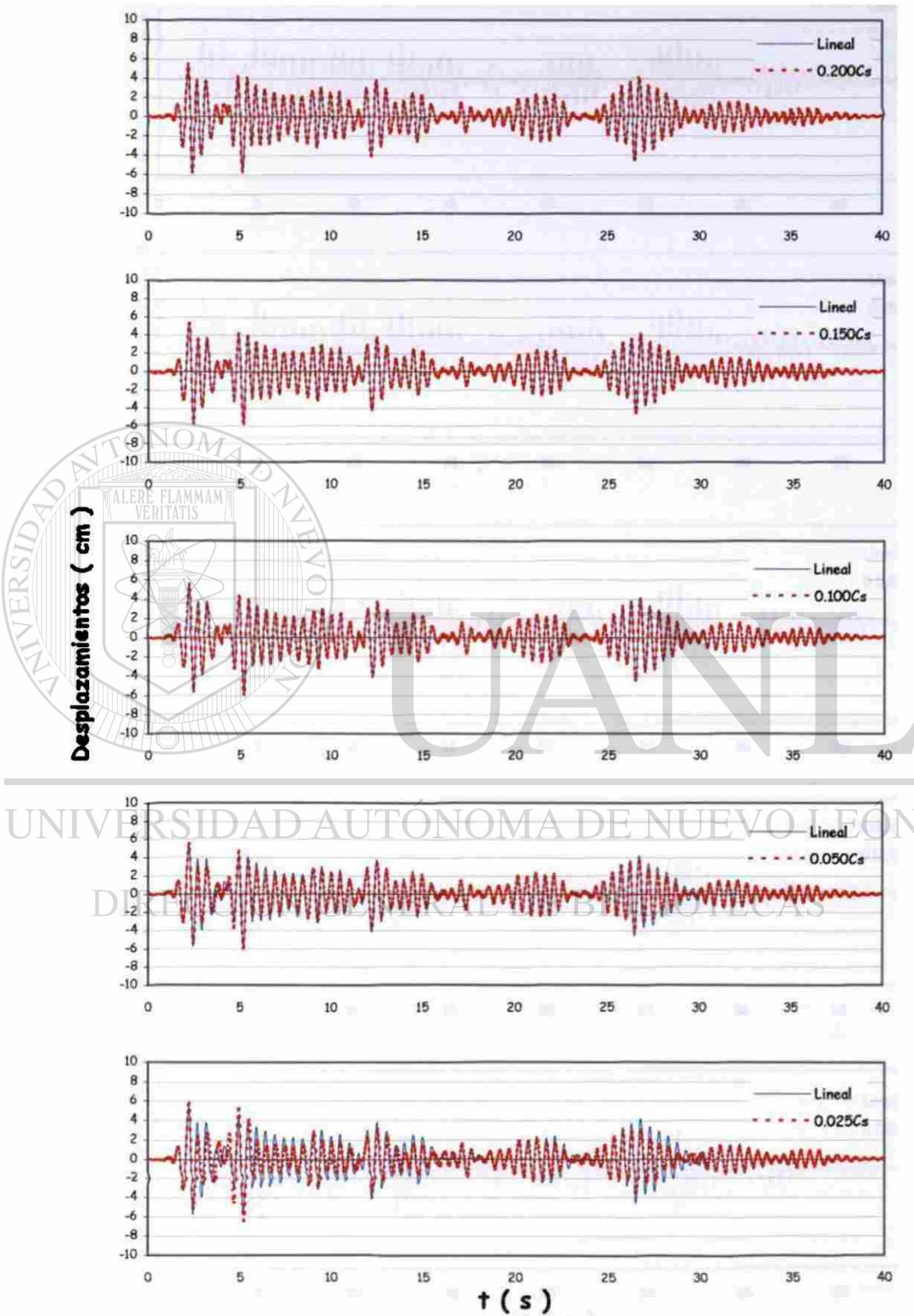
## 6.5 Desplazamientos

### 6.5.1 Valores máximos pico a pico

Al igual que en el caso de los cortantes, se grafican únicamente las historias de desplazamientos obtenidas en la azotea, para cada una de las distribuciones de rigidez estudiadas. Se comparan las respuestas obtenidas en cada caso de límites de fluencia analizado, con su correspondiente caso lineal, esto con afán de poder observar las diferencias en comportamientos obtenidas para cada uno de los umbrales estudiados.

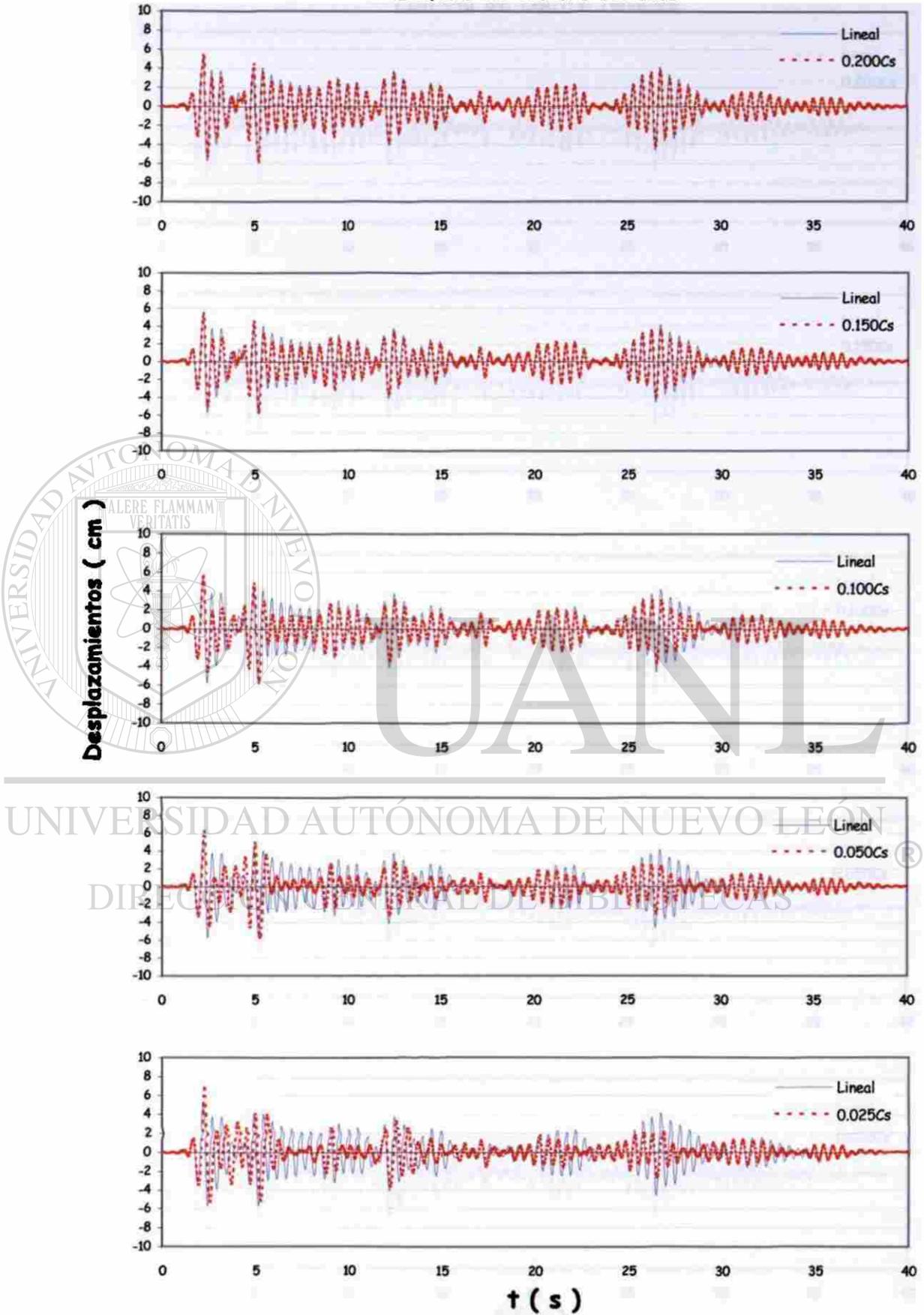
Para complementar el análisis de la respuesta en desplazamientos se presenta un resumen, a manera de gráfica, de los desplazamientos máximos absolutos y relativos; pero únicamente en rms, ya que los valores pico a pico no se consideran un buen índice para evaluar la respuesta del edificio. Los resultados obtenidos en cada piso se agrupan de acuerdo con el umbral de cedencia, para poderlos comparar con el correspondiente caso lineal. Las historias de desplazamientos para los dos sismos analizados y los diferentes porcentajes de rigidez considerados en cada sismo se presentan de la figura 6.23 a la 6.28.

**Historia de Desplazamientos en Azotea ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles**



**Fig. 6.23** Historia de desplazamientos en azotea (El Centro);  $K_{ADAS} = 25\%$ .

**Historia de Desplazamientos en Azotea ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles**



**Fig. 6.24** Historia de desplazamientos en azotea (El Centro);  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

### Historia de Desplazamientos en Azotea ( El Centro ) Edificio de Cuatro Niveles

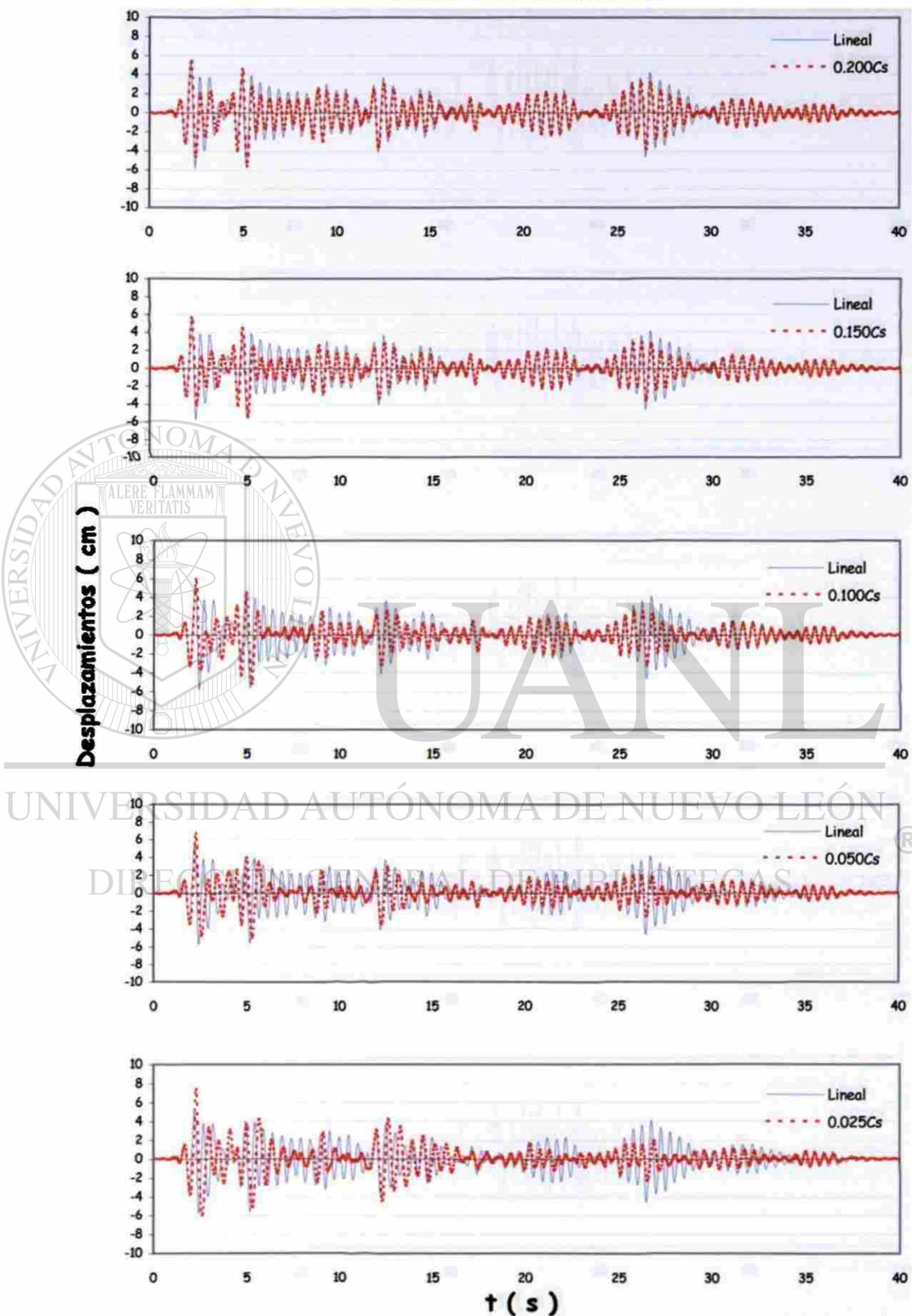
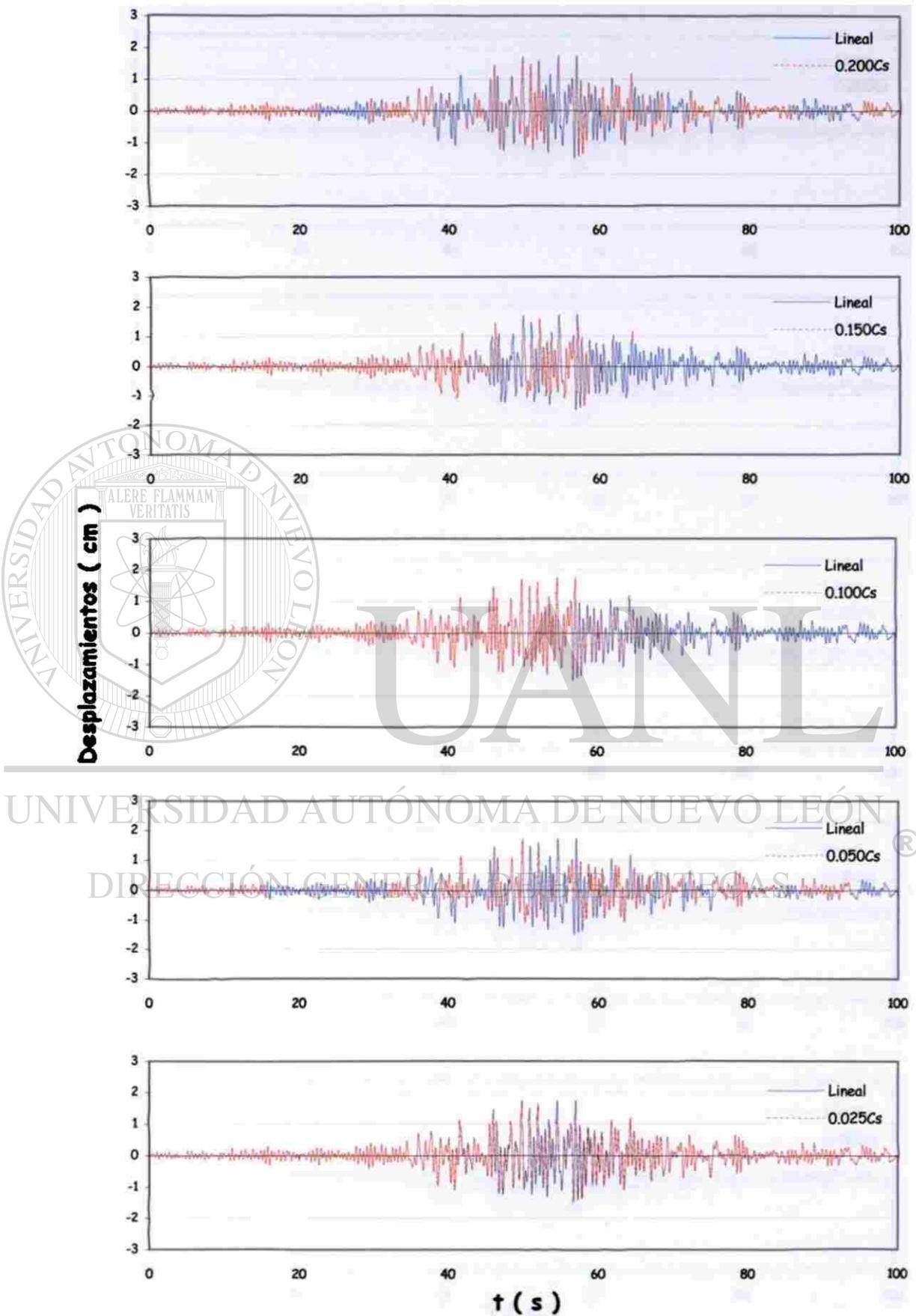


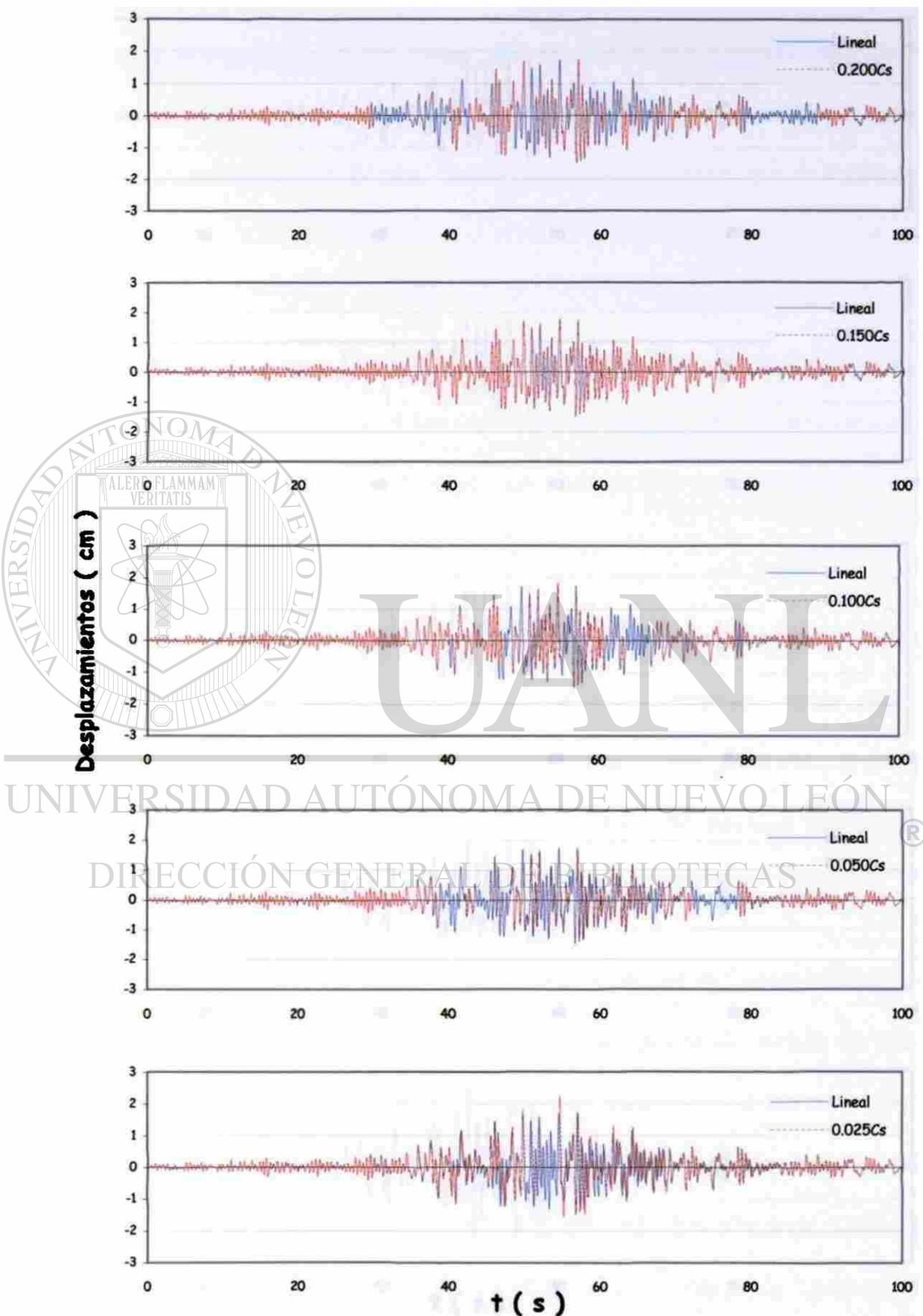
Fig. 6.25 Historia de desplazamientos en azotea (El Centro);  $K_{ADAS} = 75 \%$ .

**Historia de Desplazamientos en Azotea ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles**



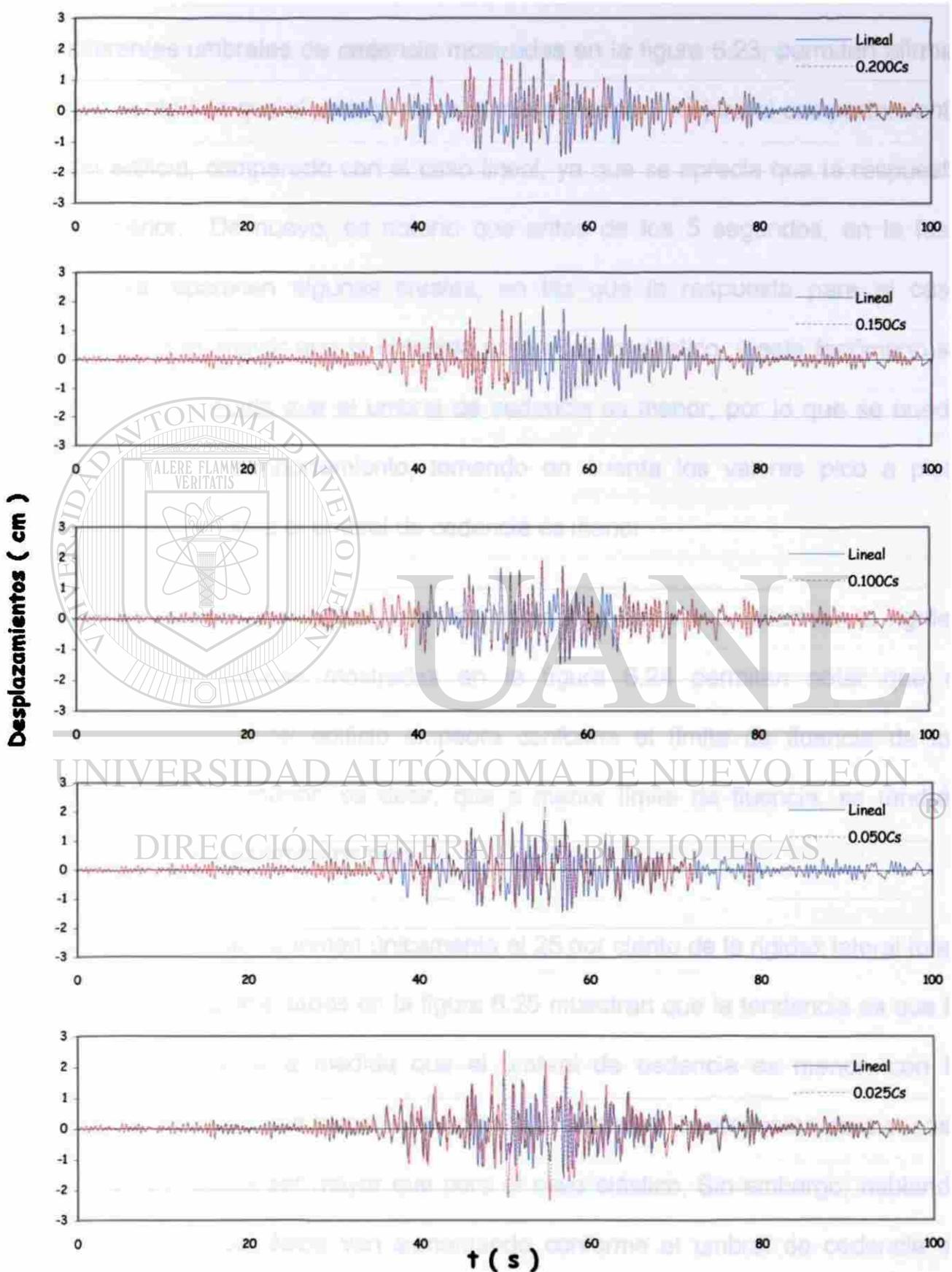
**Fig. 6.26** Historia de desplazamientos en azotea (CU '85);  $K_{ADAS} = 25\%$ .

**Historia de Desplazamientos en Azotea ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles**



**Fig. 6.27** Historia de desplazamientos en azotea (CU '85);  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

**Historia de Desplazamientos en Azotea ( CU '85 E-W )**  
**Edificio de Cuatro Niveles**



**Fig. 6.28** Historia de desplazamientos en azotea (CU '85);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Para el sismo de El Centro, cuando la rigidez lateral mayor es la de los marcos, la comparación de las historias de desplazamientos en azotea para los diferentes umbrales de cedencia mostradas en la figura 6.23, permiten afirmar que, a medida que el umbral de cedencia es menor, mejora el comportamiento del edificio, comparado con el caso lineal, ya que se aprecia que la respuesta es menor. De nuevo, es notorio que antes de los 5 segundos, en la fase intensa, aparecen algunas crestas, en las que la respuesta para el caso inelástico es mayor que la obtenida para el caso elástico, y este fenómeno se acentúa a medida que el umbral de cedencia es menor, por lo que se puede decir que el comportamiento, tomando en cuenta los valores pico a pico, empeora conforme el umbral de cedencia es menor.

En el caso en que los dispositivos disipadores toman la mitad de la rigidez lateral, las historias mostradas en la figura 6.24 permiten notar que el comportamiento del edificio empeora conforme el límite de fluencia de los disipadores es menor; es decir, que a menor límite de fluencia, se tendrán mayores desplazamientos pico.

Cuando los marcos toman únicamente el 25 por ciento de la rigidez lateral total, las historias presentadas en la figura 6.25 muestran que la tendencia es que la respuesta mejora a medida que el umbral de cedencia es menor, con la salvedad de que una vez más, en puntos localizados, la respuesta para el caso inelástico resulta ser mayor que para el caso elástico. Sin embargo, hablando de valores pico, éstos van aumentando conforme el umbral de cedencia es menor, de manera que en valores pico no se aprecia mejoría en la respuesta.

En el sismo de CU, si los marcos son los que toman la mayoría de la rigidez lateral, según las historias de desplazamientos en la azotea de la figura 6.26, es posible afirmar que al incorporar los dispositivos, disipadores de energía, se mejora el comportamiento del edificio, ya que se obtienen valores máximos menores cuando se utilizan estos dispositivos que cuando la estructura trabaja linealmente. No obstante, en valores máximos, pico a pico, la tendencia muestra que éstos son mayores a medida que el umbral de cedencia es menor, aunque, en este caso, la diferencia entre el caso lineal y el límite de fluencia menor ( $0.025C_s$ ) no es mayor que el 7 por ciento.

Quando la rigidez de los marcos y los dispositivos disipadores se comparte en partes iguales, las historias de la figura 6.27, muestran que a medida que el umbral de cedencia es menor, el comportamiento general de la estructura mejora; sin embargo, se presenta el fenómeno de que en la fase intensa del sismo, los desplazamientos observados para los casos inelásticos son mayores que los del caso lineal. En este caso, se repite la tendencia de que a menor límite de fluencia, mayores son los desplazamientos máximos registrados; con un aumento máximo del 22 %, comparada la respuesta contra el caso lineal, el cual se presenta cuando el umbral de cedencia es menor.

En el caso en que los dispositivos disipadores toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, debido a que este sismo presenta la fase intensa entre los 40 y 60 seg. Es precisamente en ese intervalo en el que se aprecia que la respuesta para los casos inelásticos supera a la respuesta obtenida para el caso lineal, según se observa en la figura 6.28. Fuera de ese intervalo, para cualquier

límite de fluencia de los disipadores se presenta un menor desplazamiento que para el caso lineal. Sin embargo, en valores pico se ve que éstos son mayores, a medida que el límite de fluencia es menor, incrementándose el desplazamiento lineal hasta en un 32 por ciento, cuando la fluencia en los disipadores se alcanza con un valor de  $0.025C_s$ .

### 6.5.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia

Al igual que en el caso de los cortantes, se utiliza el índice de rms para encontrar el punto óptimo del umbral de cedencia de los disipadores de energía.

Para los dos sismos utilizados en el análisis de este edificio y para cada caso de rigidez lateral estudiado se presentan las gráficas en las que se comparan los desplazamientos absolutos y relativos máximos en rms y se incluye en cada una de las gráficas comparativas una línea que muestra la tendencia del comportamiento. Con esa línea se aprecia, de manera relativamente fácil, entre qué umbrales de cedencia se localiza el punto óptimo del límite de fluencia de los dispositivos histeréticos. Algo importante que hay que tener presente en lo que respecta a los desplazamientos, es que, según las recomendaciones de los códigos estos deben limitarse a valores permisibles, aunque al limitar los desplazamientos a los recomendados en los códigos es posible que los disipadores no desarrollen toda la ductilidad que les es posible alcanzar y, por lo mismo la energía disipada por histéresis estará limitada. Estas gráficas se muestran en las figuras 6.29 a 6.34.

Comparación de Desplazamientos ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles

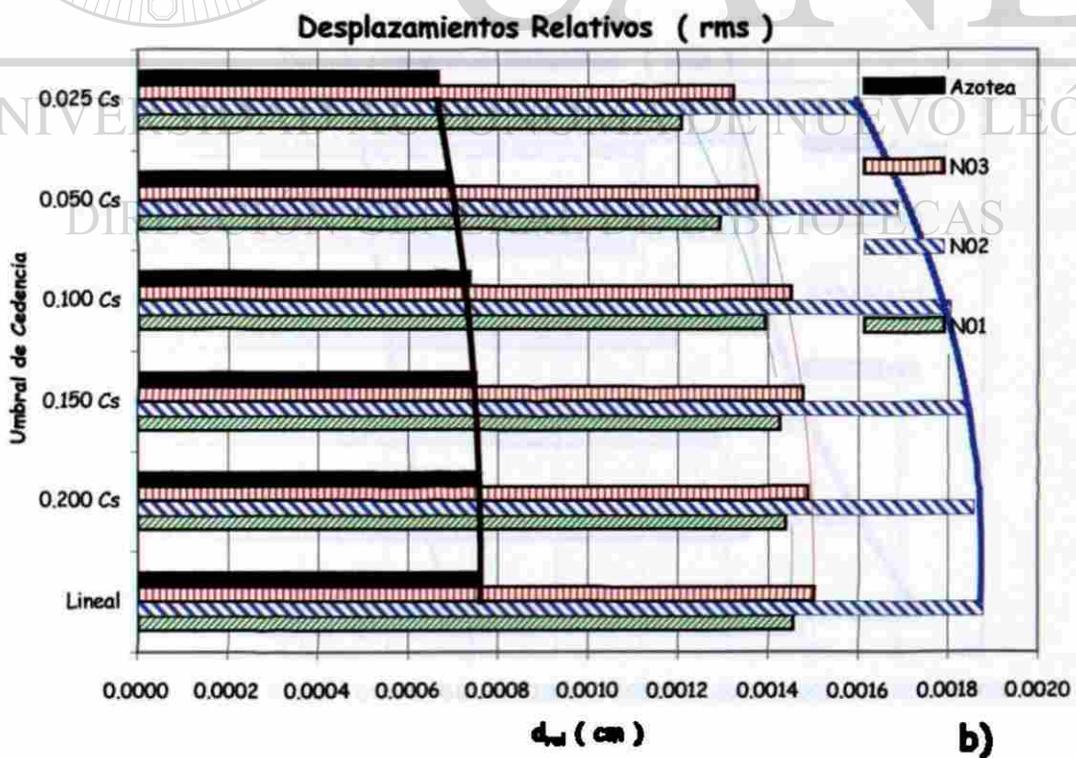
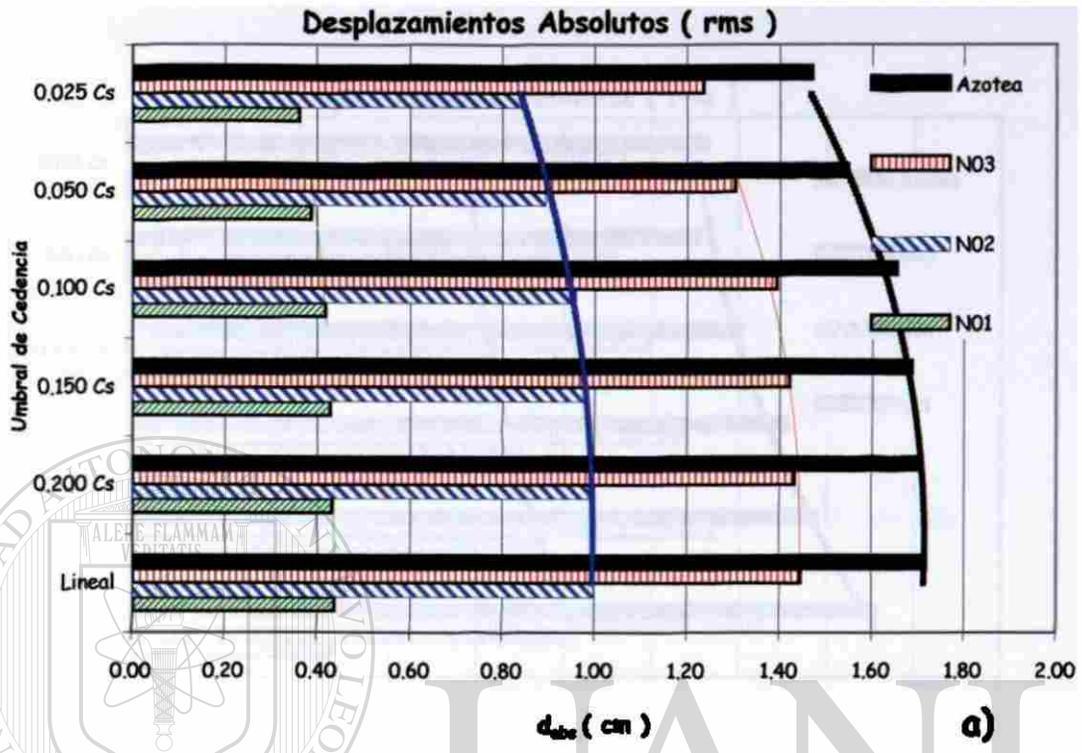


Fig. 6.29 Valores máximos de desplazamientos (El Centro);  $K_{ADAS} = 25 \%$ .

Comparación de Desplazamientos ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles

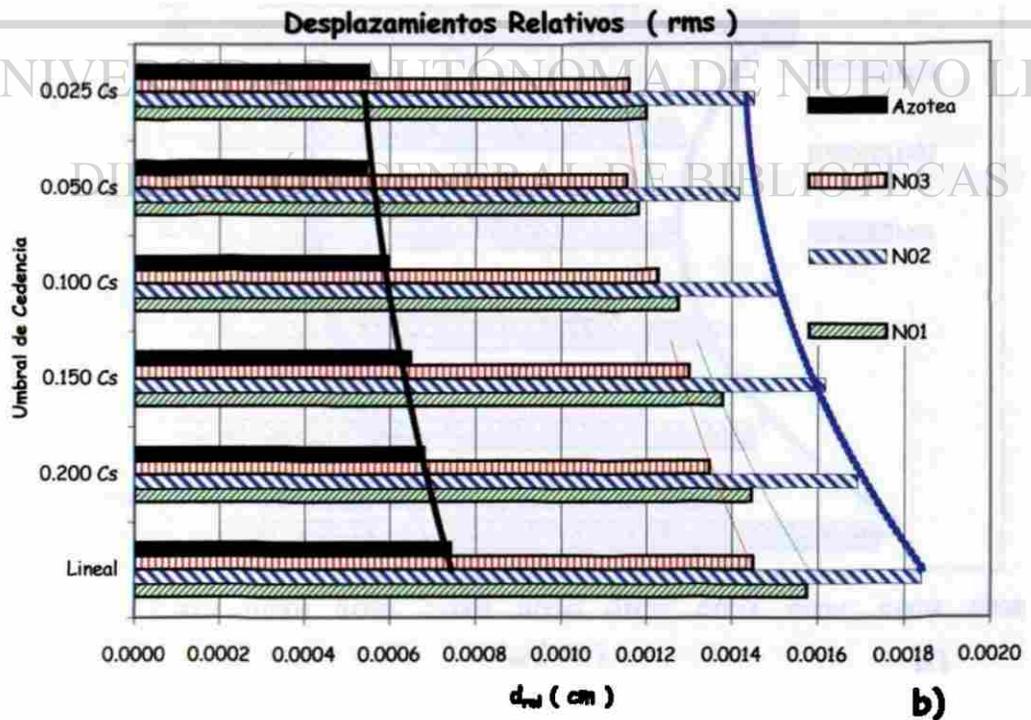
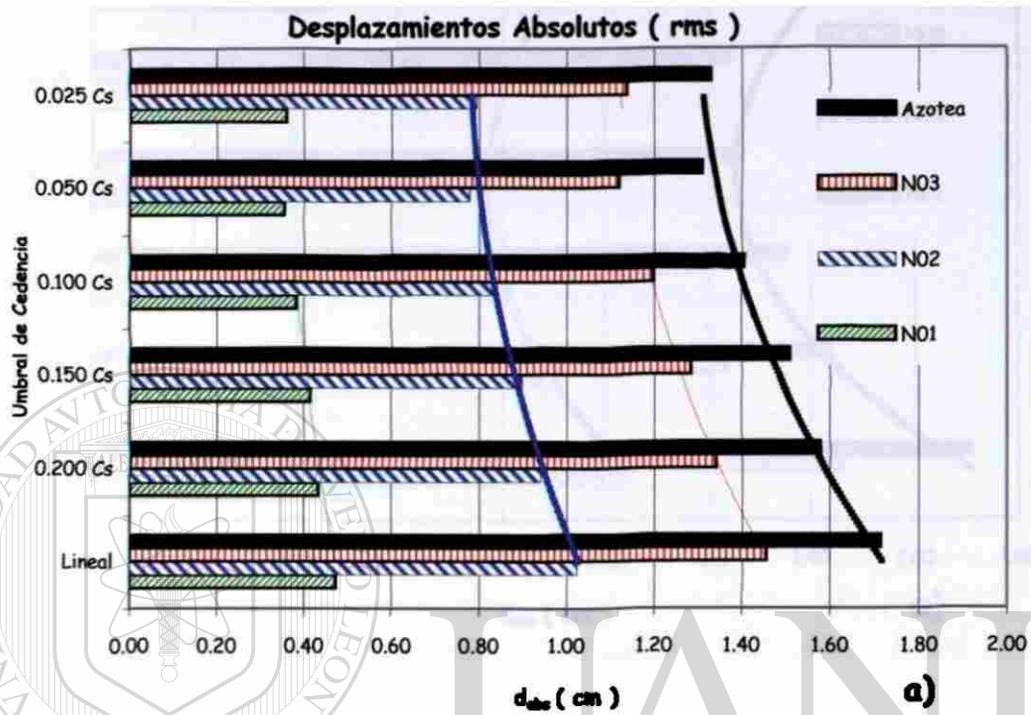


Fig. 6.30 Valores máximos de desplazamientos (El Centro);  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

Comparación de Desplazamientos ( El Centro )  
Edificio de Veinte Niveles

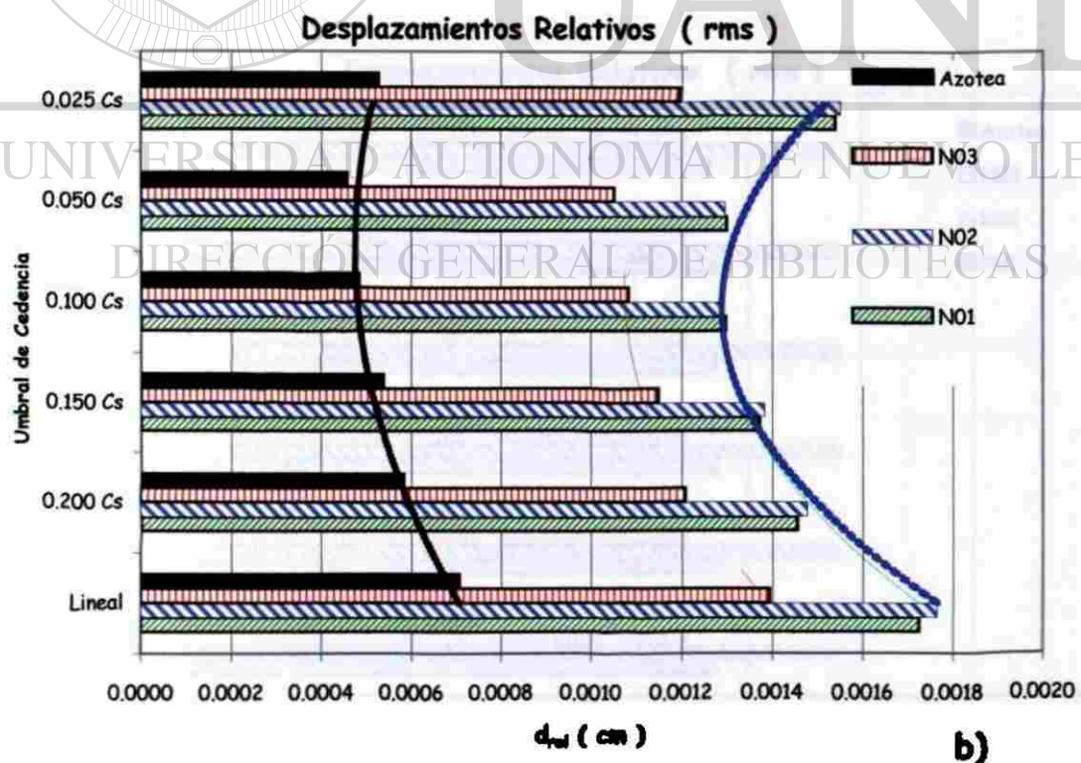
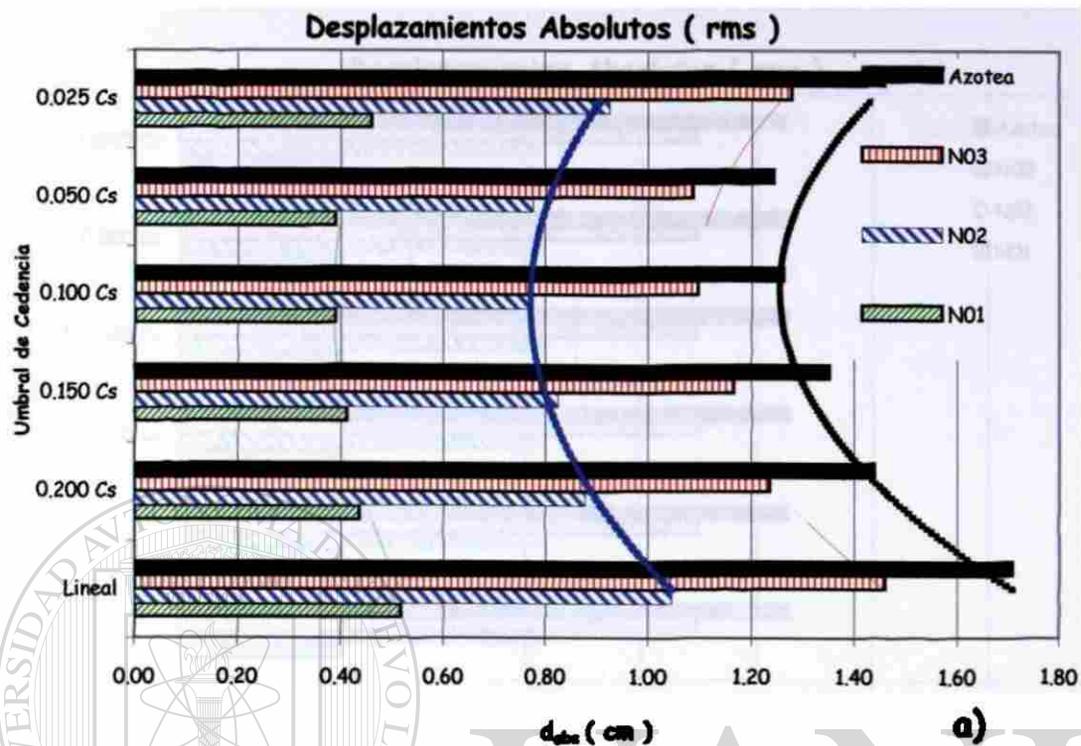
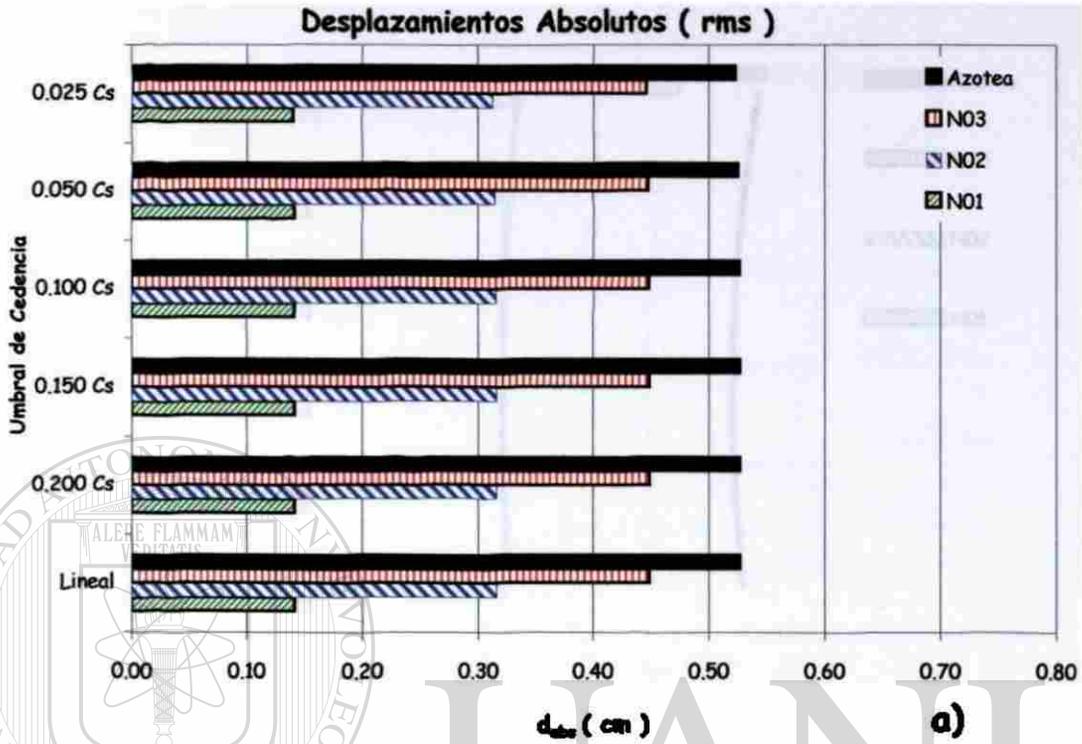


Fig. 6.31 Valores máximos de desplazamientos (El Centro);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

### Historia de Desplazamientos en Azotea ( CU '85 E-W ) Edificio de Cuatro Niveles



**Desplazamientos Relativos ( rms )**

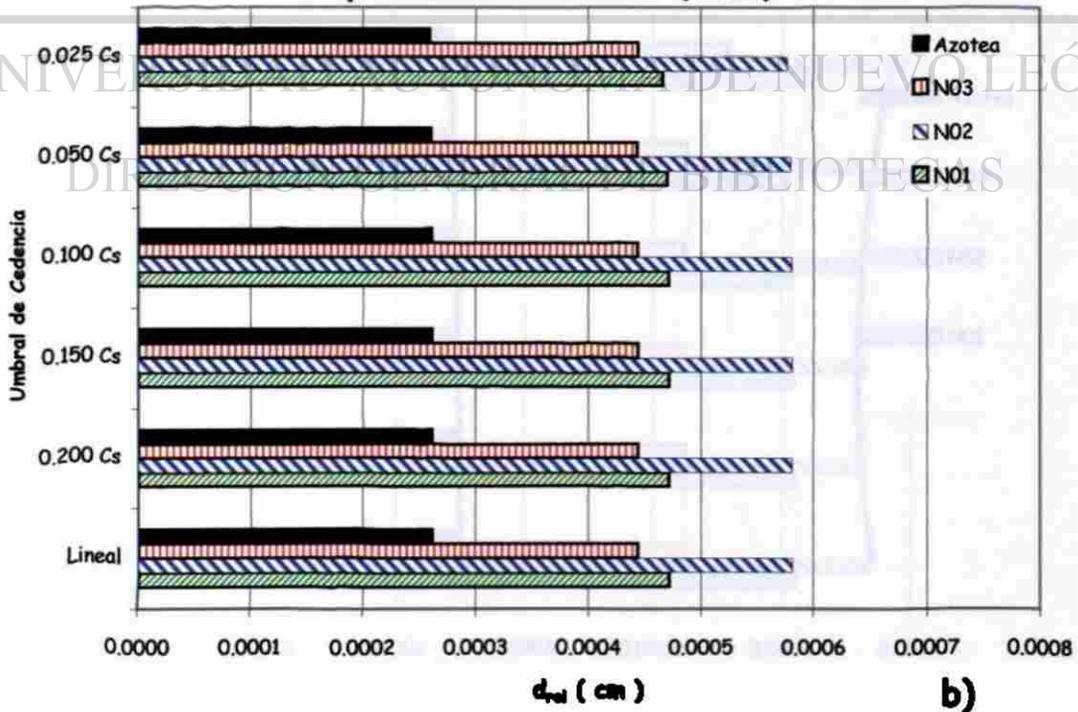


Fig. 6.32 Valores máximos de desplazamientos (CU '85);  $K_{ADAS} = 25\%$ .

### Historia de Desplazamientos en Azotea ( CU '85 E-W ) Edificio de Cuatro Niveles

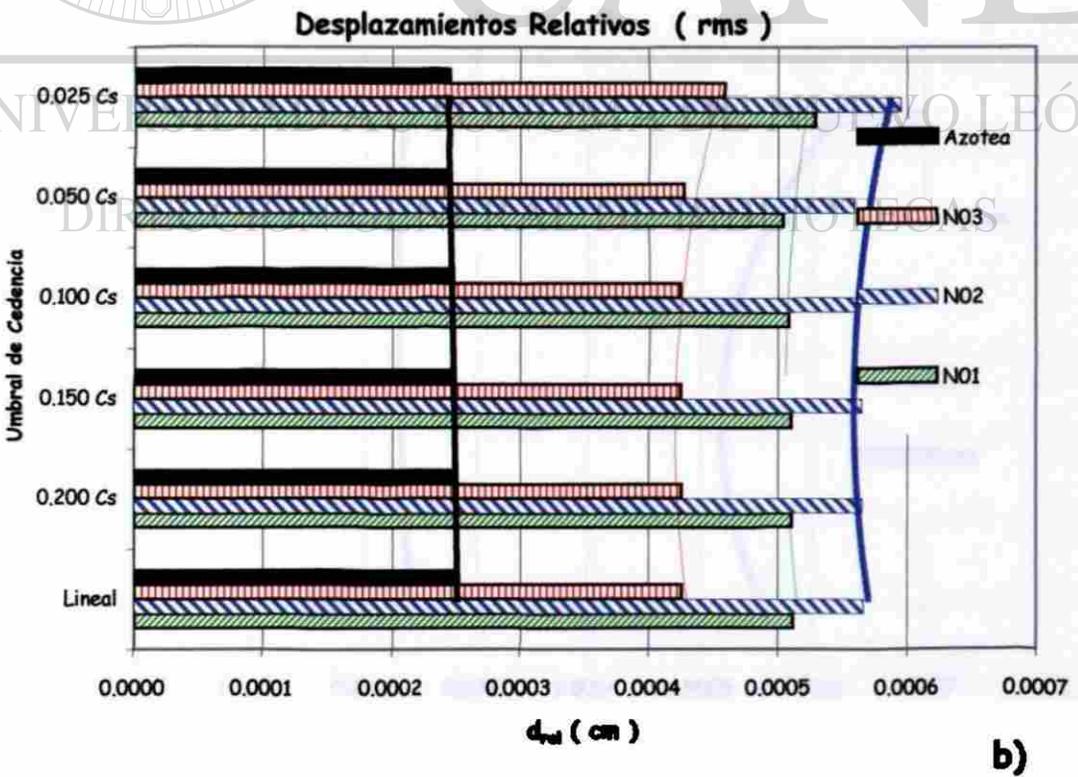
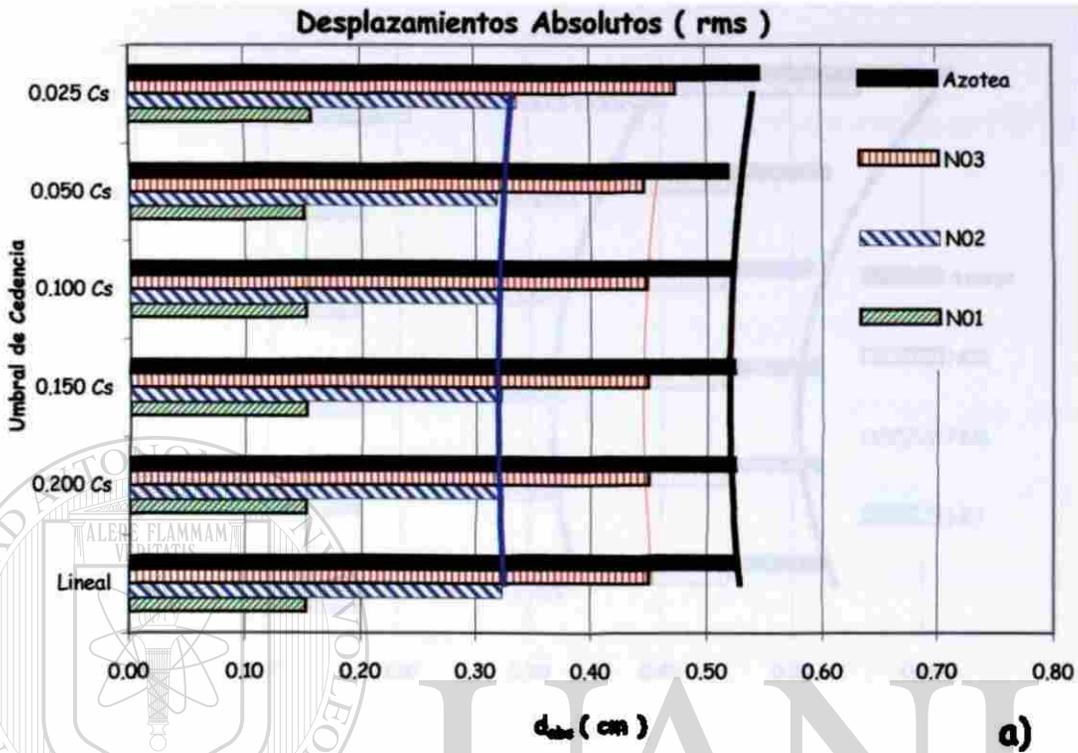
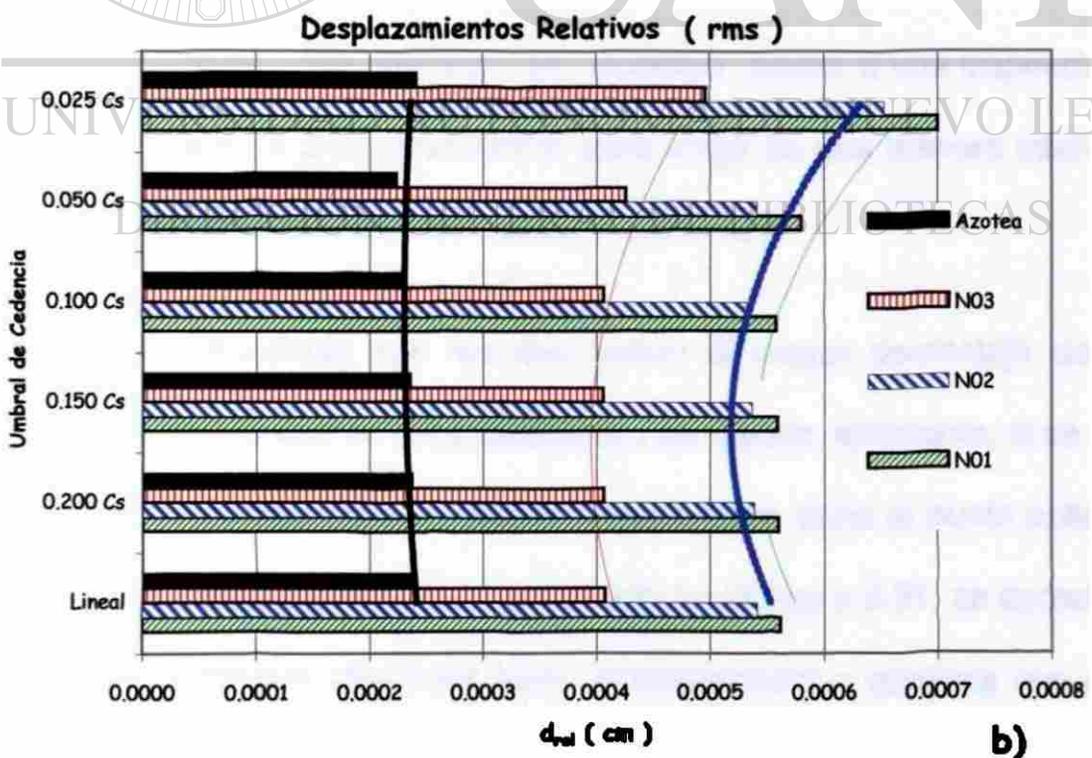
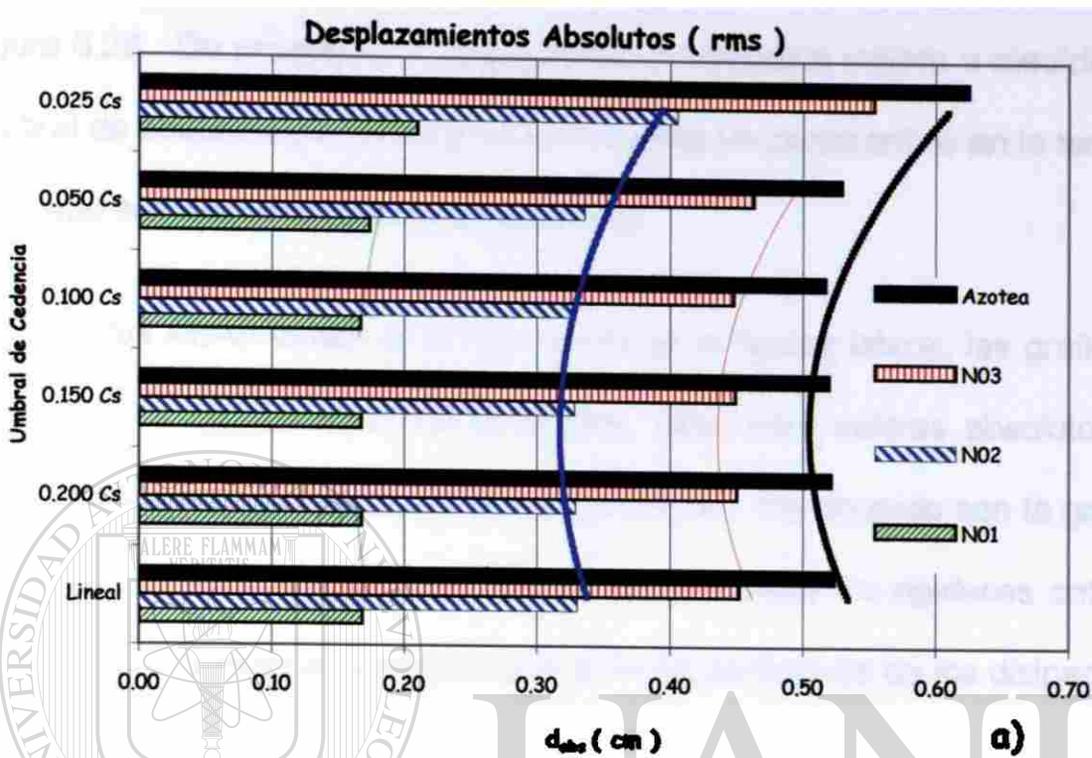


Fig. 6.33 Valores máximos de desplazamientos (CU '85);  $K_{ADAS} = 50\%$ .

**Historia de Desplazamientos en Azotea ( CU '85 E-W ):  $K_{ADAS} = 75\%$   
Edificio de Cuatro Niveles**



**Fig. 6.34** Valores máximos de desplazamientos (CU '85);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Para el sismo de El Centro, en el caso en que los marcos toman el mayor porcentaje de la rigidez lateral, las tendencias que se observan, tanto para desplazamientos absolutos como desplazamiento relativos, se mostraron en la figura 6.29. De acuerdo con esa gráfica, la respuesta mejora a medida que el umbral de cedencia es menor y no se presenta un punto crítico en la tendencia, sino que siempre la tendencia es a mejorar.

Cuando los ADAS toman el 50 por ciento de la rigidez lateral, las gráficas que resumen los valores máximos obtenidos, tanto para valores absolutos como para los relativos se presentan en la figura 6.30. De acuerdo con la gráfica se observa que, de nuevo, al igual que en la distribución de rigideces anterior, la tendencia es a mejorar a medida que el límite de fluencia de los disipadores es menor, no se observa un punto crítico que pudiera considerarse como el punto óptimo sino que el desplazamiento disminuye a medida que el umbral de cedencia es menor. Sin embargo, es necesario recurrir a una inspección de la historia completa de desplazamientos, para elegir de una manera inteligente el umbral de cedencia que más conviene en este caso.

Cuando los disipadores son los que toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, a diferencia que en las proporciones de rigidez anteriores, si se observa que existe un punto crítico que puede considerarse como el punto óptimo para el umbral de cedencia. Según lo observado en la figura 6.31, se aprecia, tanto para desplazamientos absolutos como desplazamientos relativos que el punto óptimo del límite de fluencia de los ADAS se localiza entre  $0.050$  y  $0.025C_s$ . En primera instancia parece que justamente es ahí en donde se encuentra el

umbral de cedencia que mejora el comportamiento del edificio; sin embargo, al igual que en los casos anteriores, es necesario observar detenidamente la historia completa de desplazamientos, que se muestra en la figura 6.25.

El análisis hecho con el sismo de CU muestra que, cuando la rigidez lateral tomada por los marcos es del 75 por ciento, no existe diferencia entre colocar y no colocar disipadores de energía, atendiendo al índice rms. Según se aprecia en la figura 6.32.

En el caso en que los ADAS toman la mitad de la rigidez lateral, al igual que en el caso anterior y según lo observado en la figura 6.33, no es posible localizar un punto óptimo de comportamiento de los disipadores, ya que los valores en rms son prácticamente los mismos para cualquiera de los umbrales de cedencia estudiados, con la salvedad del menor,  $0.025C_s$ , el cual tiene respuestas mayores que los demás.

Si los ADAS toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, es notoria la existencia de un punto óptimo para el nivel de fluencia de los ADAS, esto se ve con claridad en la figura 6.34, en la cual se presenta un resumen de los desplazamientos absolutos y relativos para los diferentes niveles del edificio y los distintos umbrales de cedencia. Según esta gráfica, el punto óptimo se localiza entre  $0.100$  y  $0.050C_s$ , aunque si se comparan estos valores de desplazamiento contra los del caso lineal, no se observa mejoría, es decir, que no disminuyen los desplazamientos.

## 6.6 Energías

Para evaluar la respuesta del edificio, se considera que las energías juegan un papel importante, ya que la energía es la moneda universal de la física; es decir, que resulta un parámetro común de comparación, en cualquier fenómeno físico, en este caso el análisis estructural de un edificio, ante un evento sísmico, también es un fenómeno físico.

Es por ello que en este trabajo se decidió, además del enfoque "clásico", utilizado para evaluar la respuesta de un edificio ante un sismo, que es el de desplazamientos y cortantes, se analiza y compara el enfoque energético, con la premisa de que es precisamente ese parámetro, la energía, el que permite de una manera más clara comprender el comportamiento del edificio.

Gracias a que el programa utilizado en este trabajo para el análisis de los edificios (ETABS) permite calcular de manera directa las energías de entrada, cinética y potencial, así como también la energía disipada, tanto por comportamiento modal como por comportamiento histerético, de acuerdo con la ecuación que de balance energético propuesta por Chia-Ming y Bertero (1988), se aprovecha esta posibilidad y se comparan las diferentes energías para complementar la evaluación de la respuesta de la estructura.

Las figuras 6.35 a 6.46 muestran los resultados obtenidos para el sismo de El Centro. En estas figuras se comparan las diferentes energías, para los umbrales de cedencia estudiados.

Comparación de Energías (El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

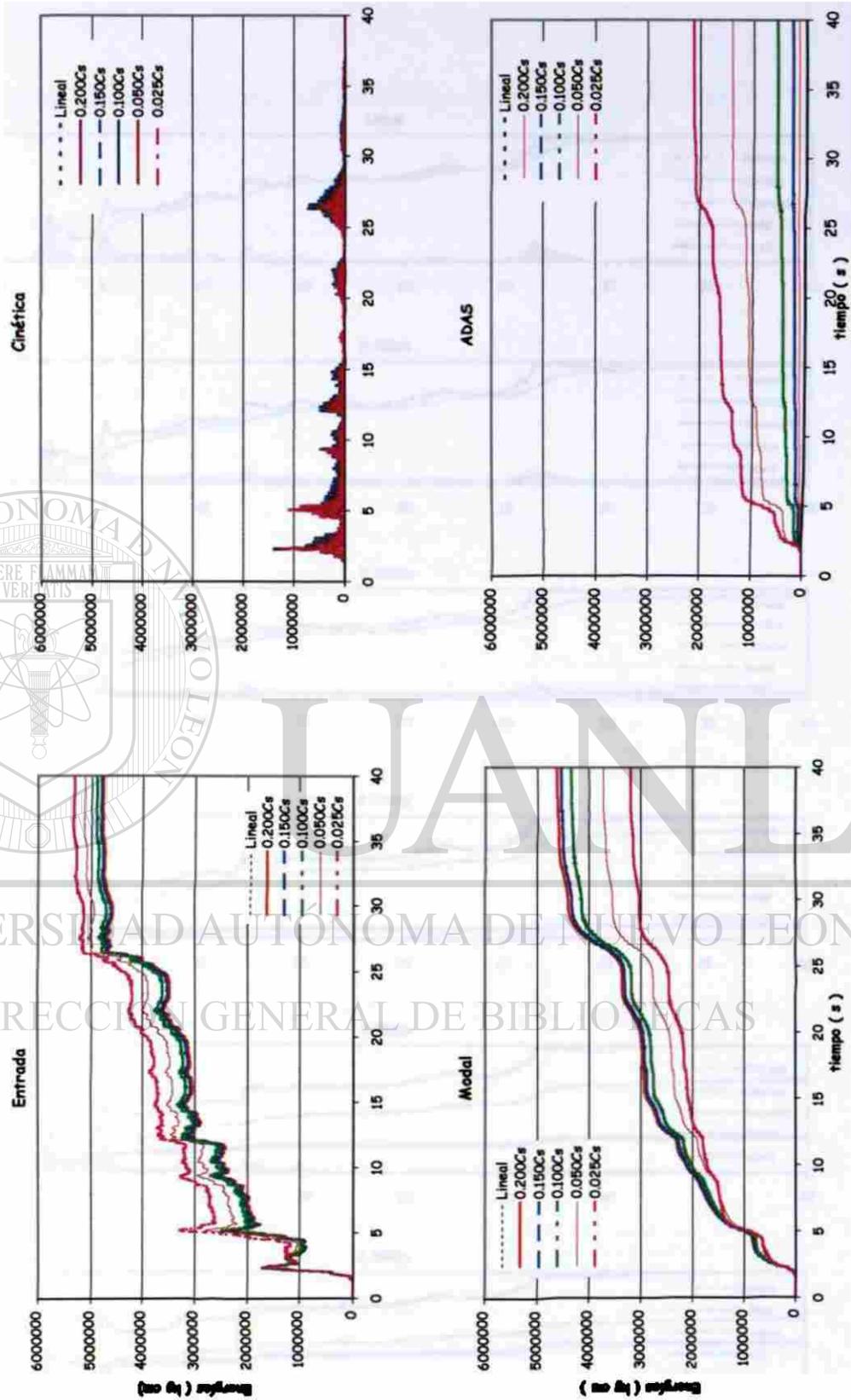
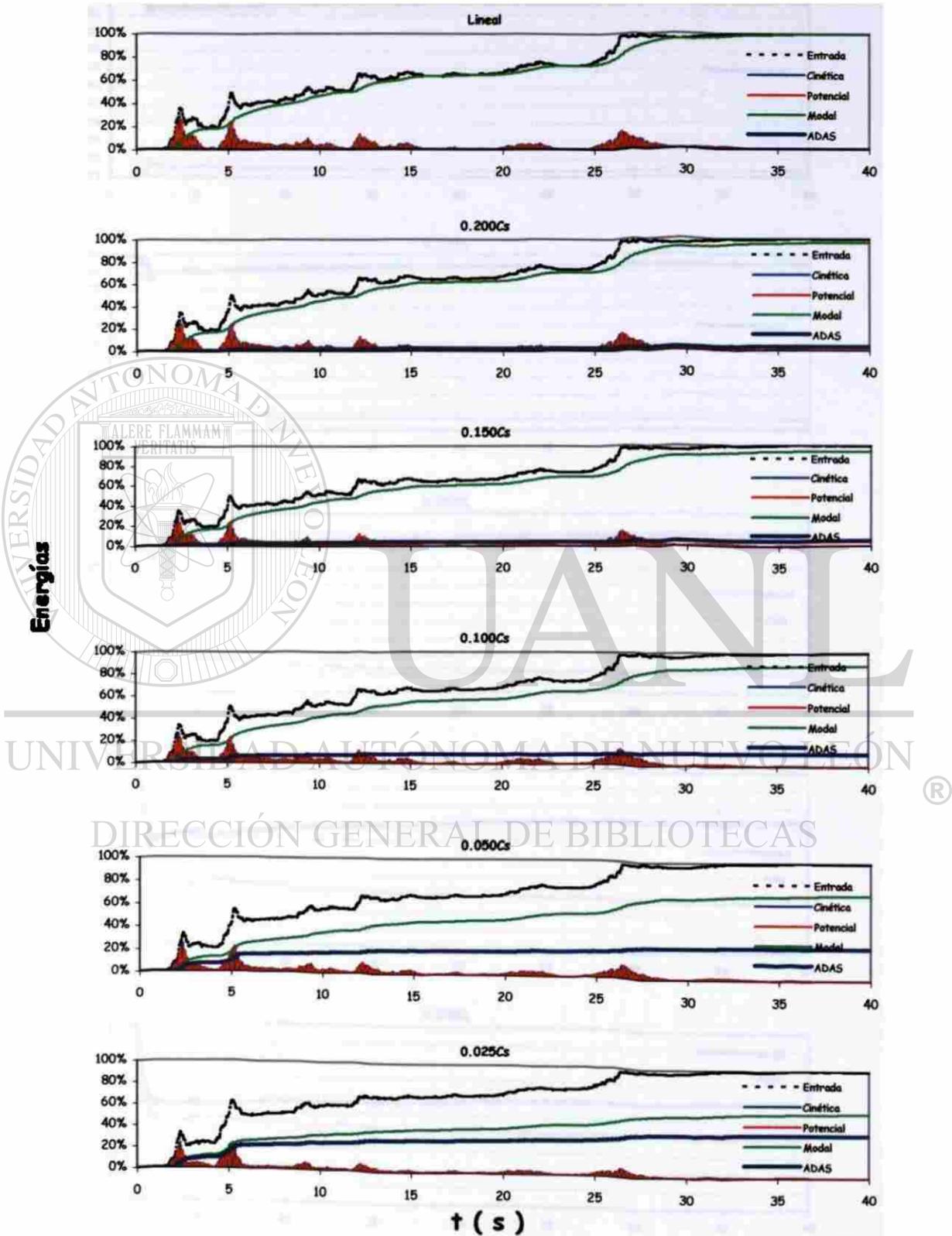


Fig. 6.35 Historias de energías (El Centro);  $K_{ADAS} = 25\%$ .

**Energías ( El Centro )**  
**Edificio de Cuatro Niveles**



**Fig. 6.36** Porcentajes de energías (El Centro);  $K_{ADAS} = 25 \%$ .

Energías Disipadas (El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

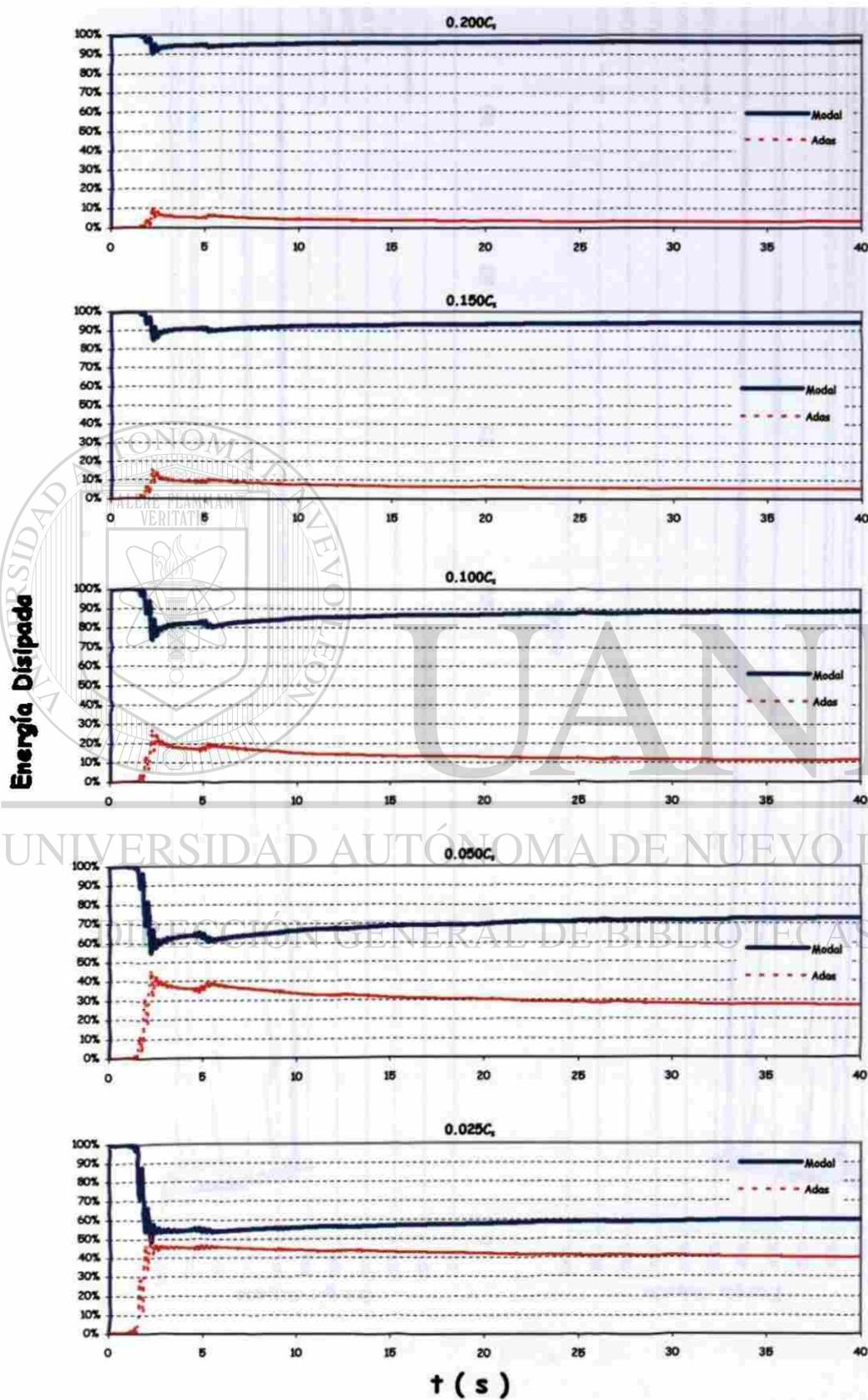


Fig. 6.37 Energías disipadas (El Centro);  $K_{ADAS} = 25\%$ .

Comparación de Energías Disipadas ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles

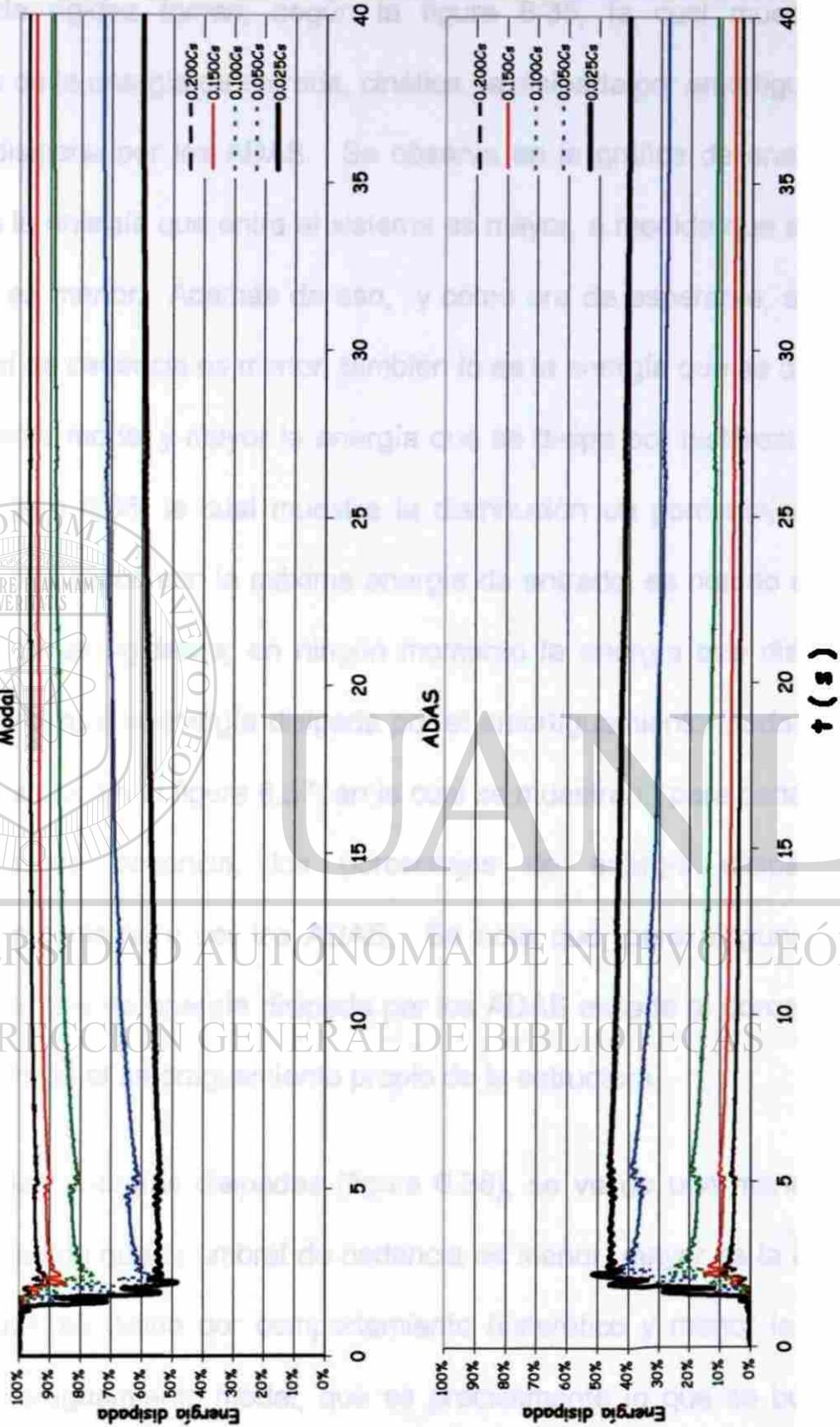


Fig. 6.38 Comparación de energías disipadas (El Centro);  $K_{ADAS} = 25\%$ .

Para el sismo de El Centro y en el caso en que los marcos son los que mayor porcentaje de rigidez toman, según la figura 6.35, la cual muestra una comparación de la energía de entrada, cinética, la disipada por amortiguamiento modal y la disipada por los ADAS. Se observa en la gráfica de energías de entrada, que la energía que entra al sistema es mayor, a medida que el umbral de cedencia es menor. Además de eso, y como era de esperarse, a medida que el umbral de cedencia es menor, también lo es la energía que se disipa por amortiguamiento modal y mayor la energía que se disipa por histéresis. Si se observa la figura 6.36, la cual muestra la distribución en porcentajes de las energías, normalizados con la máxima energía de entrada, es notorio que, con esta proporción de rigideces, en ningún momento la energía que disipan los ADAS es mayor que la energía disipada por el amortiguamiento modal, lo cual se puede constatar en la figura 6.37, en la cual se muestran, para cada uno de los umbrales de cedencia, los porcentajes de energía disipada por amortiguamiento modal y por los ADAS. Se nota que, para ninguno de los casos el porcentaje de energía disipada por los ADAS excede al porcentaje de energía que disipa el amortiguamiento propio de la estructura.

Al comparar las energías disipadas (figura 6.38), se ve de una manera más clara que a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es la cantidad de energía que se disipa por comportamiento histerético y menor la que se disipa por amortiguamiento modal, que es precisamente lo que se busca, ya que conseguir que se disipe menor energía por amortiguamiento modal se traduce en menor daño a la estructura.

Comparación de Energías ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles

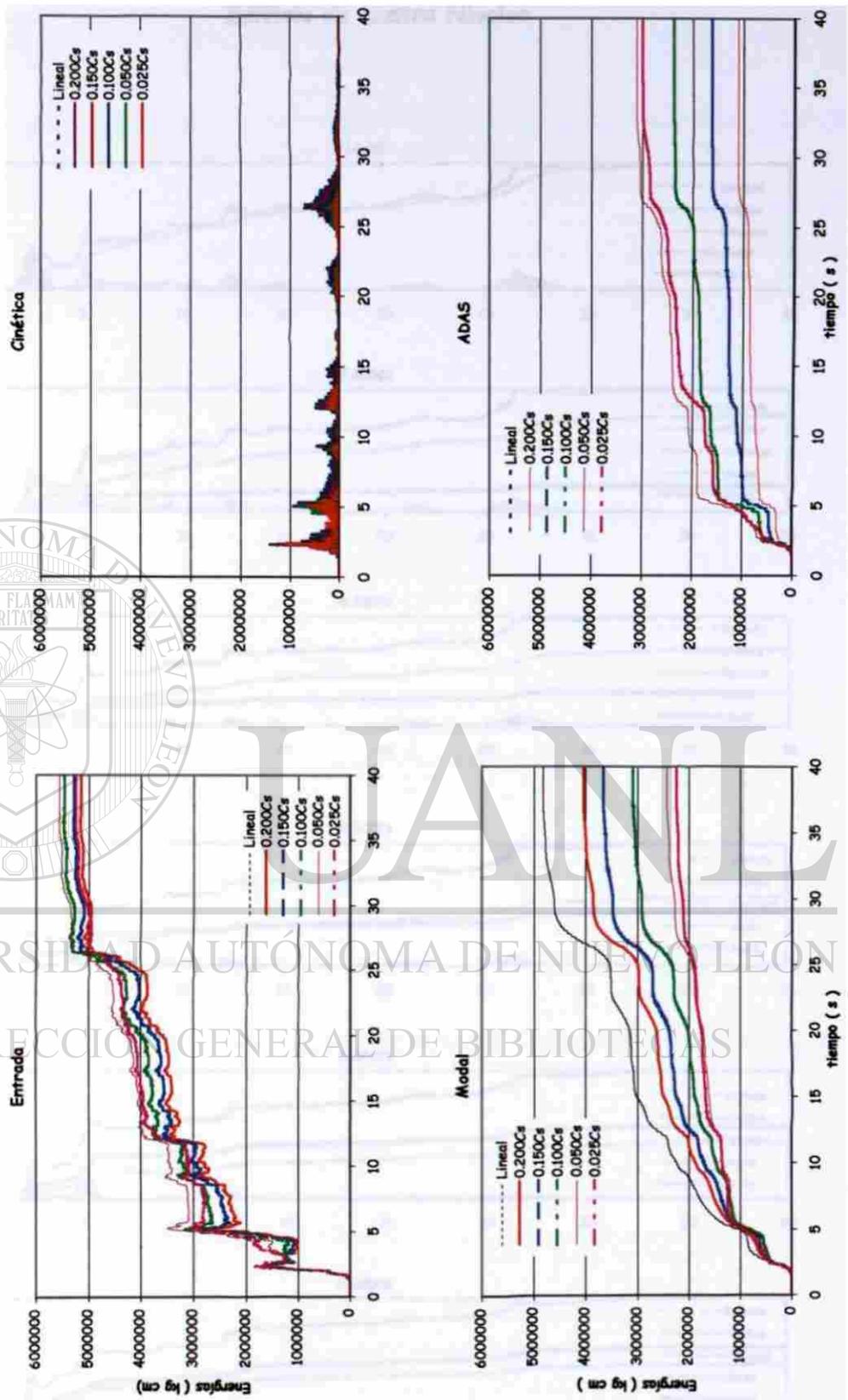
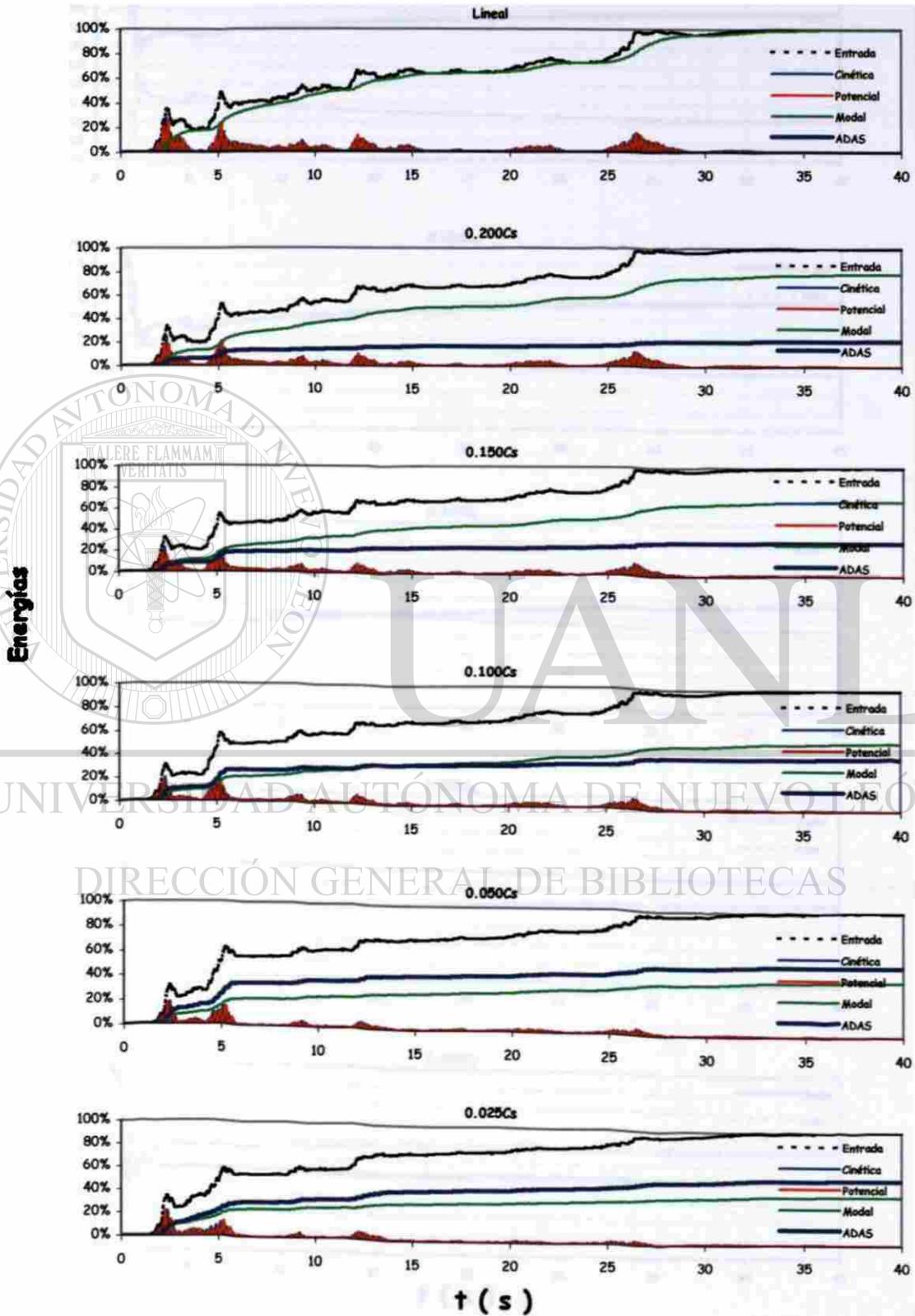


Fig. 6.39 Historias de energías (El Centro);  $K_{ADAS} = 50\%$ .

**Energías ( El Centro )**  
**Edificio de cuatro Niveles**



**Fig. 6.40** Porcentajes de energías (El Centro);  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

Energías Disipadas (El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

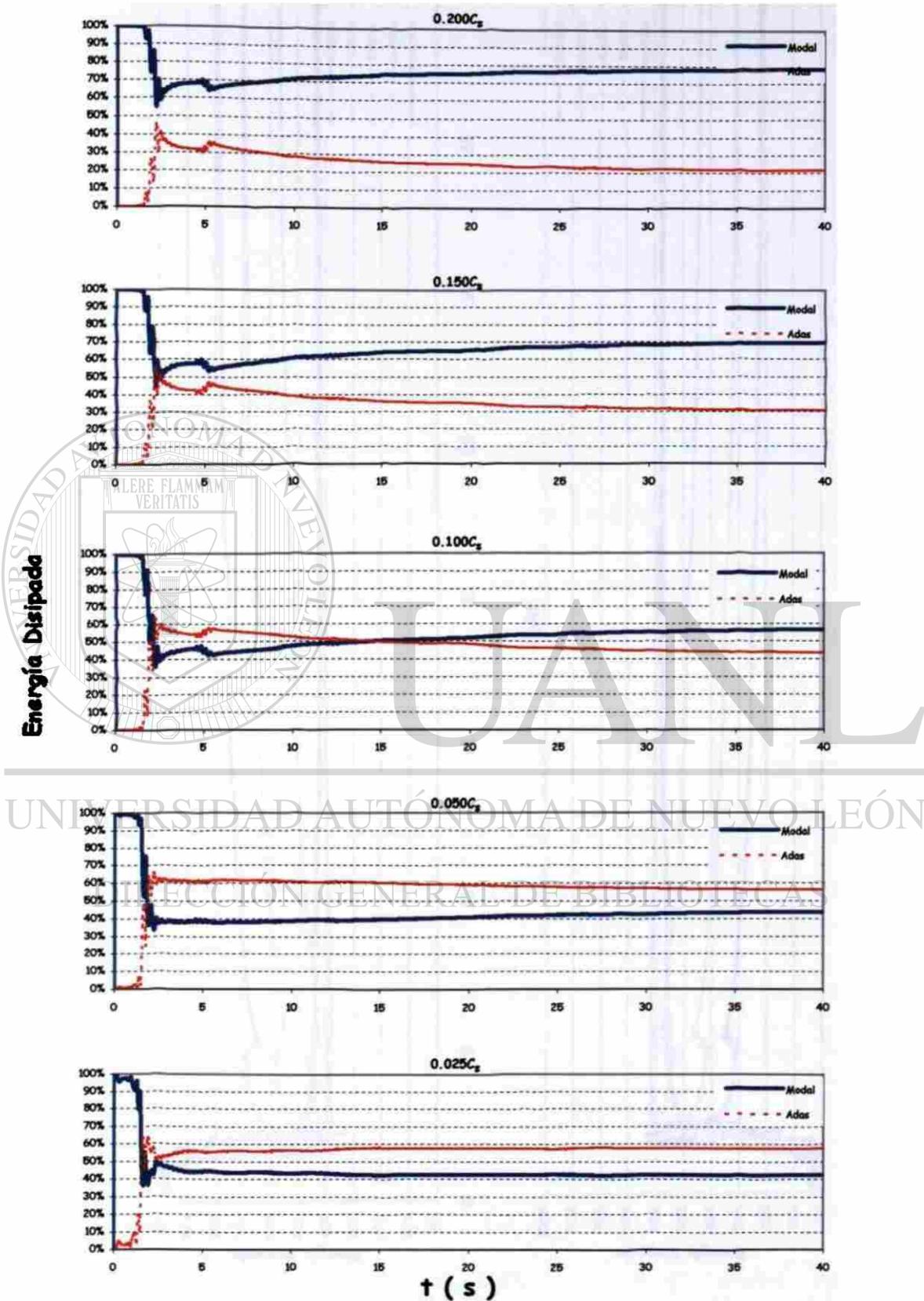


Fig. 6.41 Energías disipadas (El Centro);  $K_{ADAS} = 50\%$ .

Comparación de Energías Disipadas ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles

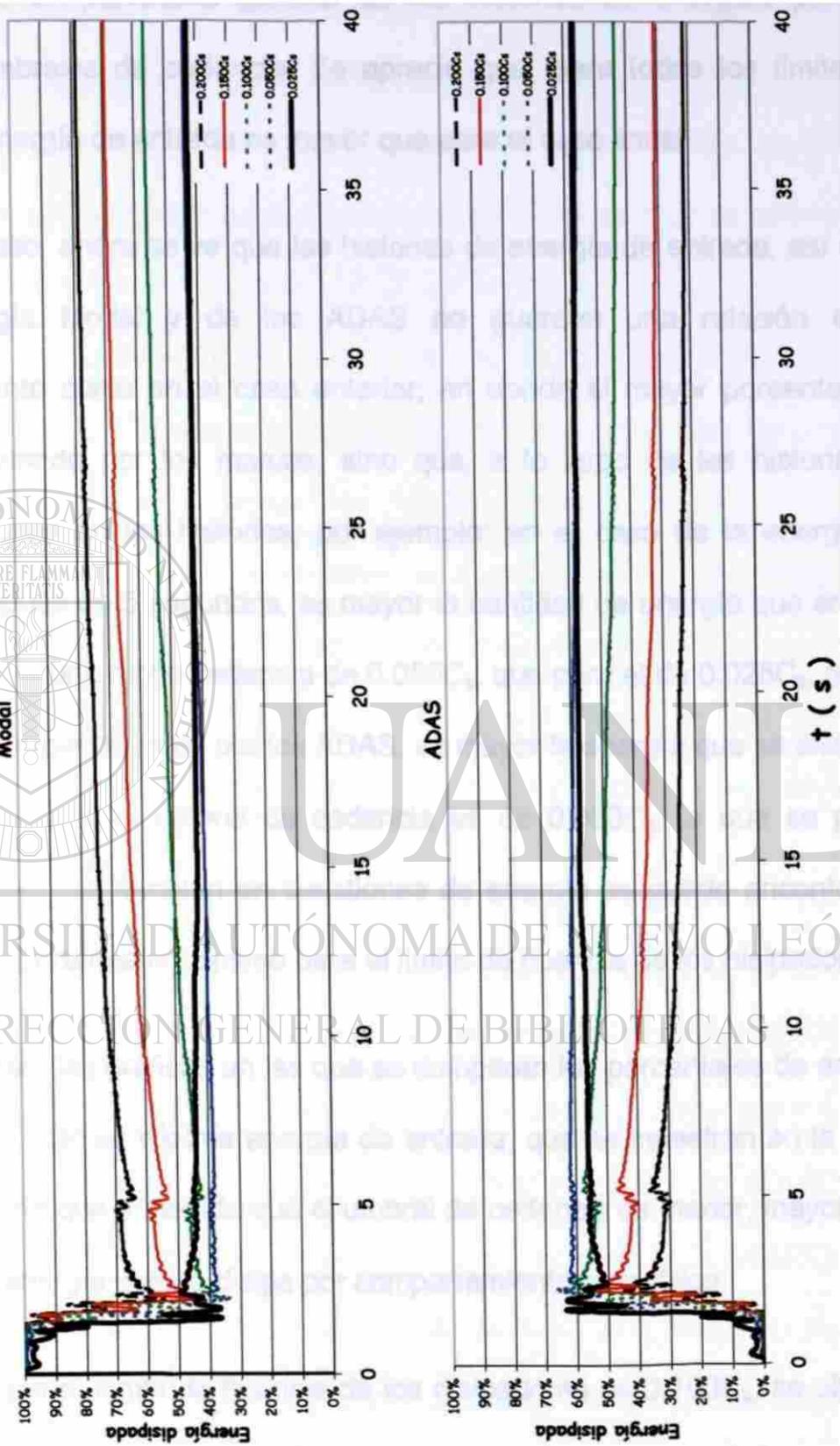


Fig. 6.42 Comparación de energías disipadas (El Centro);  $K_{ADAS} = 50\%$ .

Cuando la mitad de la rigidez lateral es proporcionada por los ADAS, la figura 6.39 muestra un panorama general de las historias de energías para los diferentes umbrales de cedencia. Se aprecia que, para todos los límites de fluencia, la energía de entrada es mayor que para el caso lineal.

Además de eso, ahora se ve que las historias de energía de entrada, así como la de energía Modal y de los ADAS no guardan una relación en el comportamiento como en el caso anterior; en donde el mayor porcentaje de rigidez es tomado por los marcos, sino que, a lo largo de las historias se observan cruces en las historias, por ejemplo: en el caso de la energía de entrada, después de 5 segundos, es mayor la cantidad de energía que entra al sistema para el umbral de cedencia de  $0.050C_s$ , que para el de  $0.025C_s$ , o en el caso de la energía disipada por los ADAS, es mayor la energía que se disipa de esa forma, cuando el umbral de cedencia es de  $0.050C_s$ ; lo que se puede entender como que también en cuestiones de energía se puede encontrar un punto de comportamiento óptimo para el límite de fluencia de los disipadores.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Si se observan las gráficas en las que se comparan los porcentajes de energía normalizados, con la máxima energía de entrada, que se muestran en la figura 6.40, es notorio que a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es la cantidad de energía que se disipa por comportamiento histerético.

En el caso que el límite de fluencia de los disipadores es  $0.100C_s$ , se observa que, aproximadamente a los 13 segundos, existe un "cruce" de energías disipadas, es decir, antes de ese punto, es mayor la energía disipada por los

ADAS; pero después de ese punto, se disipa mayor cantidad de energía por comportamiento modal; sin embargo, para umbrales de cedencia menores, la energía disipada por los ADAS es mayor que la que se disipa por amortiguamiento modal. Ese "cruce" se observa, de forma más clara, en la figura 6.41, si se observa la gráfica que corresponde al umbral de cedencia de  $0.100C_s$ , es posible advertir que existe un momento, después de los 13 segundos, aproximadamente, en que la energía disipada por comportamiento modal es mayor que la disipada por los ADAS. Para umbrales de cedencia menores, la energía disipada por los ADAS es mayor una vez que estos empiezan a trabajar, lo cual es deseable, ya que se busca que la energía que ya ha entrado al sistema sea disipada por comportamiento histerético y no por el amortiguamiento propio de la estructura, ya que de esa forma, cuando la energía se disipa por amortiguamiento modal, los daños a los elementos estructurales son mayores.

Al comparar los porcentajes de energías disipadas para todos los umbrales de cedencia, según la gráfica que se presenta en la figura 6.42, se aprecia que para ambos casos de energía disipada, Modal y ADAS, la diferencia entre los umbrales de cedencia de  $0.025C_s$  y  $0.050C_s$  es casi imperceptible, lo que puede entenderse como que después de cierto umbral de cedencia la mejora que se tiene en el comportamiento ya no es mucha, es decir, que existe un punto de fluencia de los disipadores que se puede considerar como el punto de fluencia óptimo para el comportamiento del edificio.

Comparación de Energías (El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

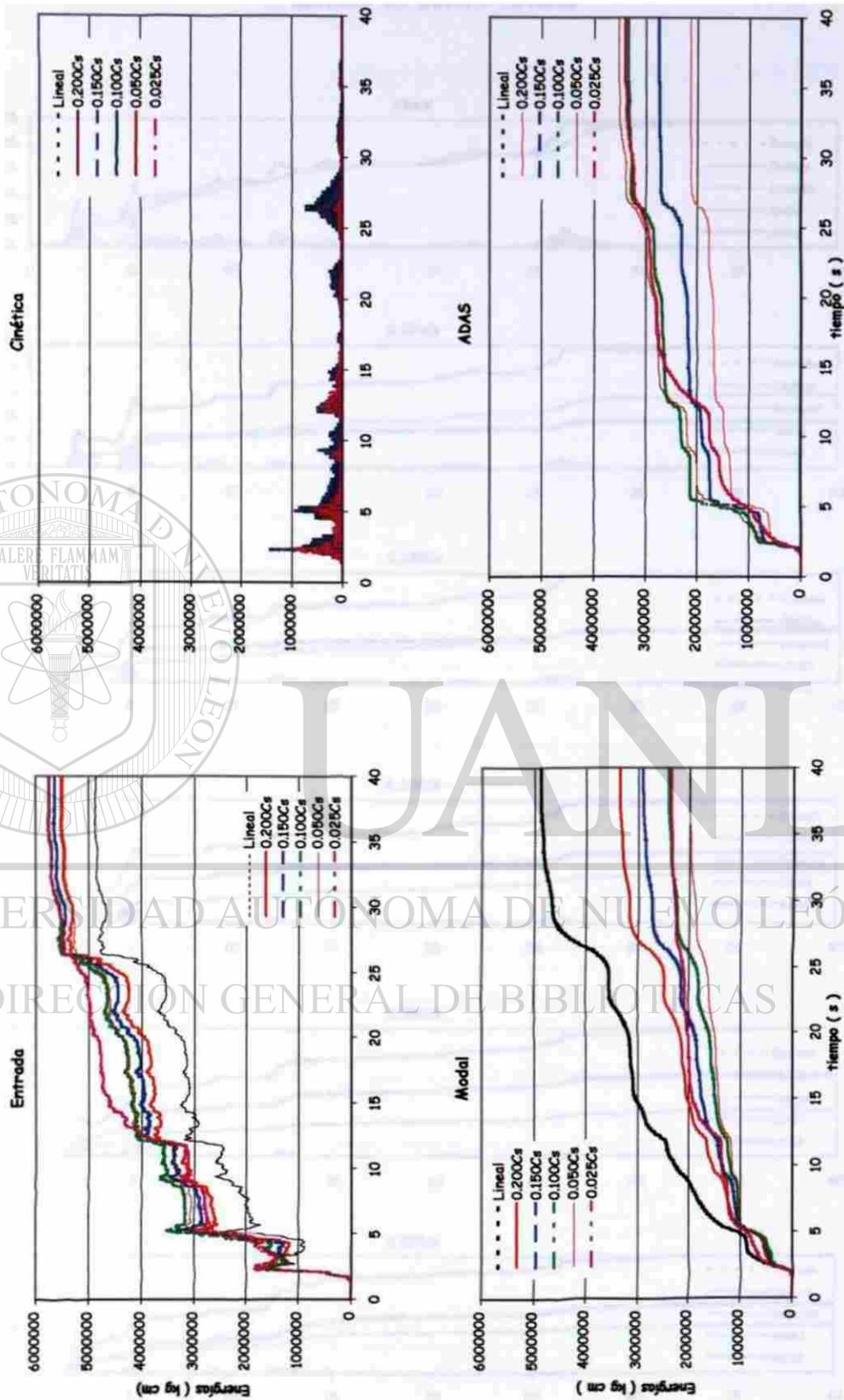


Fig. 6.43 Historias de energías (El Centro);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Energías ( El Centro )  
Edificio de Cuatro Niveles

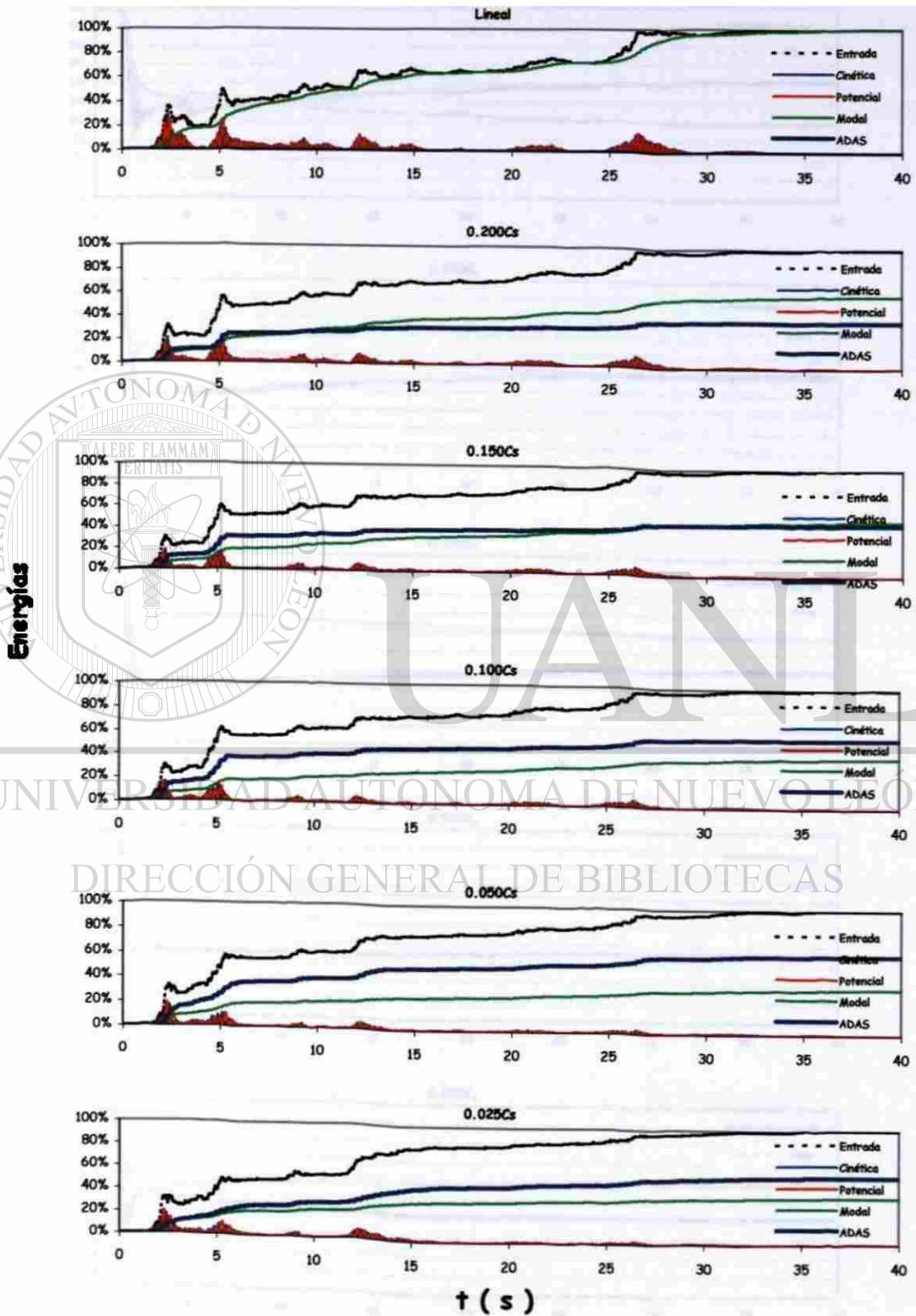


Fig. 6.44 Porcentajes de energías (El Centro);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Energías Disipadas (El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

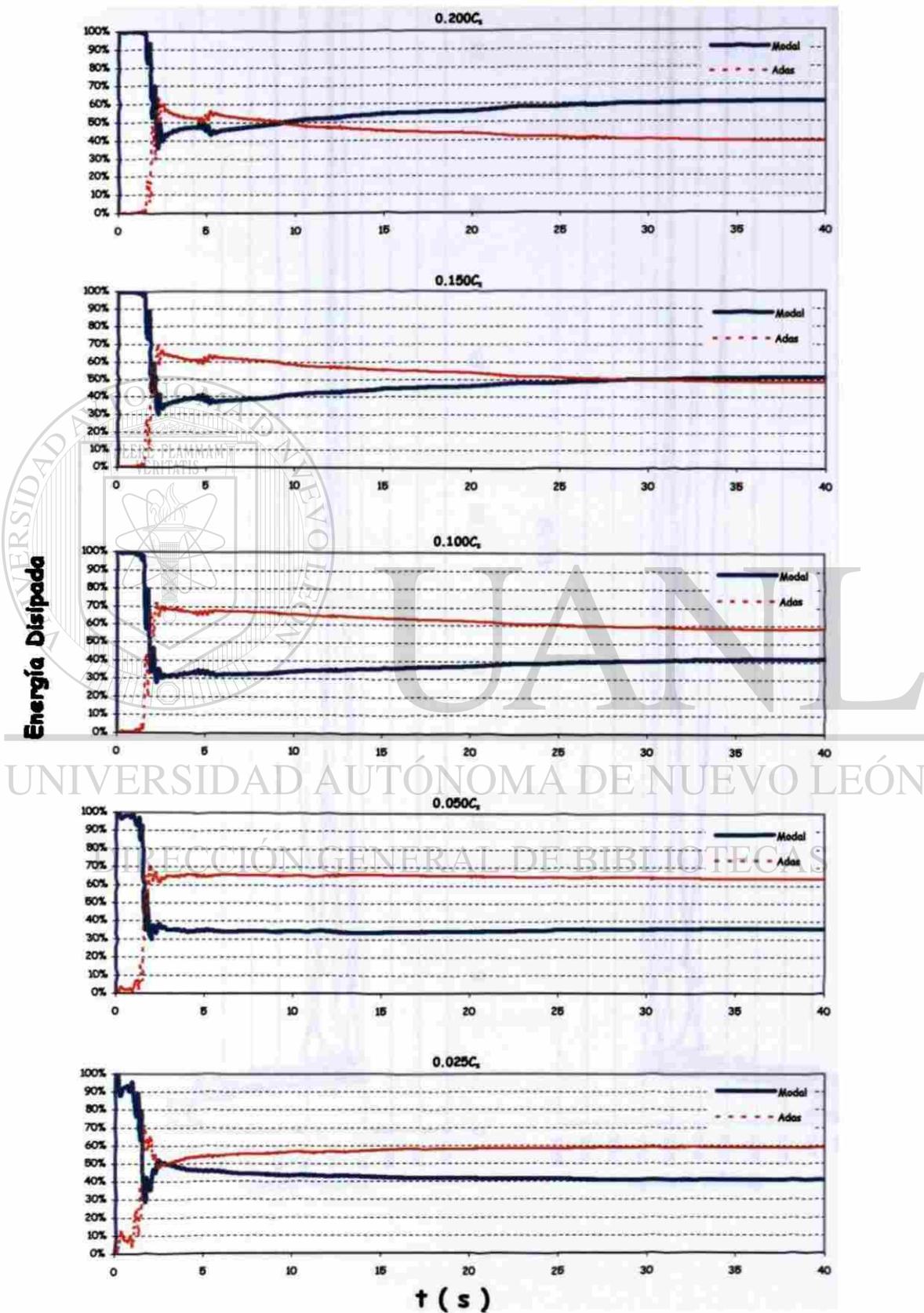


Fig. 6.45 Energías disipadas (El Centro);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Comparación de Energías Disipadas ( El Centro )

Edificio de Cuatro Niveles

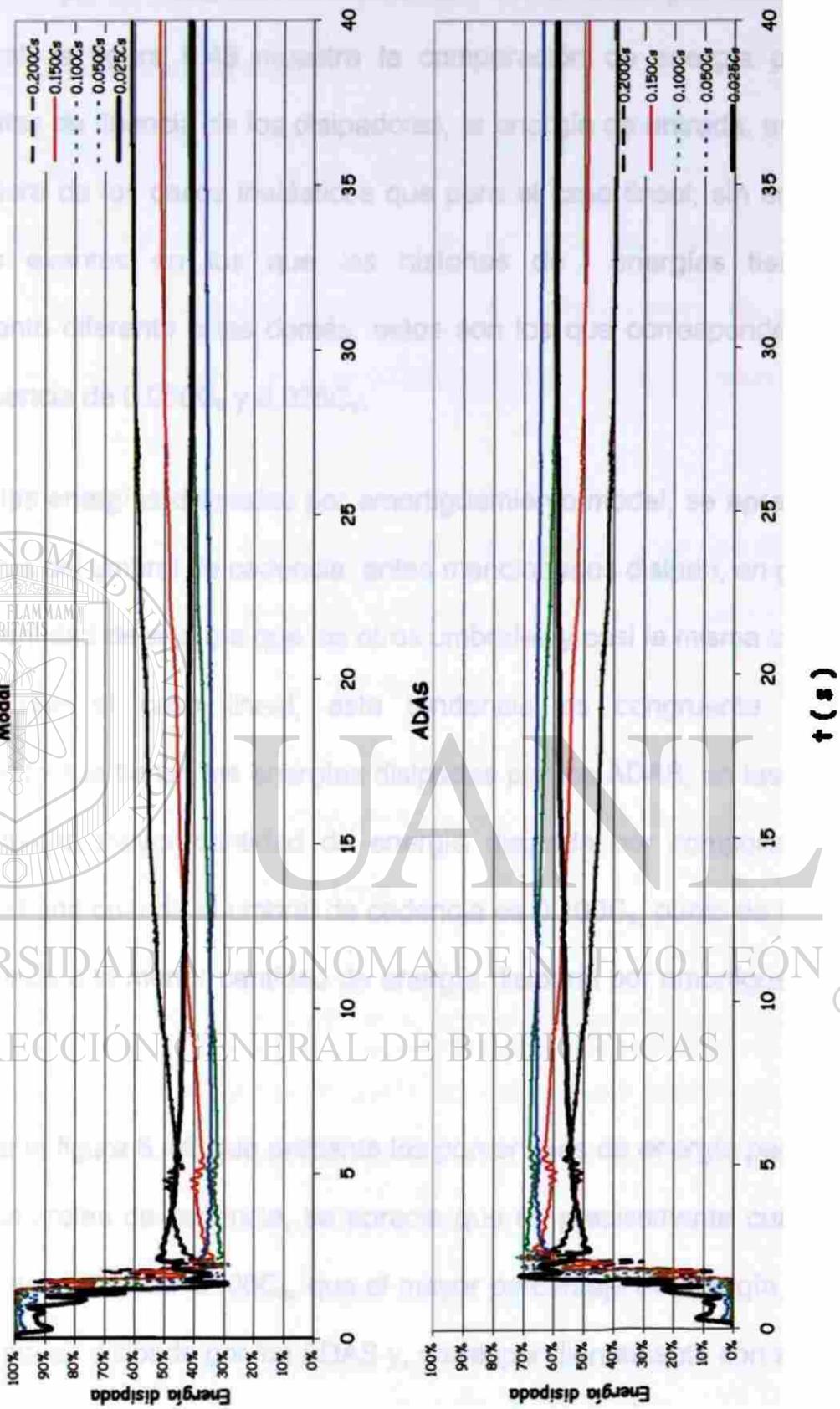


Fig. 6.46 Comparación de energías disipadas (El Centro);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

En el caso en que los disipadores histeréticos toman el 75 por ciento de la rigidez lateral, la figura 6.43 muestra la comparación de energía para los distintos límites de fluencia de los disipadores, la energía de entrada, es mayor para cualquiera de los casos inelásticos que para el caso lineal; sin embargo, existen dos eventos en los que las historias de energías tienen un comportamiento diferente a las demás, estos son los que corresponden a los límites de fluencia de  $0.050C_s$  y  $0.025C_s$ .

Al observar las energías disipadas por amortiguamiento modal, se aprecia que los dos valores del umbral de cedencia antes mencionados disipan, en general, una mayor cantidad de energía que los otros umbrales y casi la misma cantidad de energía que el caso lineal, esta tendencia es congruente con el comportamiento que tienen las energías disipadas por los ADAS, en las que se puede ver que la mayor cantidad de energía disipada por comportamiento histerético se tiene cuando el umbral de cedencia es  $0.100C_s$ , punto de fluencia que corresponde a la menor cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal.

Si se observa la figura 6.44, que presenta los porcentajes de energía para cada uno de los umbrales de cedencia, se aprecia que es precisamente cuando el umbral de cedencia es de  $0.100C_s$ , que el mayor porcentaje de energía que ya entró al sistema es disipado por los ADAS y, correspondientemente con esto, se tiene la menor cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal, no así para umbrales de cedencia menores, ni mayores a este, lo que se puede

entender como que es este el punto de fluencia óptimo para la distribución de rigideces laterales que tiene el edificio.

En los porcentajes de energía disipada (figura 6.45), se puede ver que el límite de fluencia que corresponde a  $0.100C_s$ , una vez que los disipadores han empezado a trabajar, mantiene siempre un porcentaje mayor de energía disipada por los ADAS que por comportamiento modal, este fenómeno se traduce en menor daño estructural.

En la figura 6.46, en la cual se presenta una comparación de energías disipadas para los distintos umbrales de cedencia, se observa que, efectivamente, es con el límite de fluencia igual a  $0.100C_s$  que se disipa menor cantidad de energía por amortiguamiento modal y mayor por comportamiento histerético; así es posible afirmar que, en esta proporción de rigideces, el límite de fluencia óptimo es ese, al menos en cuestiones de energía.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

El comportamiento del edificio, cuando se le sujeta al acelerograma del sismo de CU, también se analiza desde el punto de vista de las energías; ya que, como se explicó con anterioridad, se considera que el enfoque energético complementa el análisis hecho, al considerar únicamente los desplazamientos y los cortantes en la base, que es la manera en que se suele evaluar la respuesta de una estructura, en este caso, el edificio, sujeto a fuerzas sísmicas.

Las gráficas obtenidas del análisis del edificio con el acelerograma de CU, se muestran en las figuras de la 6.47 a la 6.58.

Comparación de Energías ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

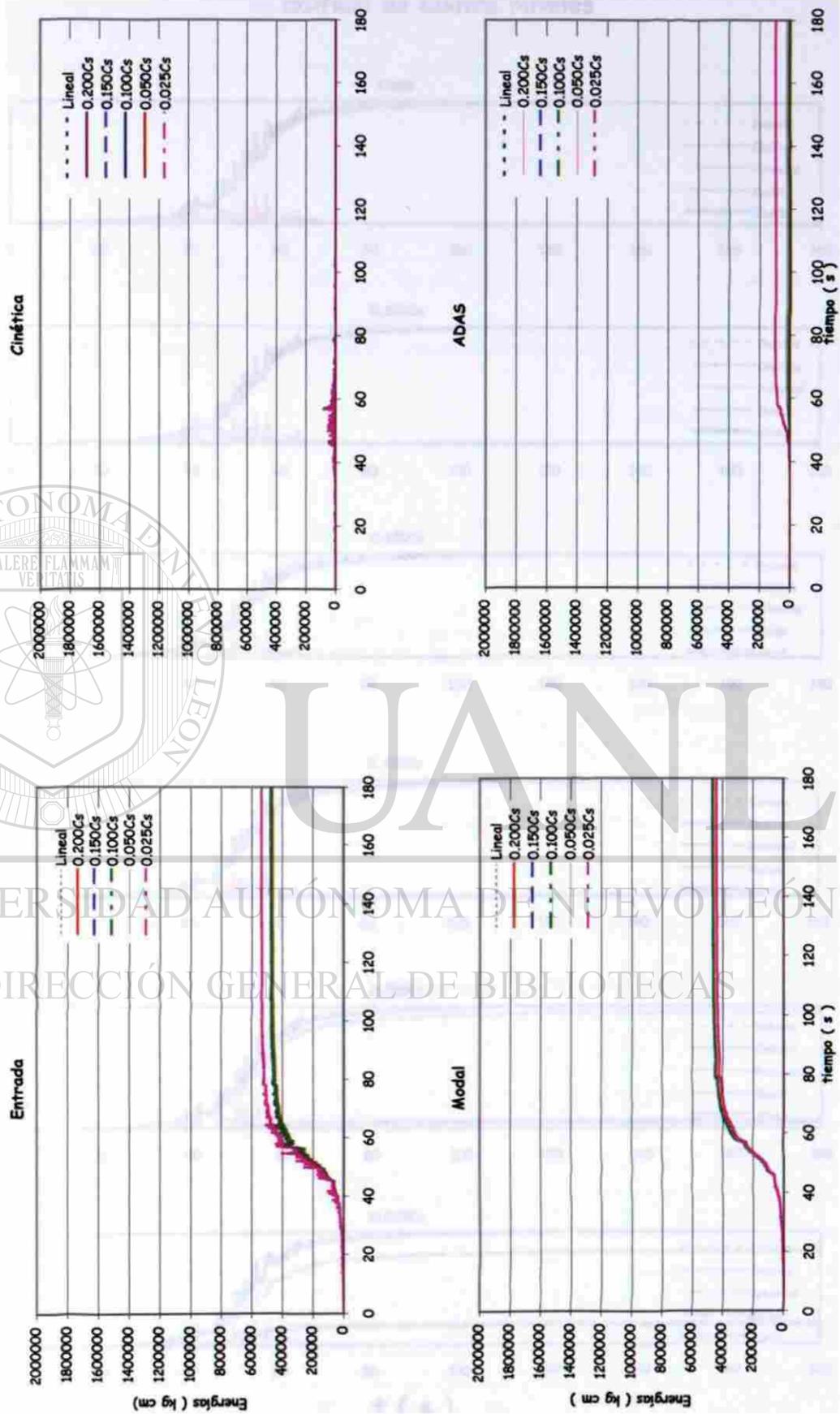


Fig. 6.47 Historias de energías (CU '85 (E-W));  $K_{ADAS} = 25 \%$ .

Energías ( CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

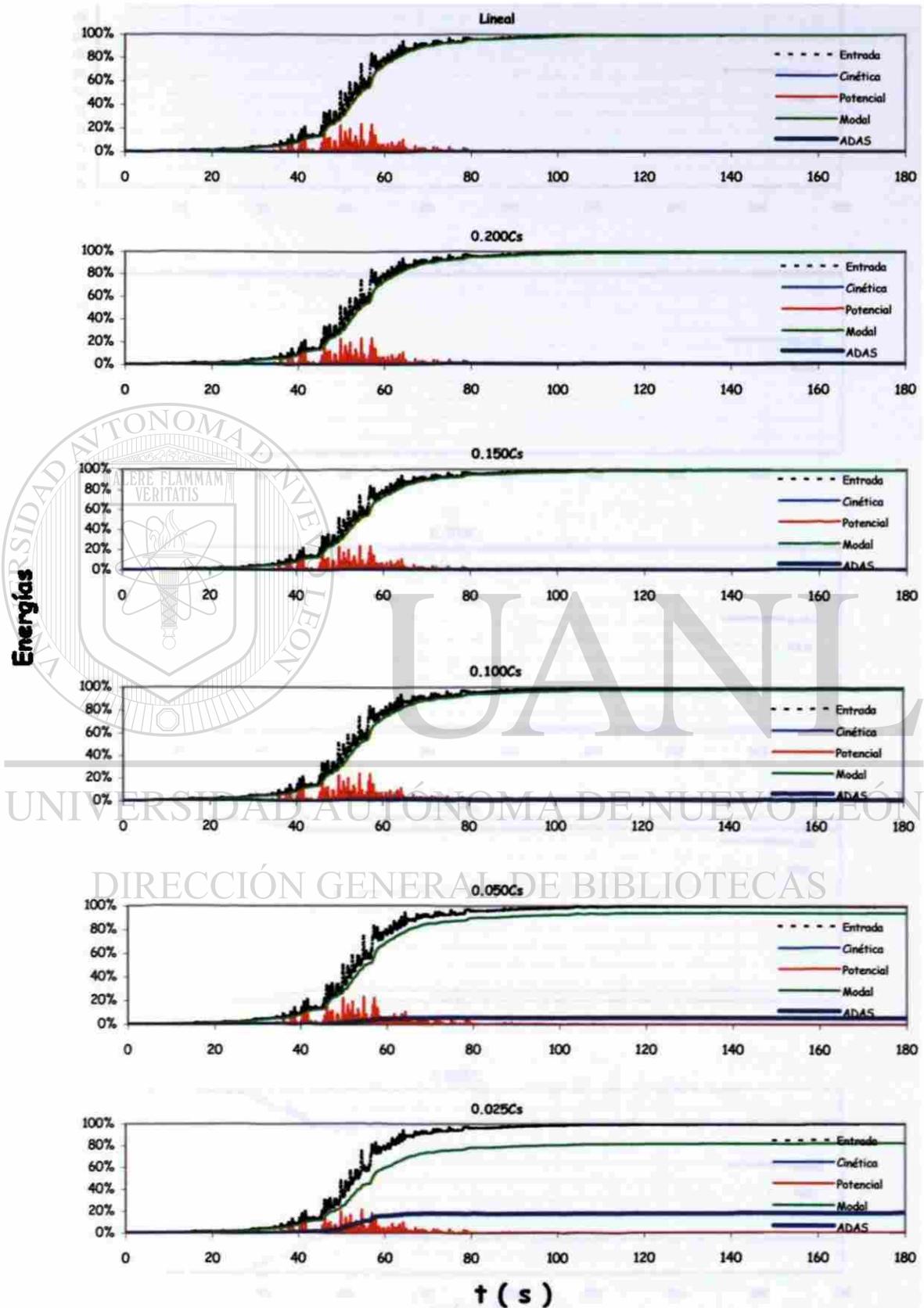


Fig. 6.48 Porcentajes de energía (CU `85 (E-W));  $K_{ADAS} = 25 \%$ .

Energías Disipadas ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

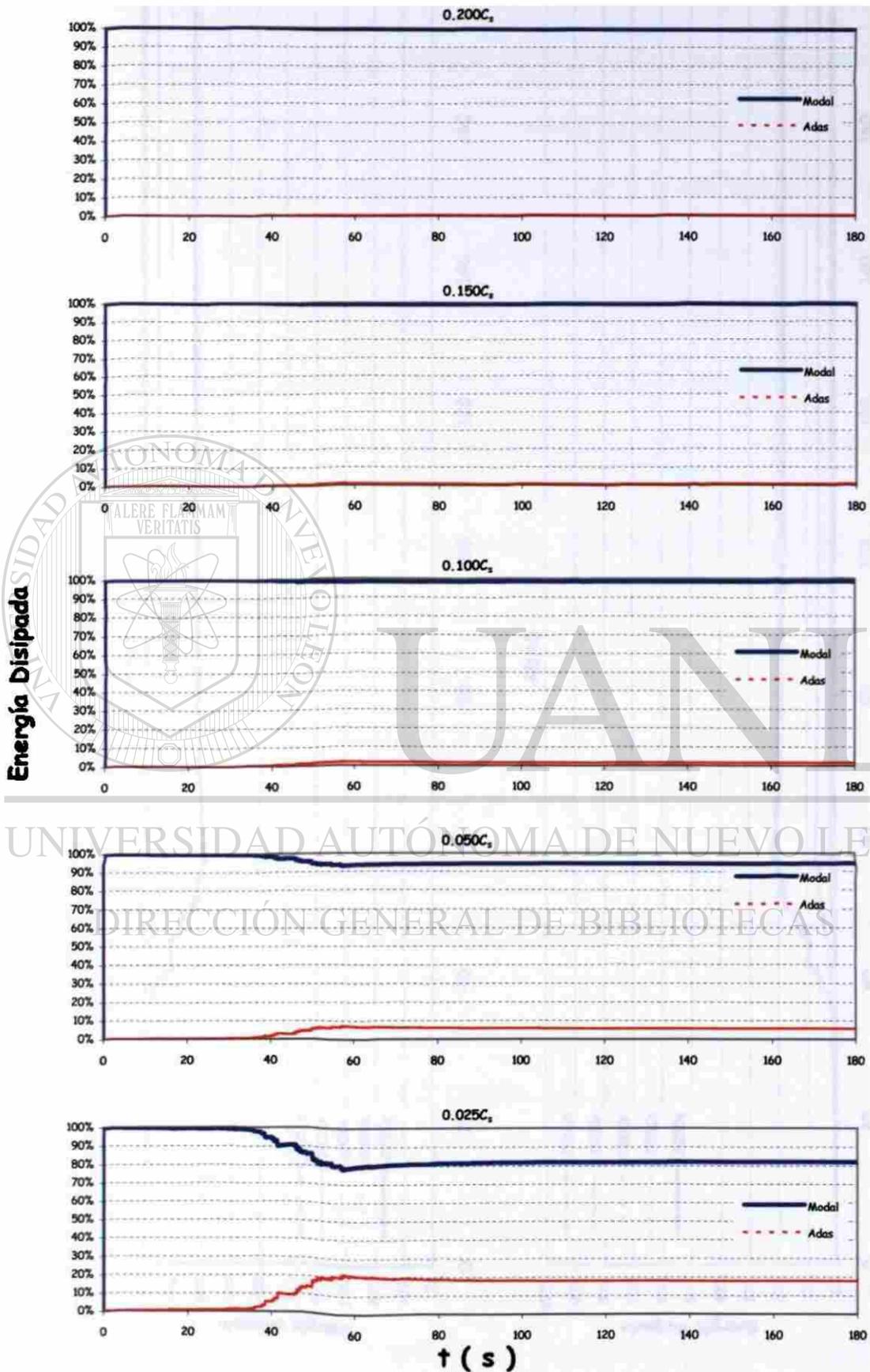


Fig. 6.49 Energías disipadas (CU '85 (E-W));  $K_{ADAS} = 25 \%$ .

Comparación de Energías Disipadas (CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

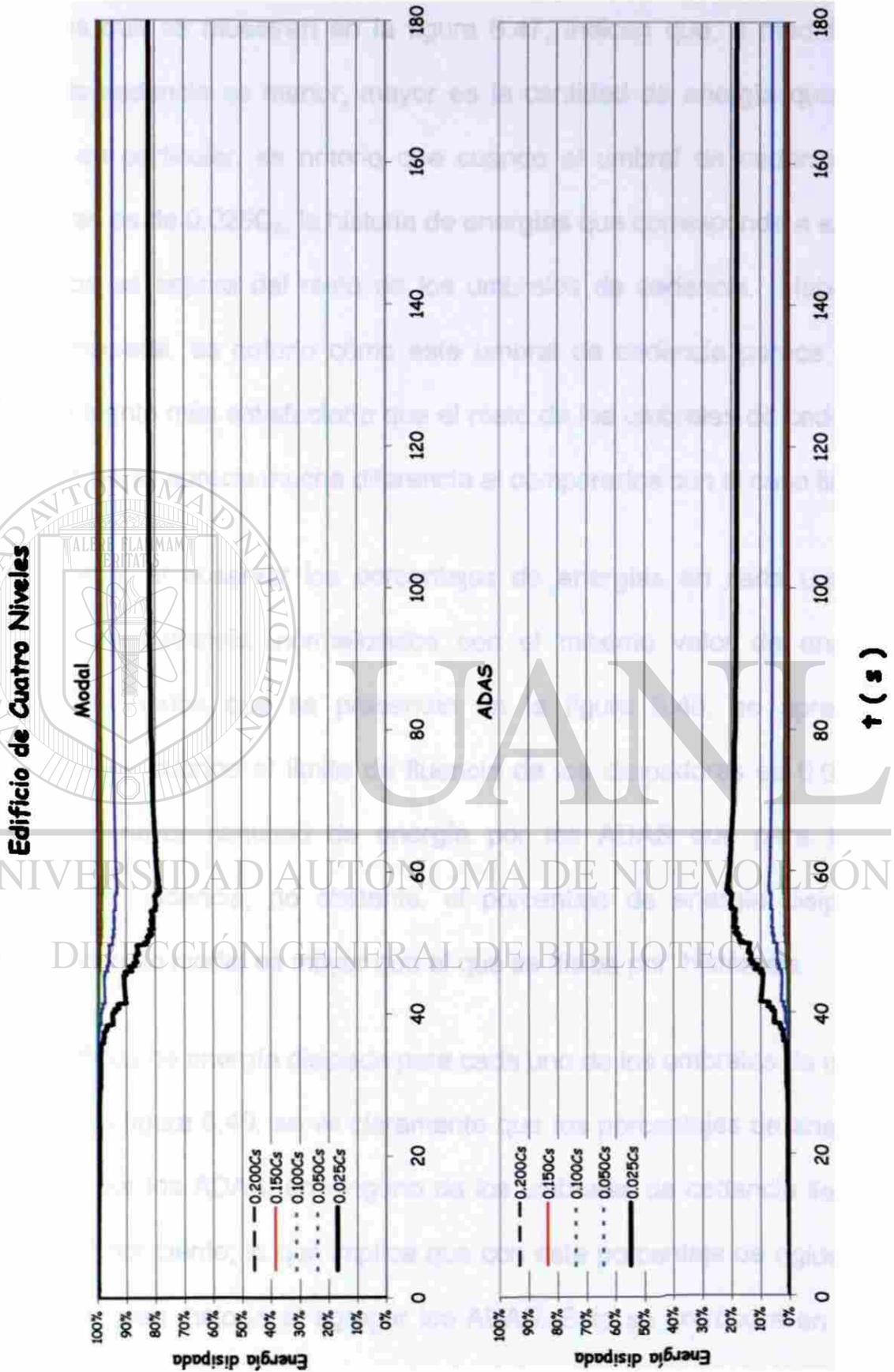


Fig. 6.50 Comparación de energías disipadas (CU `85 (E-W));  $K_{ADAS} = 25\%$ .

En el caso en que los marcos toman el 75 por ciento de la rigidez lateral, los resultados que se muestran en la figura 6.47, indican que, a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es la cantidad de energía que entra al sistema; en particular, es notorio que cuando el umbral de cedencia de los disipadores es de  $0.025C_s$ , la historia de energías que corresponde a este límite de fluencia se separa del resto de los umbrales de cedencia. Hablando de energía disipada, es notorio cómo este umbral de cedencia parece tener un comportamiento más satisfactorio que el resto de los umbrales de cedencia, en los cuales no se aprecia mucha diferencia al compararlos con el caso lineal.

Sin embargo, al observar los porcentajes de energías en cada uno de los umbrales de cedencia, normalizados con el máximo valor de energía de entrada, resultados que se presentan en la figura 6.48; se aprecia que, efectivamente, cuando el límite de fluencia de los disipadores es  $0.025C_s$ , se disipa una mayor cantidad de energía por los ADAS que para los otros umbrales de cedencia, no obstante, el porcentaje de energía disipado por amortiguamiento modal es mayor que el que se disipa por histéresis.

En las gráficas de energía disipada para cada uno de los umbrales de cedencia, gráfica de la figura 6.49, se ve claramente que los porcentajes de energía que se disipan por los ADAS, en ninguno de los umbrales de cedencia llega a ser más del 20 por ciento; lo que implica que con este porcentaje de rigidez lateral no se tiene gran mejoría al agregar los ADAS. Esto se corrobora en la figura 6.50, que muestra que los disipadores de energía no disipan suficiente energía con los ADAS, como para considerar conveniente agregarlos al edificio.

Comparación de Energías ( CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

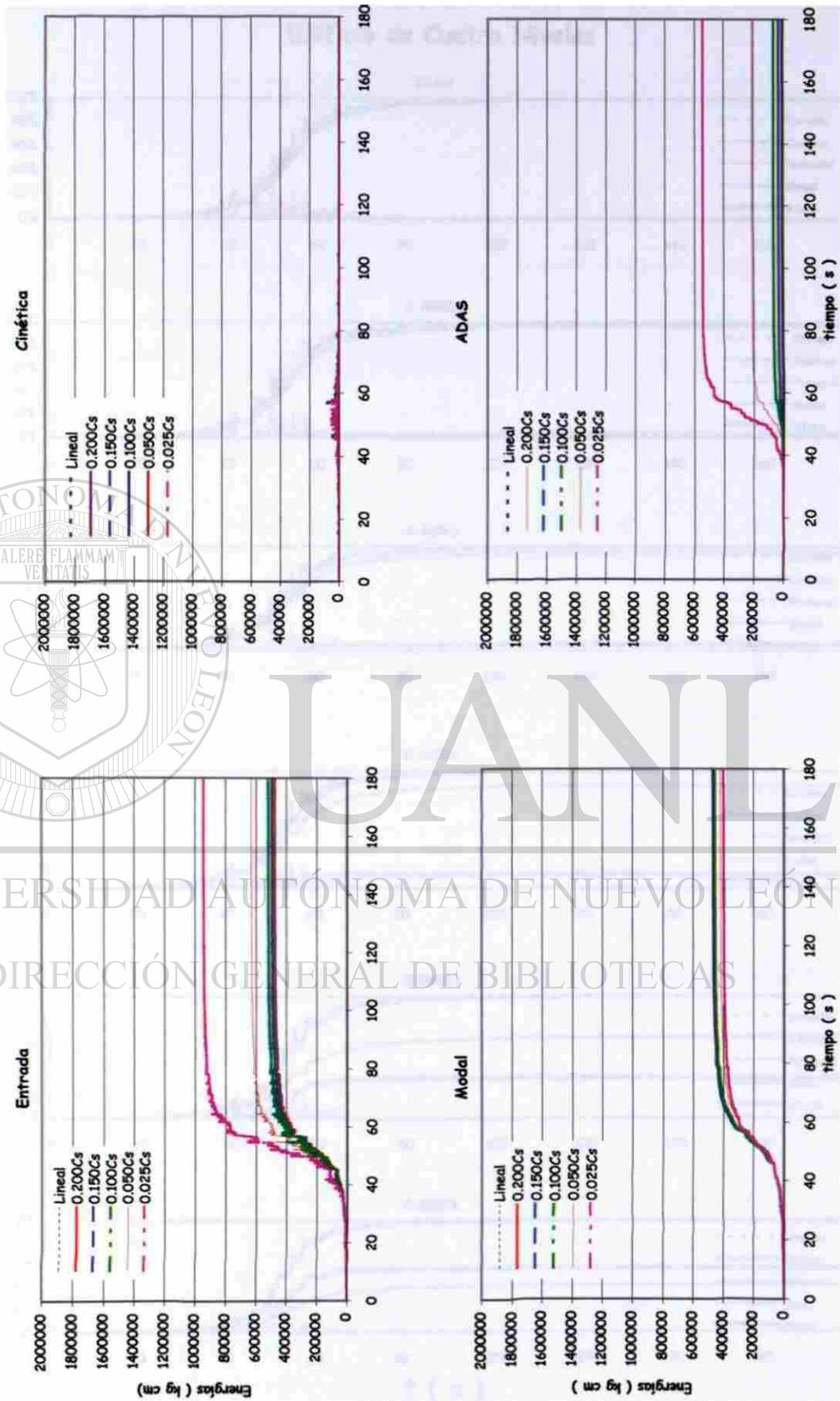


Fig. 6.51 Historias de energías (CU `85 (E-W));  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

Energías ( CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

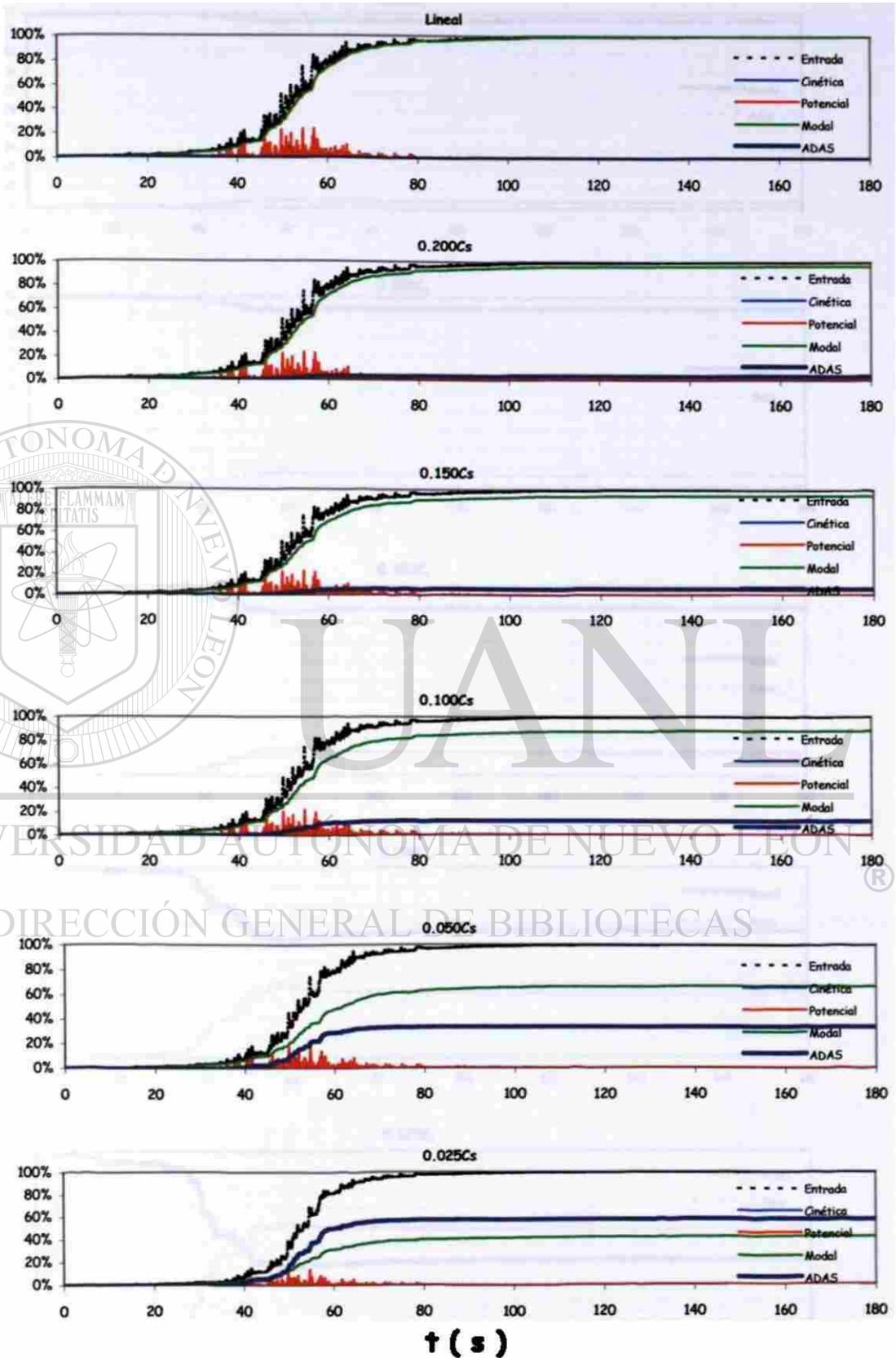


Fig. 6.52 Porcentajes de energías (CU `85 (E-W));  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

Energías Disipadas ( CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

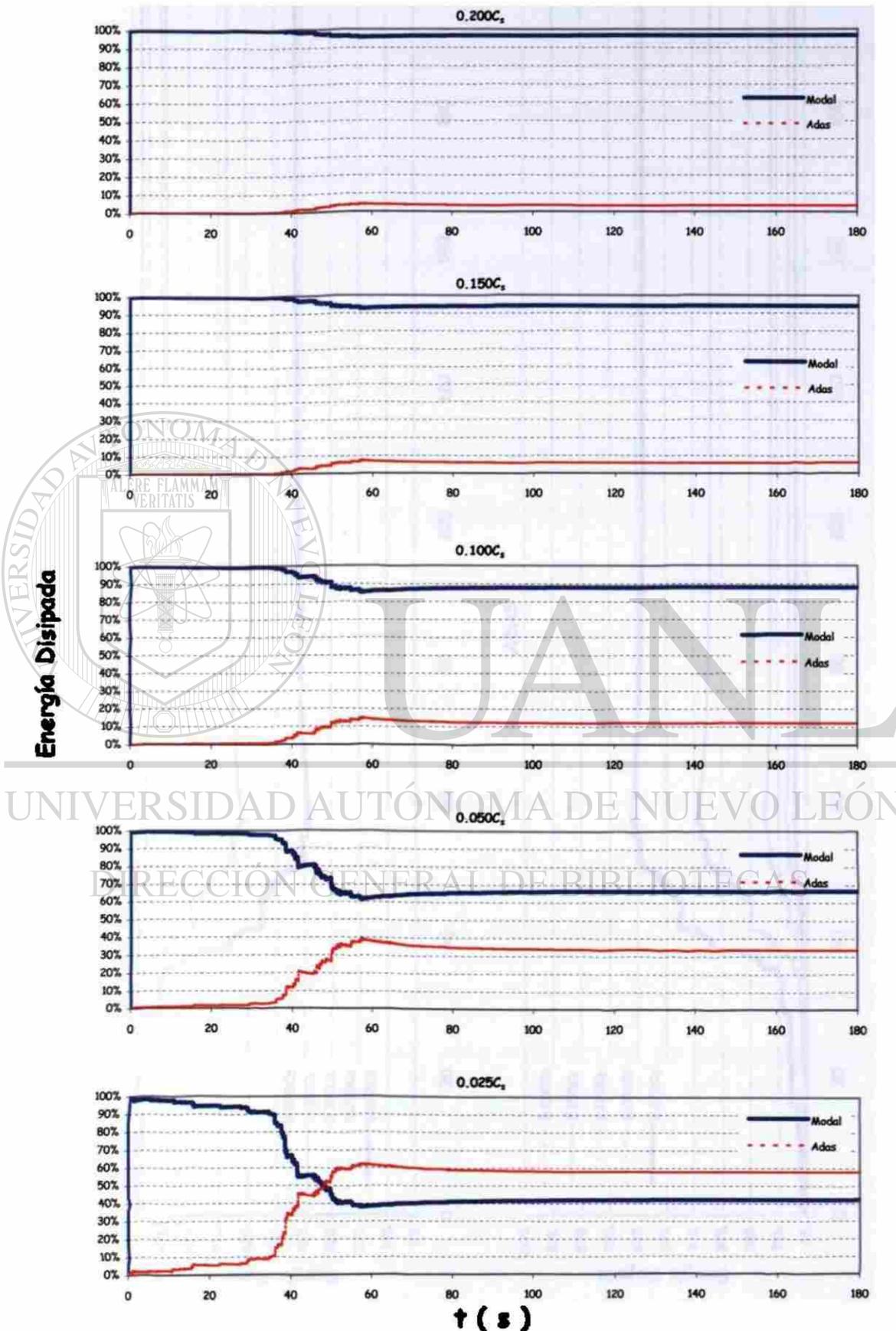


Fig. 6.53 Energías disipadas (CU `85 (E-W));  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

Comparación de Energías Disipadas (CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

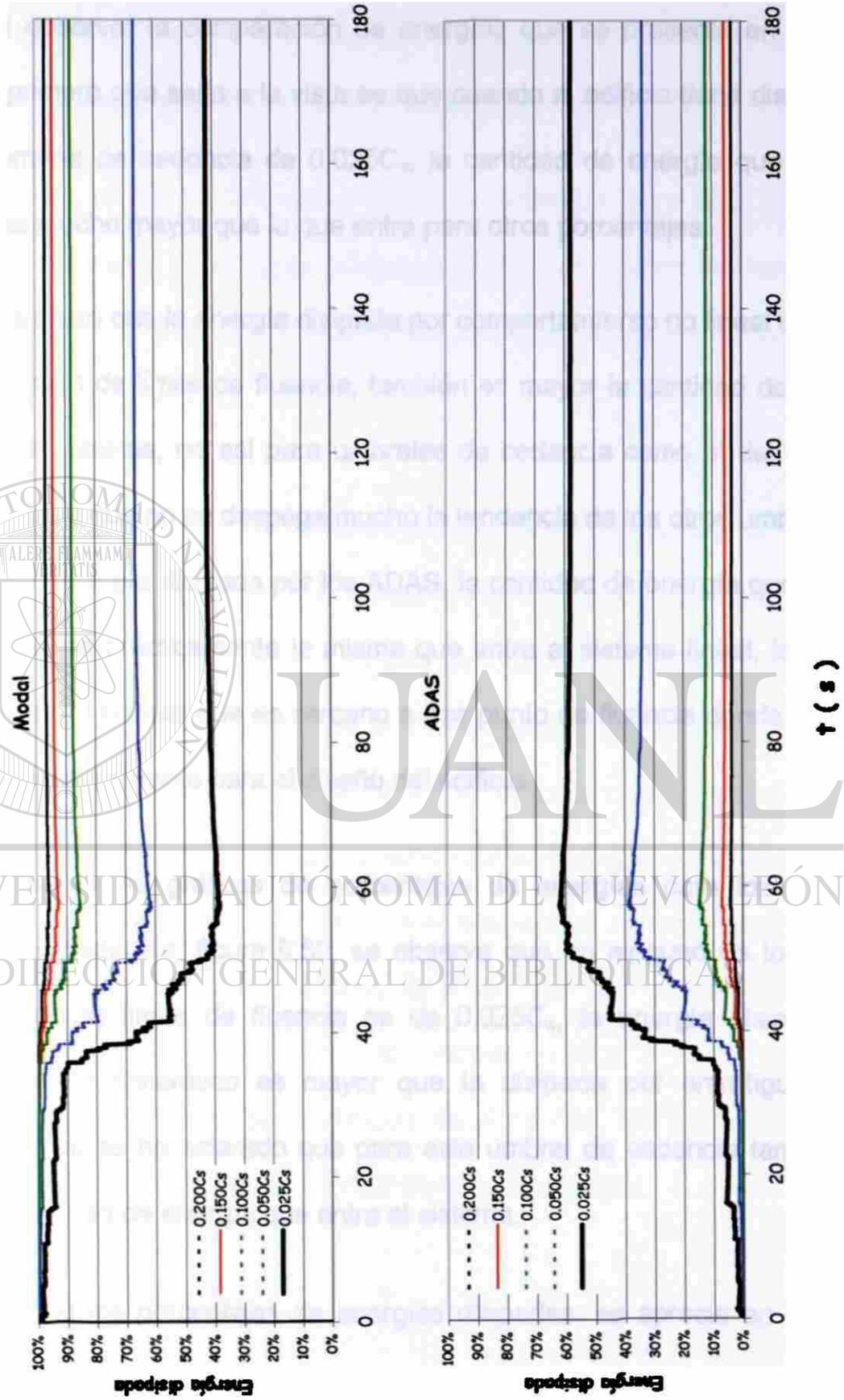


Fig. 6.54 Comparación de energías Disipadas (CU `85 (E-W));  $K_{ADAS} = 50 \%$ .

En el caso en que la rigidez lateral tomada por los ADAS es el cincuenta por ciento, al observar la comparación de energías que se presenta en la figura 6.51, lo primero que salta a la vista es que cuando el edificio tiene disipadores con un umbral de cedencia de  $0.025C_s$ , la cantidad de energía que entra al sistema es mucho mayor que la que entra para otros porcentajes.

Si bien, es cierto que la energía disipada por comportamiento no lineal es mayor para este caso de límite de fluencia, también es mayor la cantidad de energía que entra al sistema, no así para umbrales de cedencia como el del  $0.100C_s$ , que a pesar de que no se despega mucho la tendencia de los otros umbrales de cedencia en energía disipada por los ADAS, la cantidad de energía que entra a este sistema es prácticamente la misma que entra al sistema lineal, lo que da evidencias para pensar que es cercano a ese punto de fluencia donde se tiene el mejor comportamiento para el diseño del edificio.

Si se observan las gráficas de porcentajes de energías para los distintos umbrales de cedencia, figura 6.52, se observa que en ninguno de los casos, salvo cuando el límite de fluencia es de  $0.025C_s$ , la energía disipada por comportamiento histerético es mayor que la disipada por amortiguamiento modal, pero ya se ha aclarado que para este umbral de cedencia también es mayor la cantidad de energía que entra al sistema.

En el caso de los porcentajes de energías disipadas, se aprecia en la figura 6.53. que únicamente es para el caso en el que el umbral de cedencia sea  $0.025C_s$ , que la energía disipada por comportamiento histerético es mayor que

la que se disipa por amortiguamiento modal de la estructura; una vez que los dispositivos disipadores han empezado a trabajar; sin embargo, para este umbral de cedencia es para el que entra mayor cantidad de energía al sistema.

Una comparación de las diferentes energías disipadas para cada umbral de cedencia se muestra en la figura 6.54, se aprecia que el límite de fluencia que menor energía disipa por amortiguamiento modal y más por comportamiento histerético, es el de  $0.025C_s$ .

Sin embargo, ya se había visto que es precisamente este umbral el que tiene mayor energía de entrada; así que, descartando ese umbral, es posible afirmar que el que mejor se comporta es el que corresponde a  $0.050C_s$ , ya que en comparación con los otros umbrales, la energía de entrada es prácticamente la misma, pero la energía disipada por los ADAS es mayor y, al mismo tiempo, la cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal es menor, lo que puede traducirse en menor daño a los elementos estructurales, que es precisamente lo que se busca al agregar elementos que disipen energía por comportamiento histerético, además de localizar en ellos el mayor porcentaje posible de energía disipada, cuidando siempre que no se sobrepase la ductilidad que estos dispositivos son capaces de desarrollar.

Comparación de Energías ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

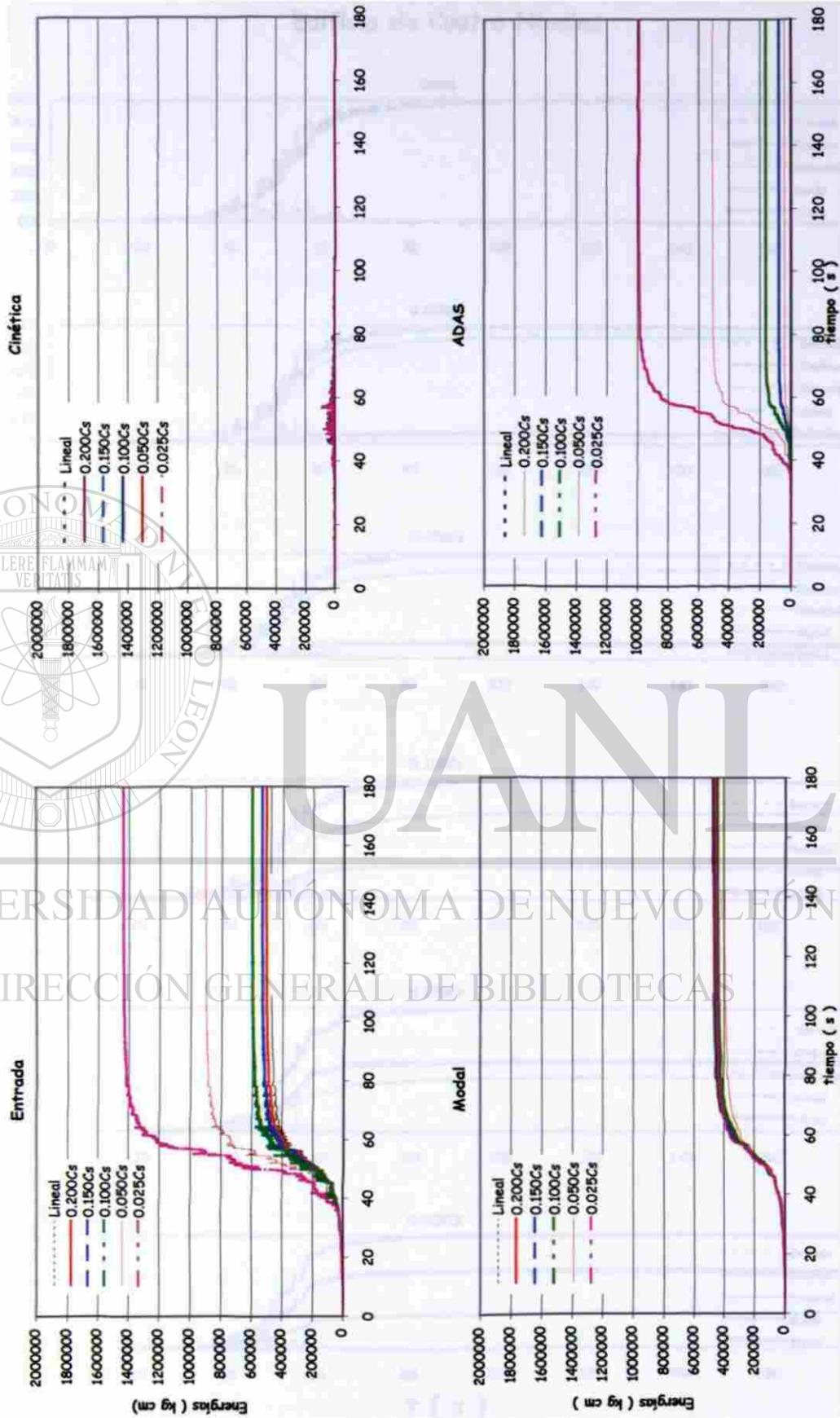


Fig. 6.55 Historias de energías (CU '85 (E-W));  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Energías ( CU `85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

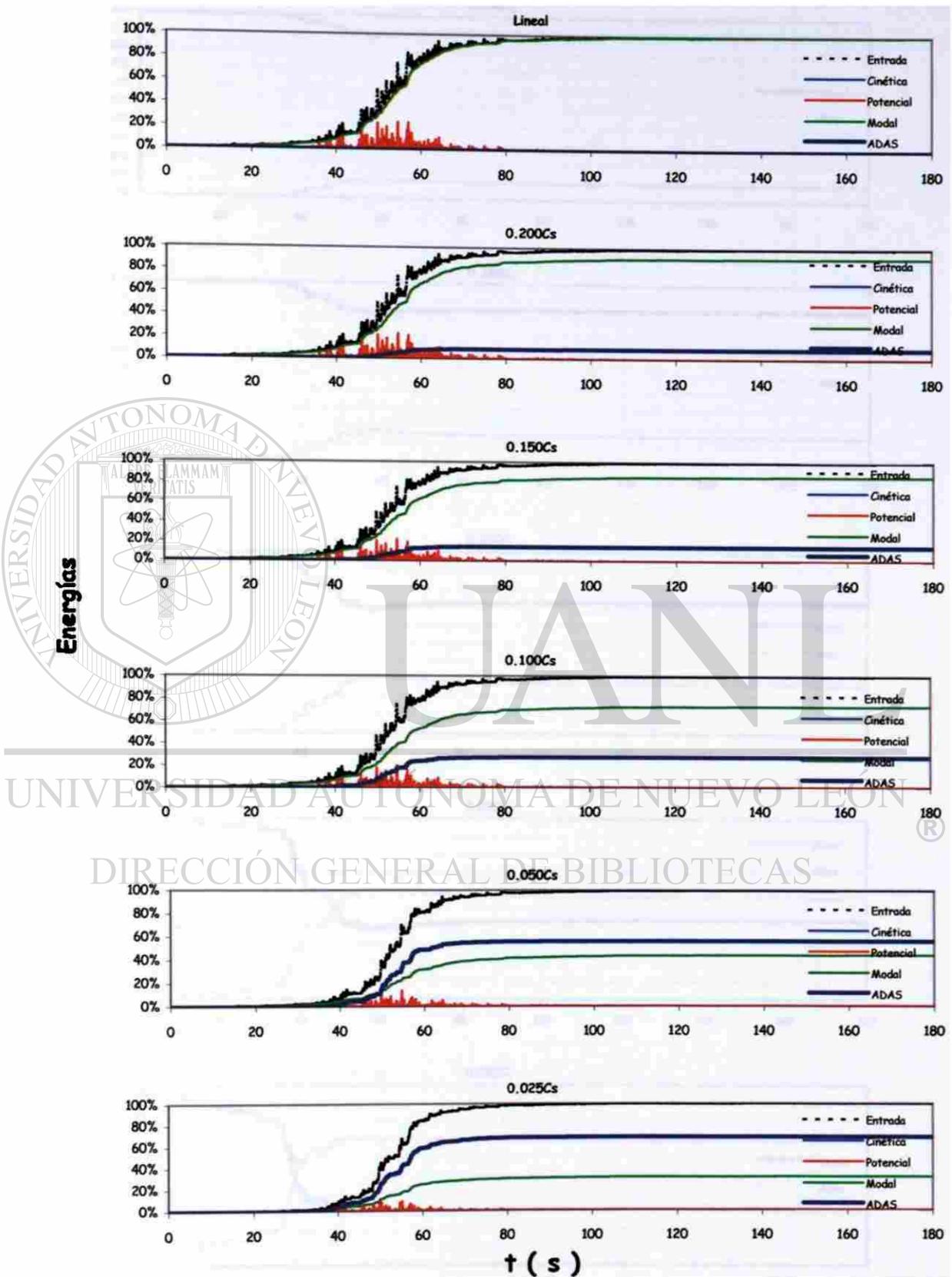


Fig. 6.56 Porcentajes de energías (CU `85 (E-W));  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Energías Disipadas ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

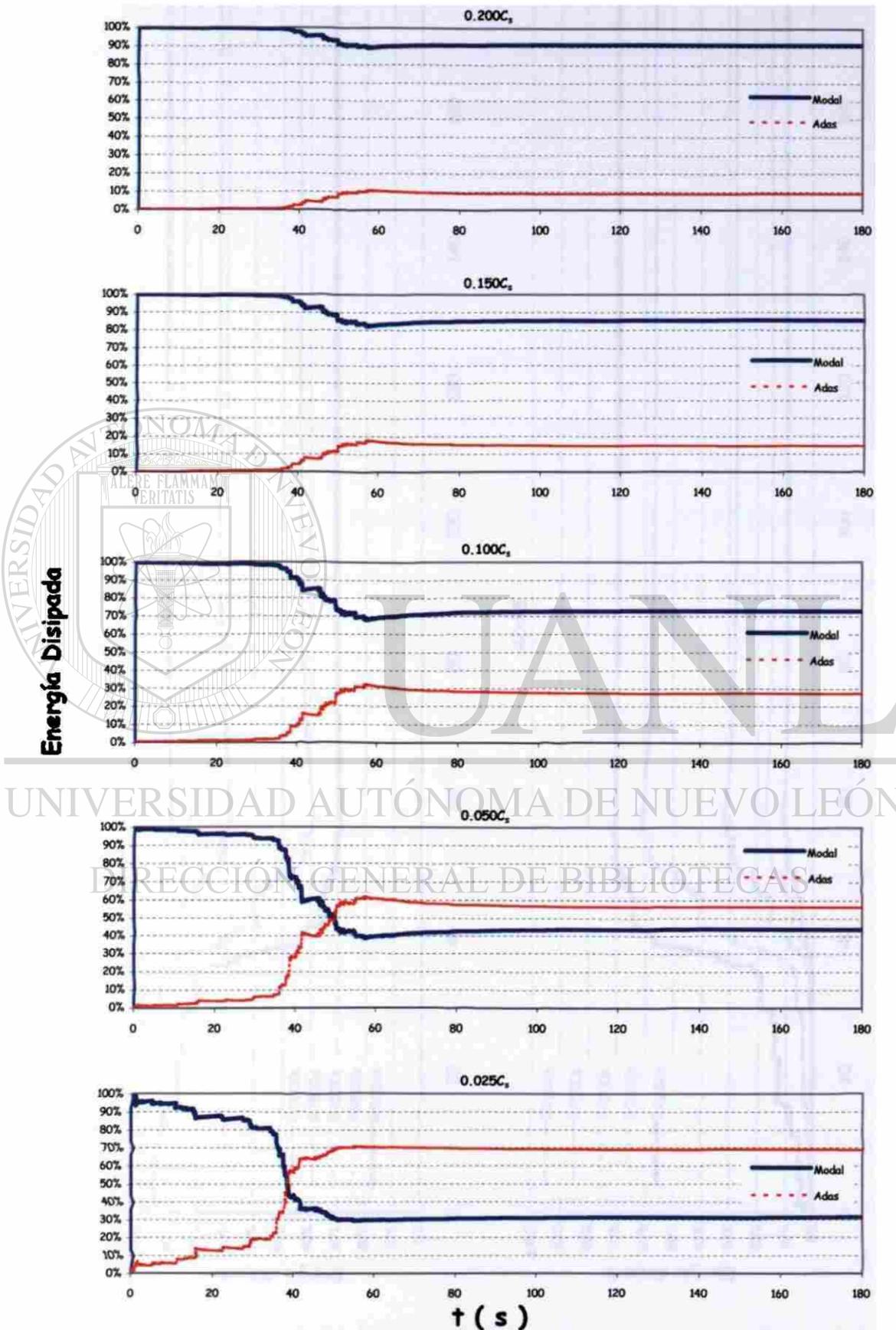


Fig. 6.57 Energías disipadas (CU '85 (E-W));  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Cuando los ADAS toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, la comparación de energías, presentada en la figura 6.55, muestra que existe una tendencia de que, a medida que el límite de fluencia de los disipadores es menor, mayor es la cantidad de energía que entra al sistema, sobresaliendo los umbrales de cedencia de  $0.025C_s$  y  $0.050C_s$ ; en especial, el menor umbral de cedencia, con el cual se obtiene que la energía que entra a ese sistema es más del doble de la energía que entra al sistema lineal. Algo parecido ocurre con el umbral de cedencia de  $0.050C_s$ , con el cual la energía que entra es 60 por ciento mayor que la que entra al sistema, con comportamiento lineal.

En las gráficas de energías presentadas en la figura 6.56, es posible notar que para ningún caso de límite de fluencia, la energía disipada por comportamiento histerético es mayor que la que se disipa por el amortiguamiento propio de la estructura. Esto se puede corroborar en la figura 6.57, la cual muestra los porcentajes de energía disipada y se observa que en ningún caso existe un cruce entre las energías que dé evidencia de que con esta proporción de rigideces se mejora el comportamiento del edificio, al agregarle disipadores histeréticos. La gráfica de la figura 6.58 muestra una comparación de las diferentes energías disipadas, Modal y ADAS. En este gráfico es posible apreciar que el límite de fluencia que mayor energía disipa por comportamiento histerético es el de  $0.025C_s$ ; sin embargo, con ese umbral y con el de  $0.050C_s$ , son a los que más energía entra, por ello es posible afirmar que, en cuestión de energías, es  $0.100C_s$  el umbral de cedencia que tiene una conducta en la cual se disipe más energía por los ADAS y menor por amortiguamiento modal.

## 6.7 Comportamiento histerético de los ADAS

Debido a que se busca que la mayor cantidad de energía disipada sea por comportamiento no-lineal y no por el amortiguamiento propio de la estructura, es necesario complementar la información de energías disipadas con el comportamiento histerético de los disipadores, ya que la conducta de los ADAS va de la mano con la energía que se disipa por este medio, es decir, a mayor energía disipada por histéresis, más amplios serán los ciclos histeréticos.

Para el análisis del comportamiento de los disipadores, que comparan los ciclos histeréticos de los disipadores de energía de cada nivel obtenidos para los diferentes umbrales de cedencia, en cada una de las curvas se indica la ductilidad del ADAS y vale la pena recordar que, según las pruebas de laboratorio hechas en la mesa vibradora, (Whittaker, et al., 1989), se encontraron que los ADAS pueden desarrollar ductilidades hasta de 14, aunque recomiendan que, para fines de diseño, se usen ductilidades de 10, ya que para este grado de deformación, las curvas de histéresis son estables y no muestran degradación en su resistencia.

Para el sismo de El Centro, las curvas histeréticas obtenidas para cada una de las proporciones de rigidez analizadas se presentan en las figuras: de la 6.59 a la 6.64 y para el sismo de CU, en las figuras de la 6.65 a la 6.70.

Comportamiento Histerético de los ADAS (El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

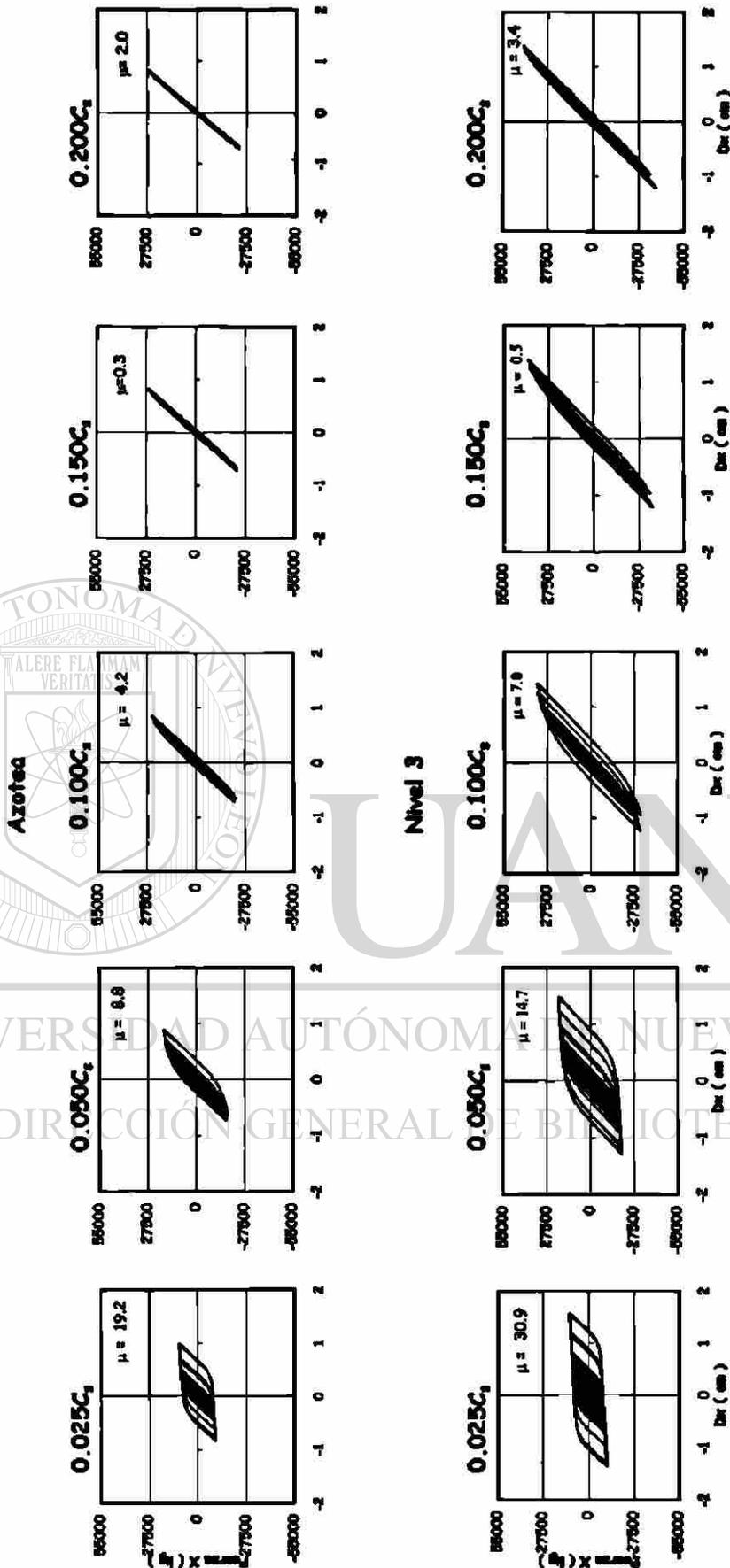


Fig. 6.59 Ciclos histeréticos en niveles superiores (El Centro); K<sub>ADAS</sub> = 25 %.

Comportamiento Histerético de los ADAS (El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

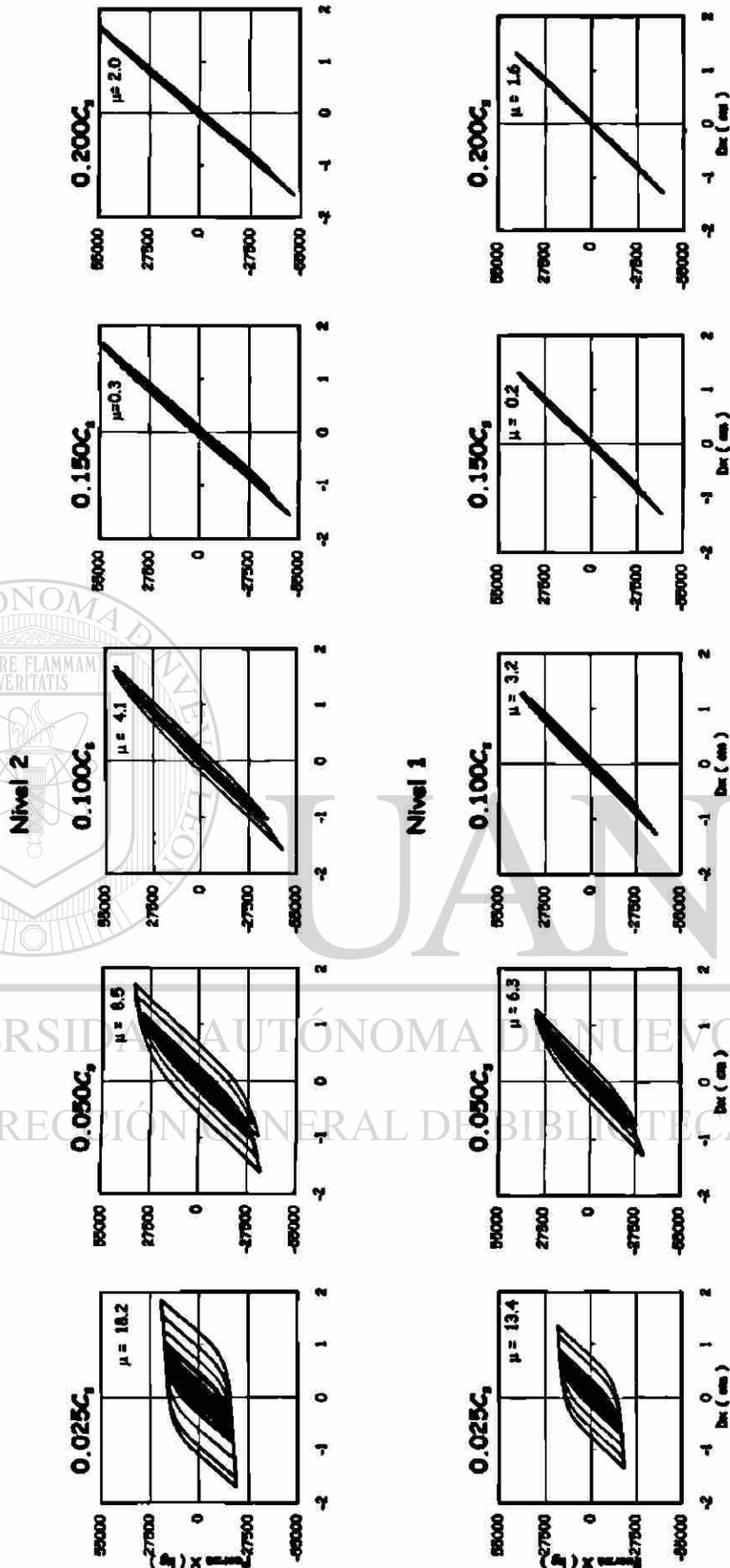


Fig. 6.60 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro);  $K_{ADAS} = 25\%$ .

Comportamiento Histerético de los ADAS ( El Centro)

Edificio de Cuatro Niveles

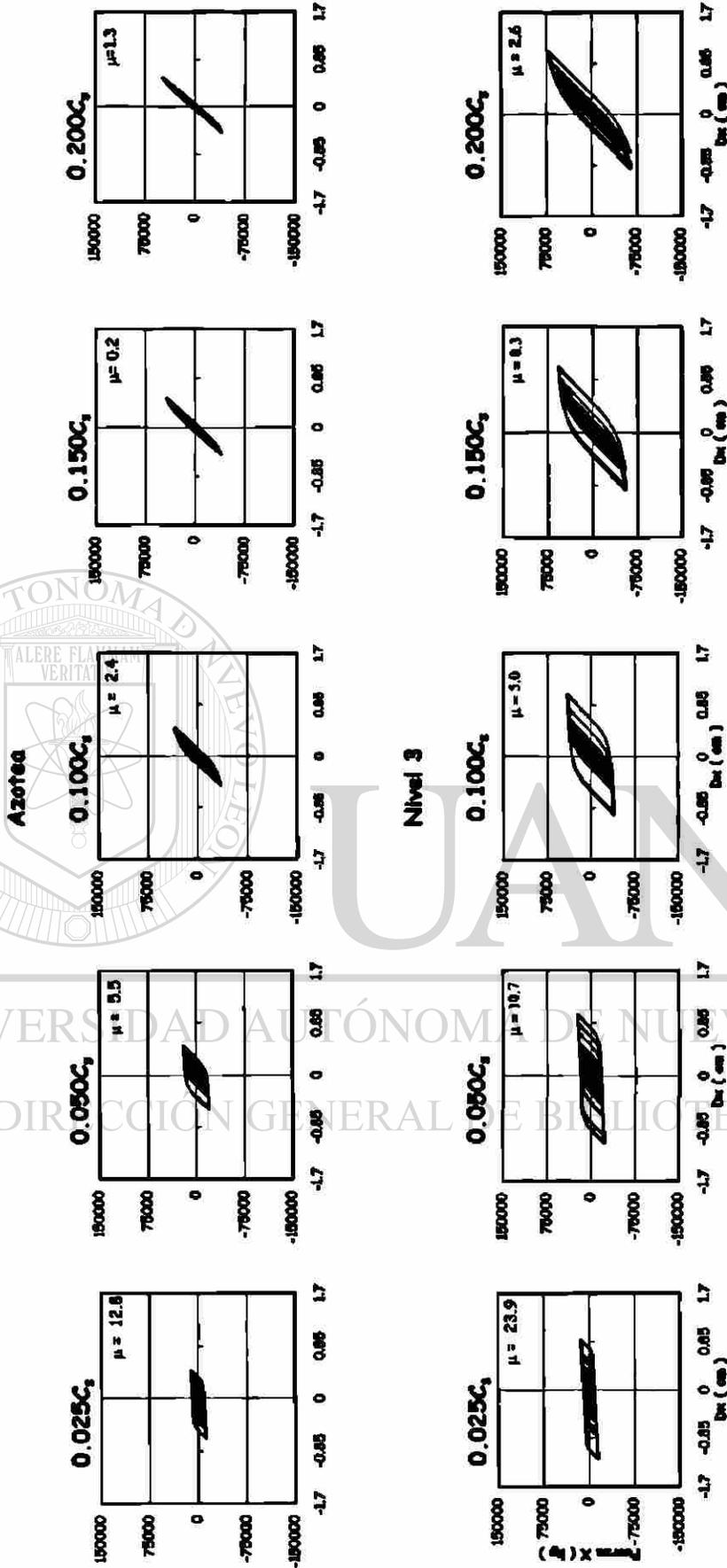
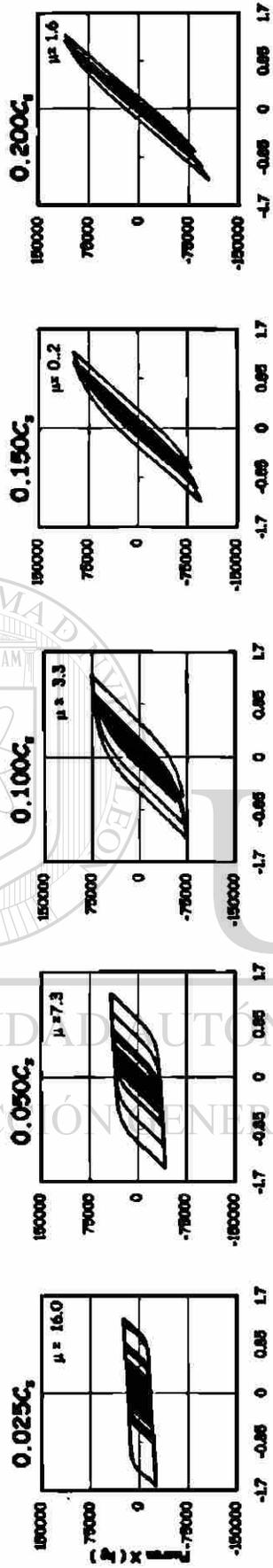


Fig. 6.61 Ciclos histeréticos en niveles superiores (El Centro);  $K_{ADAS} = 50\%$ .

Comportamiento Histerético de los ADAS ( El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

Nivel 2



Nivel 1

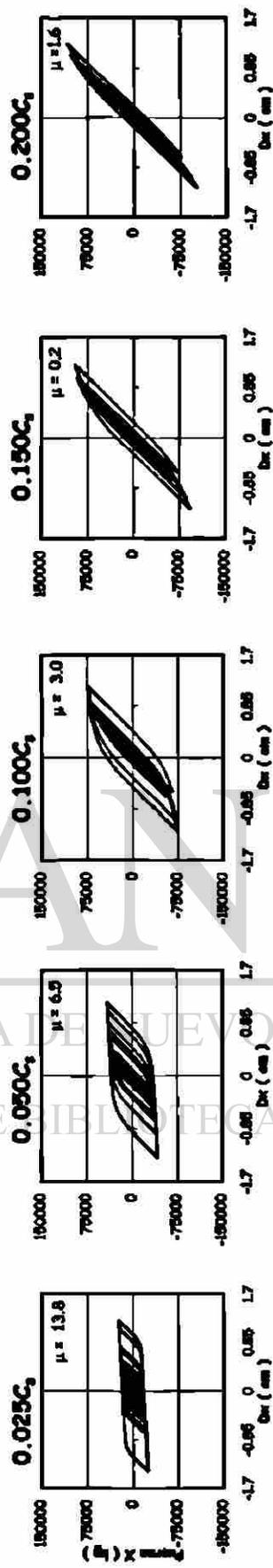


Fig. 6.62 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro);  $K_{ADAS} = 50\%$ .

Comportamiento Histerético de los ADAS ( El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

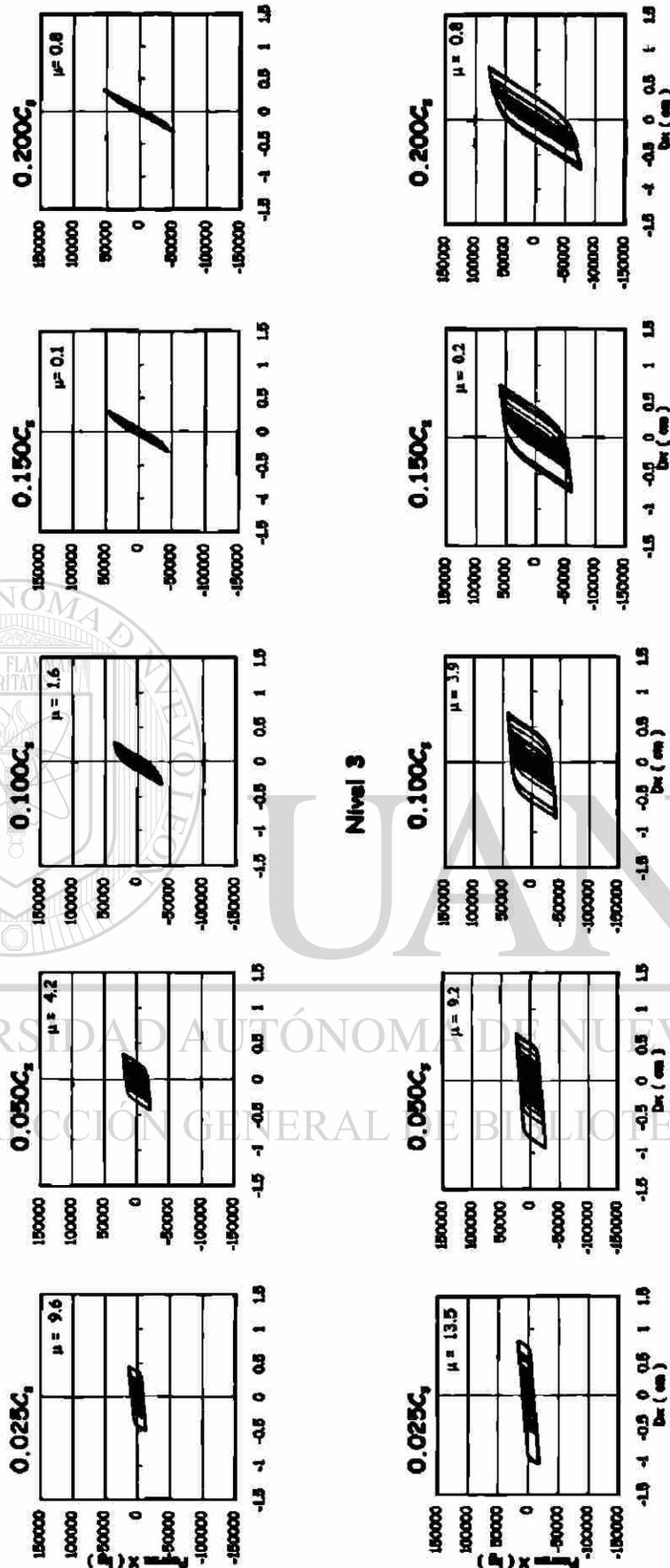
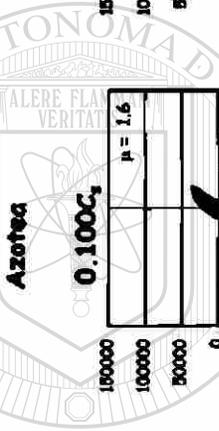


Fig. 6.63 Ciclos histeréticos en niveles superiores (El Centro);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Comportamiento Histerético de los ADAS (El Centro)  
Edificio de Cuatro Niveles

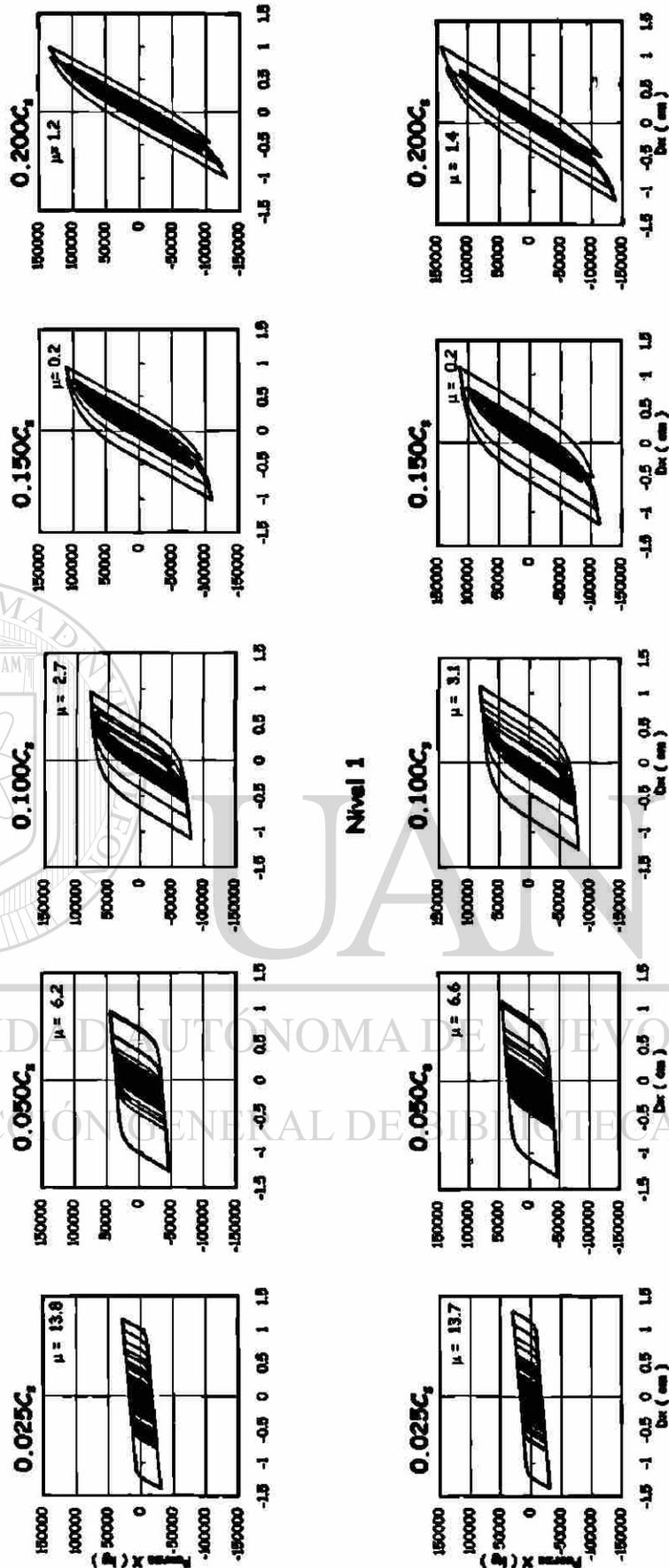


Fig. 6.64 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro);  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Para el caso en que los marcos toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, las curvas histeréticas de las figuras 6.59 y 6.60, muestran que el mayor trabajo realizado por los ADAS es en el nivel tres del edificio, luego en el dos, en el cuatro y, finalmente, en el uno. Según se aprecia en las figuras, a menor umbral de cedencia mayor ductilidad en los ADAS, sin embargo, el límite de fluencia de  $0.025C_s$ , presenta ductilidades mayores que las que realmente se pueden alcanzar en este tipo de dispositivos, por lo que con este umbral de cedencia no es posible físicamente conseguir las curvas histeréticas que se muestran en las gráficas. No así las del umbral de cedencia de  $0.050C_s$ , en el cual se presentan ductilidades cercanas a 15, las cuales sí pueden alcanzarse por los ADAS.

Cuando los marcos toman la mitad de la rigidez lateral, el nivel en el que se presenta más ductilidad es el nivel uno, según se aprecia en las figuras 6.61 y 6.62, ahora es únicamente el umbral de  $0.025C_s$ , el que manifiesta ductilidades mayores, que rebasan las que se pueden alcanzar físicamente, así que se alcanza el mejor comportamiento, con el umbral de cedencia de  $0.050C_s$ .

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En el caso en que los ADAS toman el 75 % de rigidez lateral, los lazos histeréticos se muestran más estables y en ningún momento se alcanzan ductilidades mayores que 14, según se aprecia en las figuras 6.63 y 6.64, de manera que, la mayor cantidad de energía disipada por histéresis se tiene cuando el límite de fluencia de los ADAS es  $0.025C_s$ . Se puede decir que todos los límites de fluencia presentan un comportamiento satisfactorio.

Comportamiento Histerético de los ADAS ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

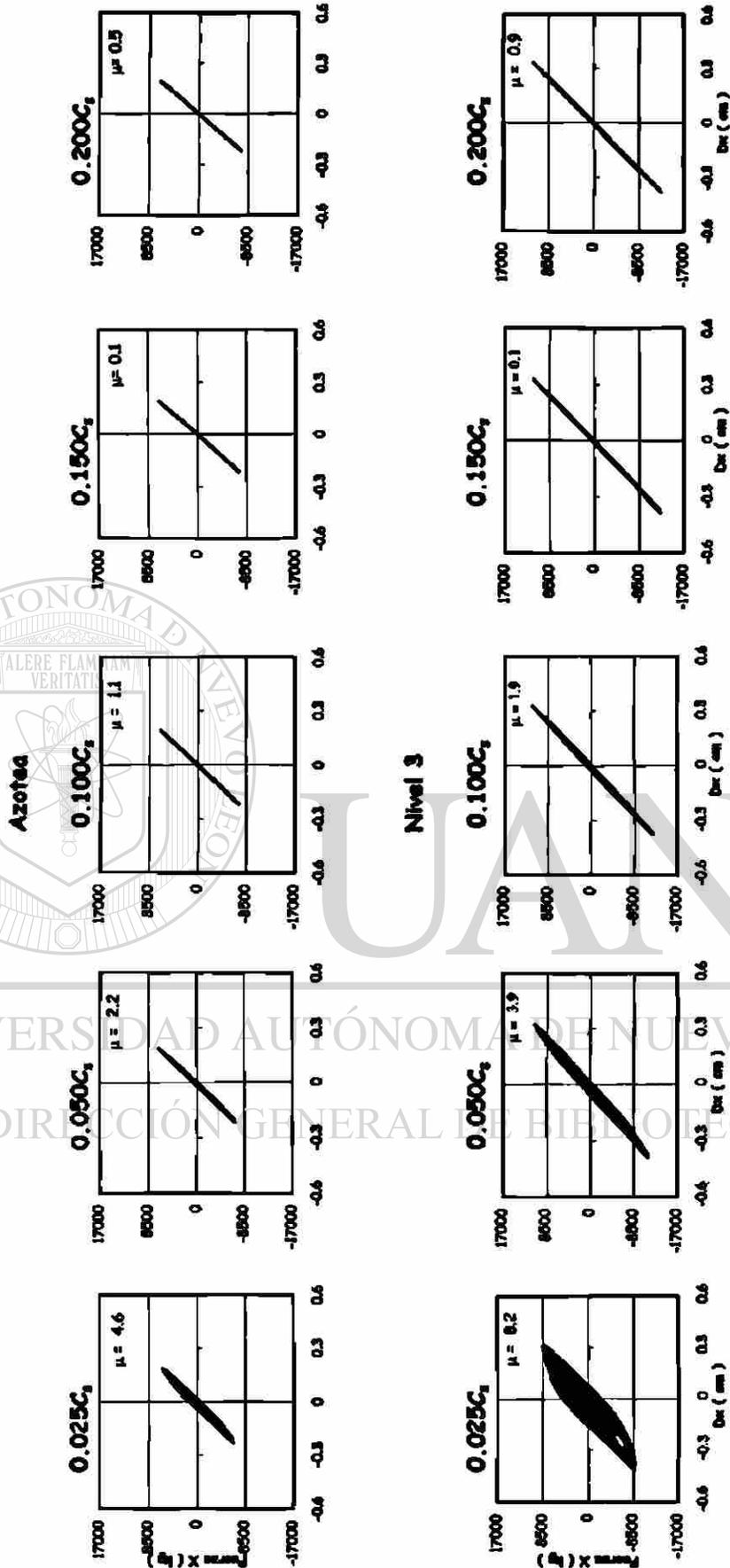


Fig. 6.65 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU '85(E-W));  $K_{ADAS} = 25\%$ .

Comportamiento Histerético de los ADAS (CU '85 E-W)  
Edificio de Cuatro Niveles

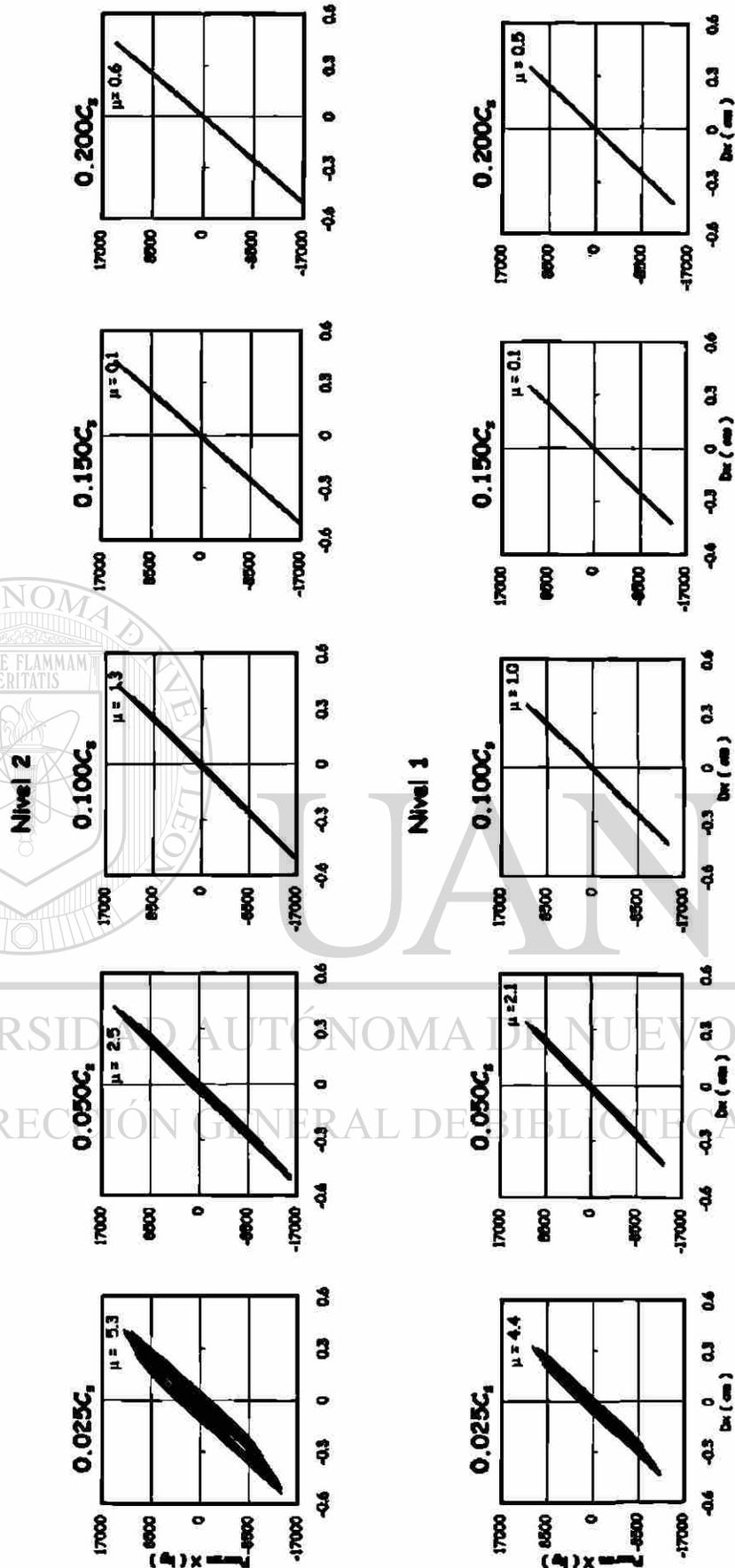


Fig. 6.66 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (CU '85(E-W)); K<sub>ADAS</sub> = 25 %).

Comportamiento Histerético de los ADAS ( CU '85 E-W )

Edificio de Cuatro Niveles

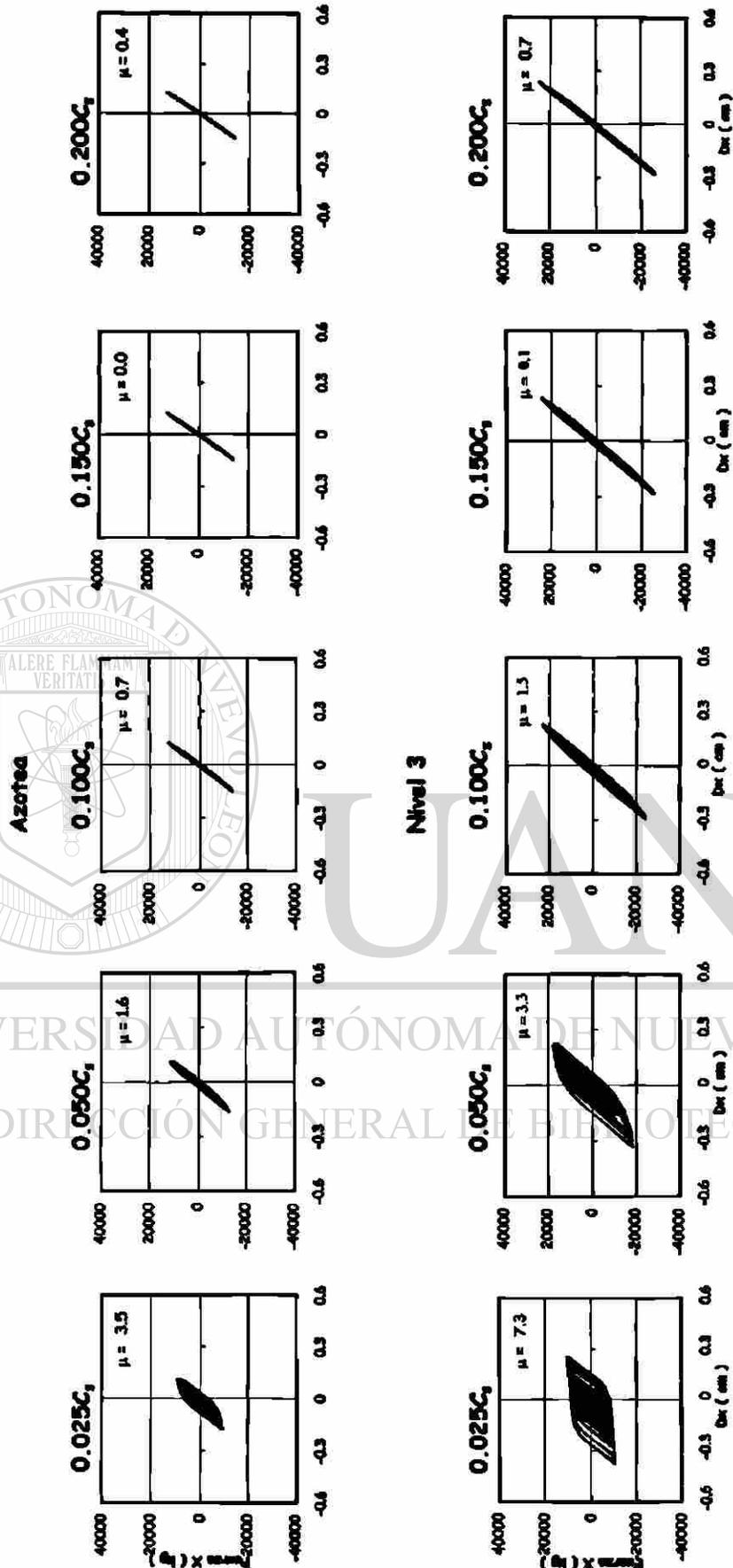


Fig. 6.67 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU '85(E-W));  $K_{ADAS} = 50\%$ .

Comportamiento Histerético de los ADAS ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

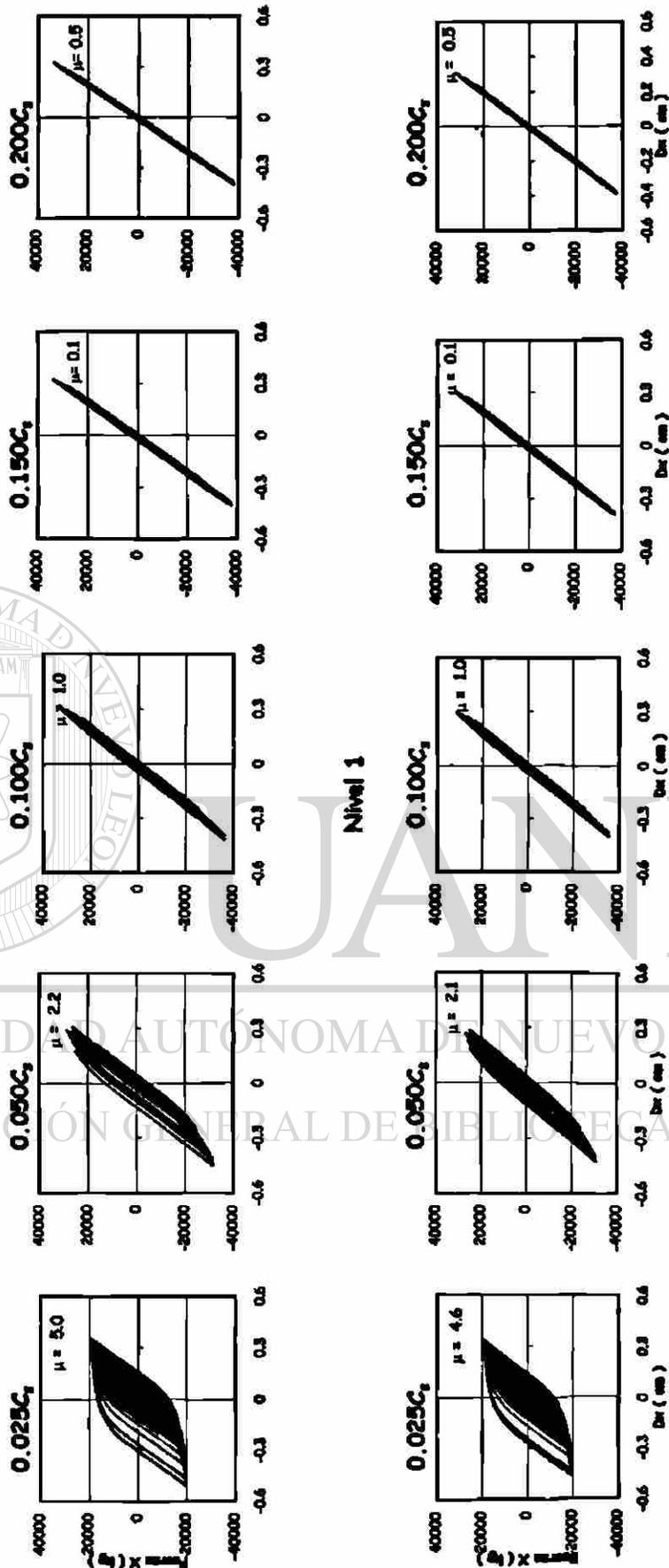


Fig. 6.68 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (CU '85(E-W));  $K_{ADAS} = 50\%$ .

Comportamiento Histerético de los ADAS ( CU '85 E-W )  
Edificio de Cuatro Niveles

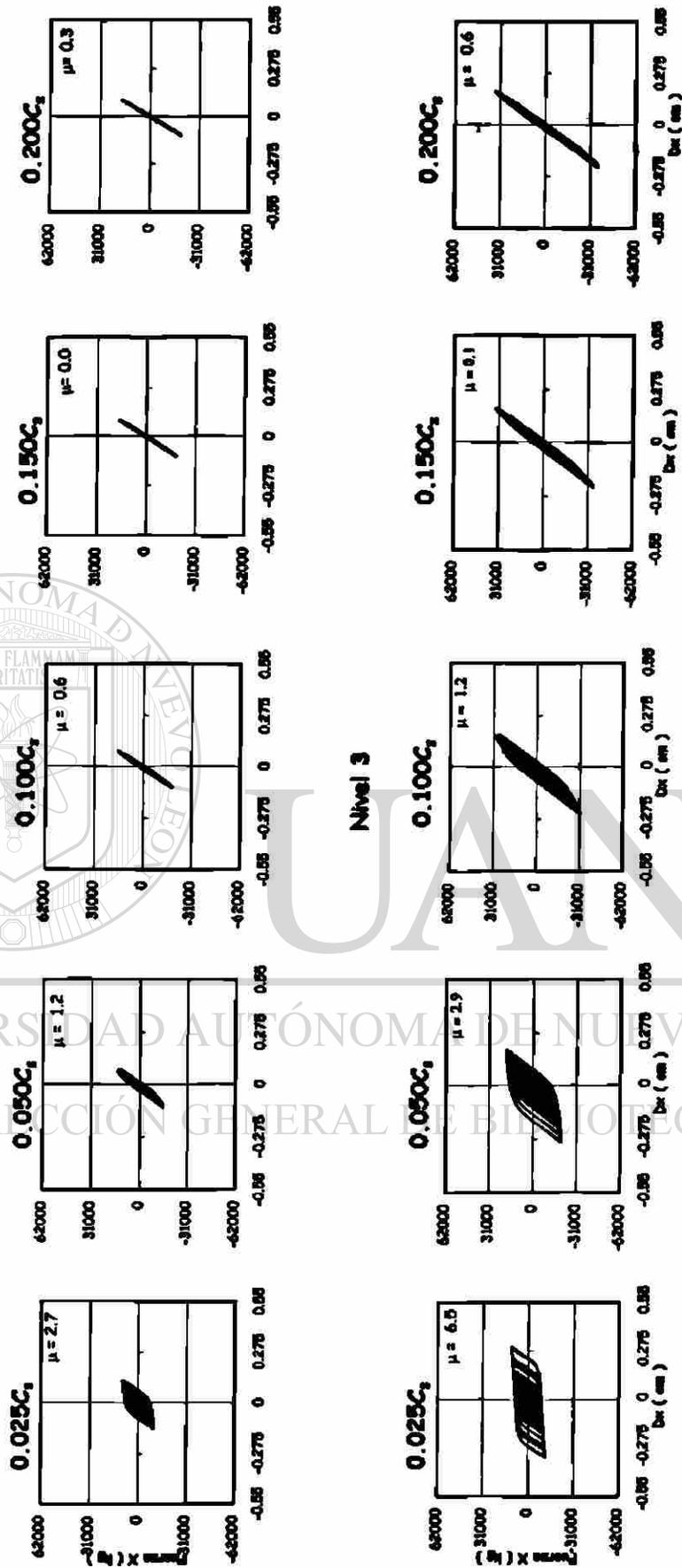
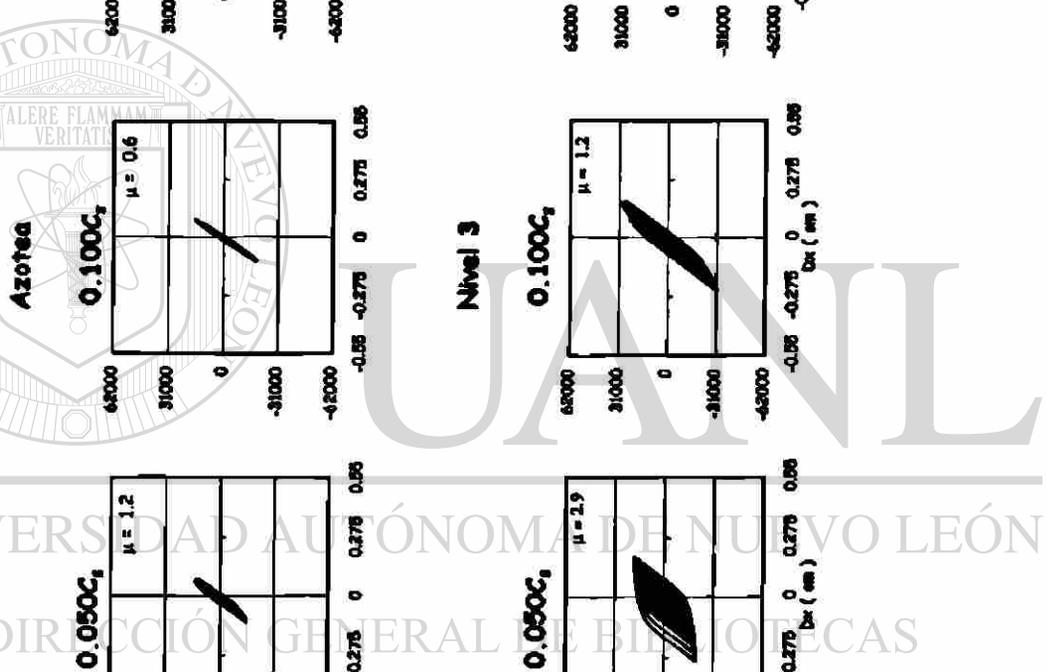


Fig. 6.69 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU '85(E-W)); K<sub>ADAS</sub> = 75 %.

Comportamiento Histerético de los ADAS ( CU '85 E-W )

Edificio de Cuatro Niveles

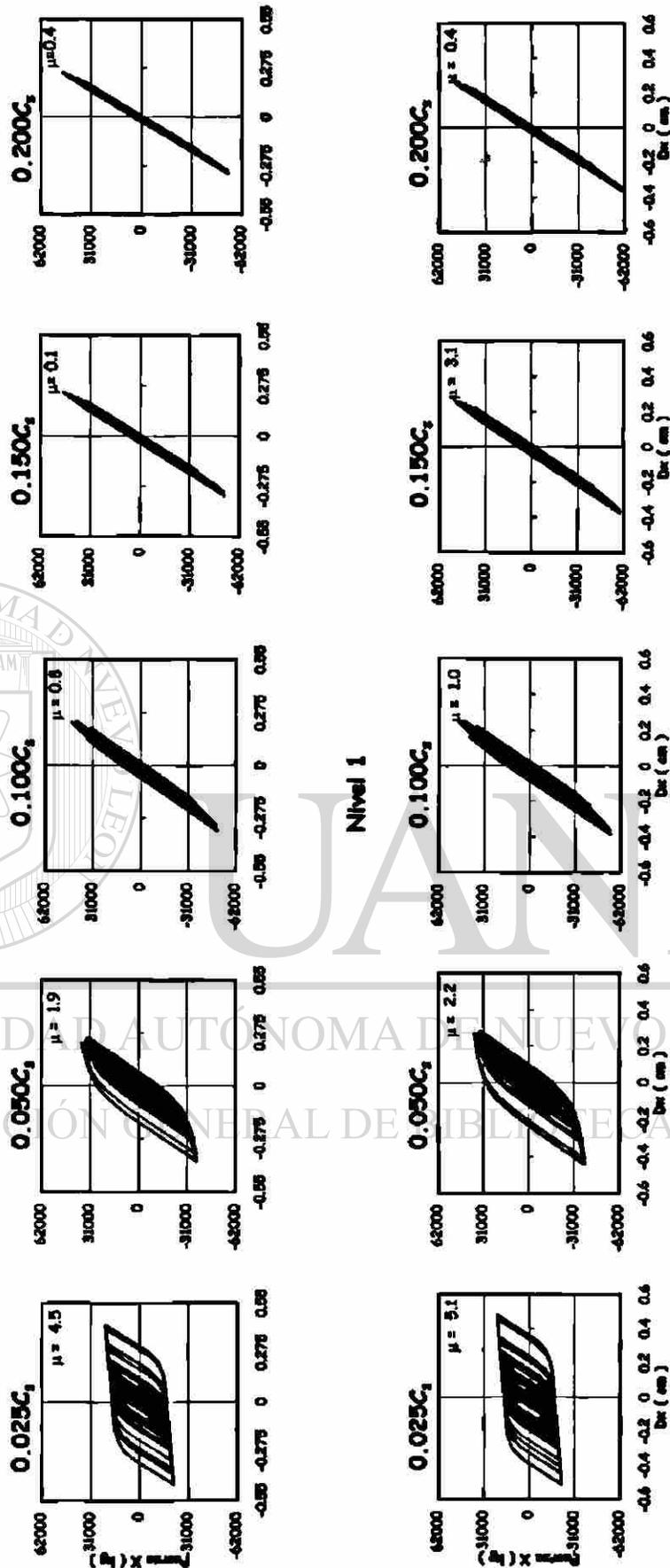


Fig. 6.70 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (CU '85(E-W));  $K_{ADAS} = 75\%$ .

Las curvas histeréticas de los disipadores, cuando el porcentaje de rigidez lateral tomada por los ADAS es igual al 25 por ciento, se aprecian en las figuras 6.65 y 6.66, en las que se observa que sólo para los dos umbrales de cedencia más bajos se desarrollan ductilidades de más de dos, en los dispositivos histeréticos, así que puede decirse que los otros umbrales de cedencia no se comportan de una manera deseable para conseguir que se disipe energía por comportamiento no-lineal. Según lo visto en cuestión de energías, es posible afirmar que, para esta proporción de rigideces, el mejor comportamiento se obtiene con el umbral de cedencia más bajo, que es  $0.025C_s$ .

Si se analizan las figuras 6.67 y 6.68, en las cuales se presentan las curvas histeréticas del caso en que los marcos toman la mitad de la rigidez lateral, es posible notar que las mayores ductilidades se presentan en el nivel inferior, sin embargo para los tres umbrales de cedencia mayor, las ductilidades alcanzadas no son de más de uno, es decir, que los disipadores se comportan linealmente y la energía que se consigue disipar por comportamiento histerético no es la suficiente como para considerar el empleo de estos dispositivos en el edificio, el límite de fluencia con mayor disipación de energía por los ADAS es el de  $0.025C_s$ , pero, hay que recordar que este umbral de cedencia tiene la particularidad de que la energía que entra al sistema, comparada con el lineal, es dos veces mayor; aunque, según lo observado en cuestión de energías disipadas, para este caso se presenta la menor cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal, así que, si bien es cierto que entra más energía al sistema, esta energía que entra se disipa por comportamiento histerético y no

por el amortiguamiento propio de la estructura, por lo que es posible afirmar que es precisamente con este umbral de cedencia que se tiene un mejor comportamiento del edificio en caso de sismo.

Los lazos histeréticos que muestran el comportamiento de los ADAS, cuando los dispositivos disipadores toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, se aprecian en las figuras 6.69 y 6.70, las que muestran que únicamente los dos umbrales de cedencia más bajos presentan ductilidades, y que éstas no son mayores que 7, en ningún nivel. Lo que puede traducirse como un comportamiento deseable para los dispositivos disipadores de energía. Sin embargo, cabe mencionar que, según lo observado en cuestión de energías, es precisamente con estos dos límites de fluencia de los disipadores que se obtiene una mayor cantidad de energía de entrada al sistema y que, de acuerdo con lo observado en energías disipadas por amortiguamiento modal, también son estos dos umbrales de cedencia los que más energía disiparon de esa forma; además de que, en ningún momento, el porcentaje de energía disipada por histéresis es más del 30 por ciento, lo que hace suponer que el empleo de disipadores no es conveniente en esta estructura.

### **6.8 Análisis general de la respuesta**

En este apartado se pretende, sin llegar a establecer conclusiones definitivas, redondear lo observado en el comportamiento del edificio para sus diferentes proporciones de rigidez lateral y umbrales de cedencia para cada uno de los sismos estudiados.

En el caso del sismo del Centro, el mejor comportamiento para el caso en que el marco toma el mayor porcentaje de rigidez lateral, de acuerdo con lo observado para cada uno de los parámetros de comportamiento estudiados, es posible afirmar que el mejor comportamiento se obtiene cuando el umbral de cedencia es  $0.050C_s$ , ya que, a pesar de que la energía de entrada es mayor, es también mayor la cantidad de energía que se disipa por comportamiento histerético. Los desplazamientos no varían en más del 6 por ciento y en cortantes tanto para valores absolutos como valores en rms, los valores reportados son menores que los que se obtuvieron para el caso lineal.

Aunque los ADAS no disipan más del 30 por ciento de la energía de entrada, las ductilidades que estos presentan no exceden de 15, que puede considerarse que están dentro de los límites que se han observado en pruebas experimentales (Whittaker, *et. al.* 1989), caso que no pasa cuando el umbral de cedencia es  $0.025C_s$ , ya que entonces, según el análisis, éstas alcanzan valores de hasta 31.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cabe mencionar que para ninguno de los casos estudiados los desplazamientos relativos obtenidos excedieron de 0.006, valor límite sugerido para evitar daños a la estructura según los códigos vigentes en nuestro país, entre ellos el Reglamento del Distrito Federal. (RCDDF, 1993)

En el caso en que la rigidez lateral que proporcionan los ADAS sea igual al 50 por ciento de la rigidez total, el mejor comportamiento se tiene cuando el umbral de cedencia es de  $0.050C_s$ . Es en este caso cuando más energía se

disipa por comportamiento histerético y los ciclos histeréticos para los ADAS alcanzan ductilidades no mayores que 11, que se toma como un comportamiento adecuado para los disipadores.

El desplazamiento absoluto máximo, pico a pico, no es mayor que el 7 por ciento del lineal, y en rms, este límite de fluencia presenta el menor de los desplazamientos; algo parecido pasa con los cortantes, si bien, es para  $0.100C_s$ , que se obtiene el menor cortante pico a pico. Si se observa el comportamiento general de la historia, puede decirse que éste es satisfactorio.

Cuando son los disipadores histeréticos los que proporcionan el mayor porcentaje de rigidez lateral del edificio, es posible afirmar que el mejor comportamiento se obtiene cuando el umbral de cedencia es  $0.050C_s$ , ya que la diferencia en energías disipadas por los ADAS no es mucha comparada contra la del umbral de cedencia menor; además, la ductilidad mayor obtenida no es más grande que 10, cosa que no pasa con el menor nivel de fluencia; así mismo, es para este caso que se presenta el menor desplazamiento observado en rms y en valores pico, el incremento con respecto al lineal, no es más del 18 por ciento.

En cuestión de cortantes, la historia muestra que el comportamiento global del edificio es satisfactorio, ya que no se presentan tantas crestas como para el umbral de cedencia menor.

En el caso del sismo de CU, de acuerdo con lo observado, para el caso en que los marcos toman el 75 por ciento de la rigidez lateral, es posible afirmar que el mejor comportamiento de la estructura se obtiene cuando el umbral de cedencia de los disipadores es  $0.025C_s$ ; ya que, a pesar de que es mayor la cantidad de energía que entra al sistema, al compararlo con el lineal, también es el caso que menor cantidad se disipa por amortiguamiento modal y más energía se disipa por comportamiento histerético, lo que puede traducirse en menor daño a los elementos estructurales. De la mano con esta afirmación, está el hecho de que los desplazamientos absolutos, en valores pico, no se incrementan en más del 7 por ciento, al compararse con el comportamiento lineal, y que para los desplazamientos relativos, tanto en valores pico como en rms, no se observan cambios con respecto al comportamiento que presenta el modelo elástico.

Las ductilidades de los disipadores no son mayores que 9, lo que hace evidente que los disipadores están trabajando en el nivel recomendado.

En el caso en que la proporción de rigideces tomada por los marcos es la misma que toman los disipadores, es posible aseverar que el mejor comportamiento se obtiene para el límite de fluencia de  $0.025C_s$  y que, si bien es cierto que según se aprecia en las gráficas de energía, es el sistema al que más energía entra, también es el que tiene menos energía disipada por amortiguamiento modal y, al mismo tiempo, es el que mayor porcentaje de energía disipa por comportamiento histerético.

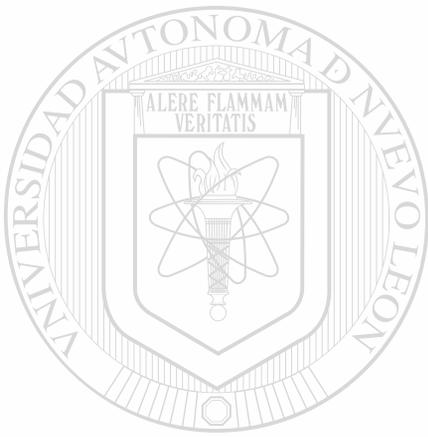
Las curvas histeréticas de los disipadores muestran evidencias de que en ningún momento, la ductilidad alcanzada por los ADAS es mayor que 8, ductilidad que es posible alcanzar en una estructura real.

En lo que concierne a los desplazamientos, los valores absolutos, pico a pico, no tienen incrementos del 28 por ciento, con respecto al lineal y los valores en rms no muestran más que un incremento del 4 por ciento. Los desplazamientos relativos son prácticamente los mismos, así que, debido a que esta estructura disipa más energía por comportamiento histerético y menos por el amortiguamiento propio de la estructura, comparándola con la lineal, es posible afirmar que tendrá menos daño estructural que la elástica, al ser sometida a un sismo de las características del de análisis.

En cuanto al caso en que la mayoría de la rigidez lateral es proporcionada por los ADAS, la mejor respuesta se presenta con un umbral de cedencia de  $0.050C_s$ , debido a que, a pesar de que a este edificio entra más energía que al caso elástico, la energía disipada por amortiguamiento modal es menor y la energía disipada por histéresis es mucho mayor para el caso no lineal que para el lineal.

Al evaluar los porcentajes de energía disipada, este umbral de cedencia disipa alrededor del 60 por ciento de la energía total disipada por comportamiento no lineal de los ADAS y se observa que las ductilidades obtenidas para los dispositivos histeréticos no son mayores que 3.

Los cortantes en rms no se incrementan más del cuatro por ciento, comparado contra el caso lineal y los desplazamientos que se obtienen para el caso no lineal, en valores pico, se incrementan en un 47 por ciento; pero los valores en rms son prácticamente iguales, por lo que se puede decir que son más los beneficios obtenidos que los perjuicios que pudieran obtenerse, al adicionar mecanismos disipadores de energía al edificio.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## CAPÍTULO 7

### INFLUENCIA DE LOS DISPOSITIVOS EN EDIFICIOS DE PERIODO LARGO

En este capítulo se trata el segundo caso teórico de estudio, el cual consiste en un edificio de veinte niveles. En este edificio, en particular, sólo se ensaya la proporción de rigidez lateral, tal que los marcos contribuyen con el 25 por ciento y los dispositivos disipadores con el 75 por ciento restante. Ahora el objetivo es evaluar la influencia que estos mecanismos tienen en un edificio de periodo relativamente largo, ante la influencia de la componente Este-Oeste del acelerograma del sismo de Michoacán, ocurrido en 1985 y registrado en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT '85).

#### 7.1 Descripción del edificio

Este edificio consta de veinte niveles con una altura de entrepiso de 3 m, las dimensiones en planta son: 19 m, en la dirección "X" y 16 m, en la dirección "Y"; lo que da un área de 304 m<sup>2</sup>. La estructura está formada por cuatro marcos, cada uno de tres claros, conectados a momento, de perfiles de acero estructural A-36 en la dirección del análisis y cuatro marcos, de tres claros también, en la dirección perpendicular, estos marcos al igual que los principales, están formados por acero A-36, pero conectados únicamente a cortante. Todos los marcos están constituidos por vigas y columnas del tipo IPR.

En la dirección del análisis, la dirección "X", se colocan los dispositivos disipadores en cada uno de los tres claros de los marcos exteriores. Los ADAS se localizan montados sobre contravientos del tipo chevrón, para garantizar su mejor funcionamiento. En la dirección perpendicular a la dirección del análisis, la dirección "Y", también en el claro central que corresponde al claro de mayor longitud (6 m), se colocan contravientos sin disipadores; en este caso del tipo cruz, cuyo fin es darle rigidez lateral al edificio en esa dirección. Ya se ha explicado antes que en este trabajo, y con el único fin de controlar las variables se colocan disipadores en una sola dirección.

El sistema de piso lo constituye una losa de concreto de 20 cm; pues se considera que este espesor da a la losa suficiente rigidez en su plano, como para aplicar la hipótesis del diafragma rígido. Una vista tridimensional del edificio se muestra en la figura 7.1.

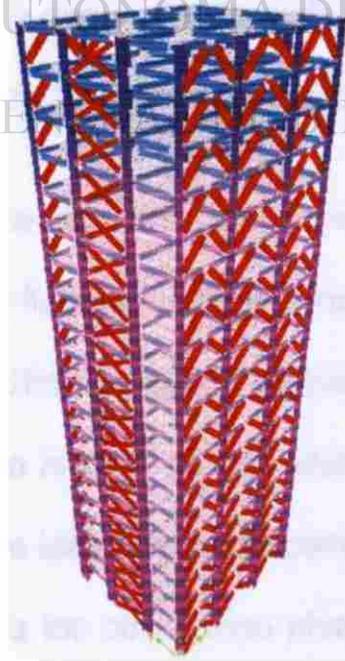
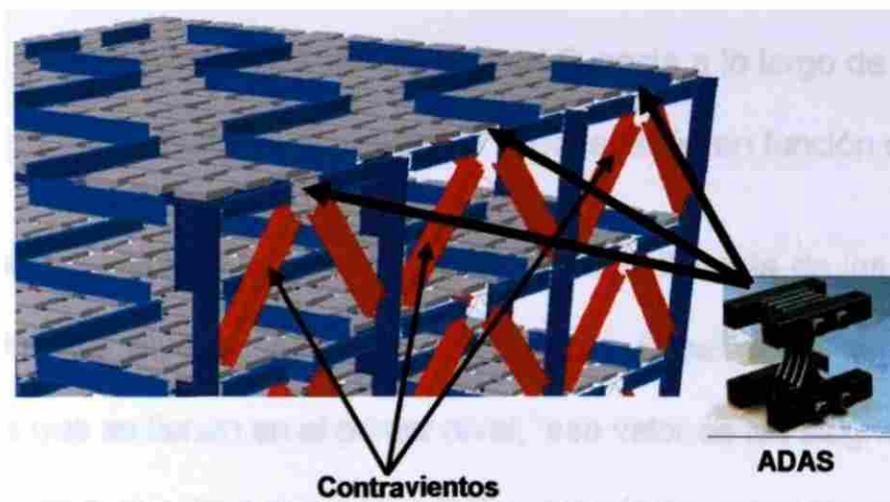


Fig. 7.1 Edificio de veinte niveles.

Un detalle de la conexión entre las diagonales y el ADAS se muestra en la figura 7.2.



**Fig. 7.2** Detalle de localización de los ADAS.

En este edificio, como ya se mencionó con anterioridad, se estudia únicamente la proporción de rigidez lateral tal que los dispositivos ADAS toman el 75 % de esta y los marcos toman el otro 25 por ciento. En este caso, el periodo natural del edificio en la dirección de análisis es 2 segundos. La carga total, es decir, incluyendo el peso propio y la carga viva de cada nivel es  $W = 900 \text{ Kg/m}^2$ . Con esta carga se calcula el peso y las masas correspondientes a cada nivel.

En este caso, se considera que los dispositivos disipadores tienen cuatro diferentes pendientes post-fluencia, dependiendo del nivel en el que se encuentren. Se dividió al edificio en cuatro bloques, cada uno de cinco niveles; así, para los primeros cinco niveles, se consideró una pendiente igual al 100 por ciento del cortante que le toca a cada disipador, referido como una fracción del coeficiente sísmico; para los otros cinco niveles, un 75 por ciento y así, hasta los últimos cinco niveles, en los cuales los disipadores tiene una

pendiente después de la fluencia del 25 por ciento de los ADAS de los primeros cinco niveles.

La idea de asignar diferentes pendientes post-fluencia a lo largo de la altura del edificio es porque el cortante de entrepiso varía también en función de la altura.

Para calcular el valor de la pendiente posterior a la fluencia de los dispositivos de los primeros niveles, se divide el cortante basal entre el número de disipadores que se tienen en el primer nivel; ese valor se les asigna a los cinco primeros niveles, mientras que a los niveles superiores, como ya se dijo, se les asigna un porcentaje de la rigidez de los del primer nivel, dependiendo de la altura a la que se encuentren. Es importante aclarar que la rigidez inicial de todos los disipadores es la misma para el rango elástico, la única pendiente que se varía es la pendiente post-fluencia.

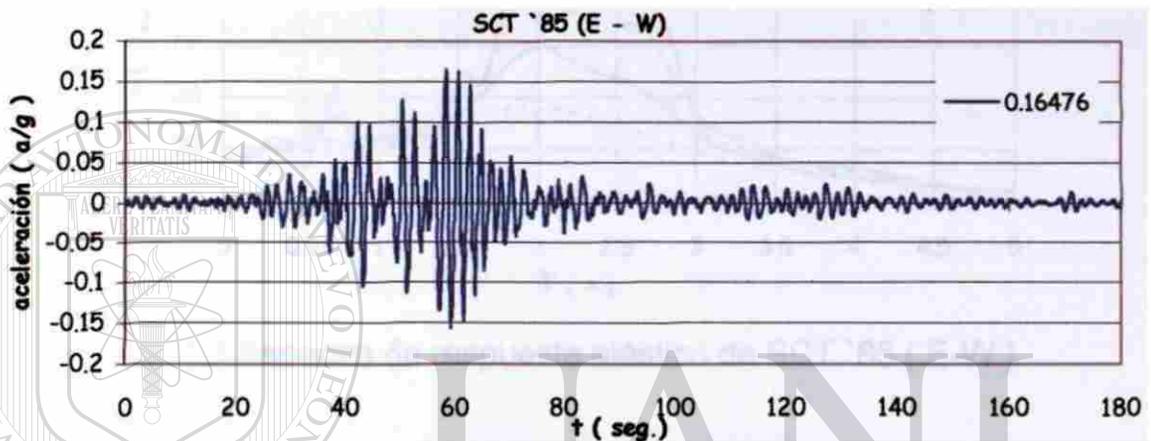
---

## 7.2 Acelerogramas de análisis

Esta estructura se somete a la componente E-W del acelerograma de SCT, del sismo del 19 de Septiembre de 1985. Este acelerograma se registró en una zona de terreno blando y tiene un periodo dominante de dos segundos, así que, como el edificio tiene también un periodo inicial de dos segundos; se busca estudiar la influencia de los disipadores cuando el periodo de excitación es cercano al periodo natural de vibración, fenómeno conocido como *resonancia*.

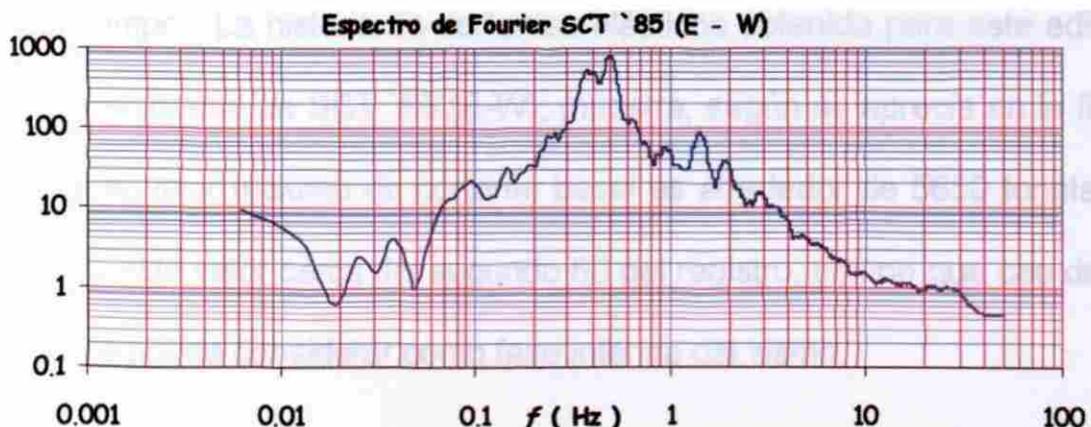
### 7.2.1 Acelerograma de SCT '85

El registro de aceleraciones que tiene la componente E-W del sismo de SCT, tiene una duración aproximada de 180 segundos, con una aceleración máxima registrada de 0.16 g. El acelerograma presenta una marcada fase intensa de alrededor de 40 segundos, en donde se presentan los valores máximos de aceleración. El acelerograma de este sismo se puede ver en la figura 7.3.



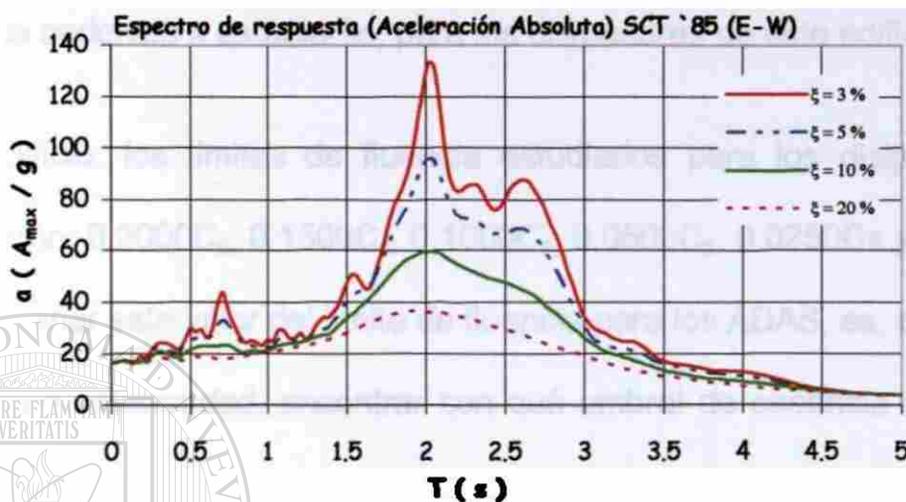
**Fig. 7.3** Acelerograma del sismo de SCT '85 ( E-W ).

En el espectro de Fourier se observa que el contenido de frecuencias es amplio; no obstante, las aceleraciones máximas se localizan cerca de los 0.5Hz. (figura 7.4)



**Fig. 7.4** Espectro de Fourier de SCT '85 ( E-W ).

El espectro de respuesta elástico de este sismo pone en evidencia que existe un pico perfectamente localizado, cercano a los dos segundos. En la figura 7.5 se aprecia el espectro de respuesta para diferentes porcentajes de amortiguamiento.



**Fig. 7.5** Espectro de respuesta elástico de SCT '85 ( E-W ).

### 7.3 Coeficiente sísmico ( $C_s$ )

Los cortantes en la base se asocian comúnmente al daño de los edificios, ya que este cortante es la suma de las fuerzas de inercia que actúan en cada nivel; de ahí la importancia de conocer la variación que este parámetro tiene, a lo largo del tiempo. La historia de cortantes elásticos obtenida para este edificio, con el acelerograma de SCT '85 (E-W), muestra, según se aprecia en la figura 7.6 a, que el valor máximo de cortante basal es alrededor de 5650 toneladas, alcanzando este valor cerca del segundo 60 del registro, tiempo que cae dentro de lo que se puede considerar como fase intensa del sismo.

La historia de coeficientes sísmicos, que corresponden con la historia de cortantes elásticos de la figura 7.6 a, muestra que el valor máximo que éste alcanza está cercano a 0.74. Esto se aprecia en la figura 7.6 b.

Es a partir de este valor del coeficiente sísmico que se eligen los diferentes umbrales de cedencia a estudiarse, para los disipadores de este edificio.

En este edificio, los límites de fluencia estudiados para los disipadores de energía fueron:  $0.2000C_s$ ,  $0.1500C_s$ ,  $0.1000C_s$ ,  $0.0500C_s$ ,  $0.0250C_s$  y  $0.0125C_s$ .

La idea de variar este valor del límite de fluencia para los ADAS, es, como ya se mencionó con anterioridad, encontrar con qué umbral de cedencia es que se obtiene el mejor comportamiento del edificio durante un sismo.

#### 7.4 Cortantes en la base

Para evaluar la influencia que tienen los dispositivos histeréticos en el edificio, una vez hecho el análisis para cada uno de los umbrales de cedencia escogidos, se grafica la historia de cortante en la base para cada uno de ellos, comparando la repuesta obtenida en cada caso inelástico con el caso lineal. A partir de esta comparación de historias, según se aprecia en la figura 7.7, es que se obtienen los valores máximos, pico a pico, y en rms.

Cortante en la Base y Coeficiente Sísmico ( SCT `85 E-W )

Edificio de Veinte Niveles

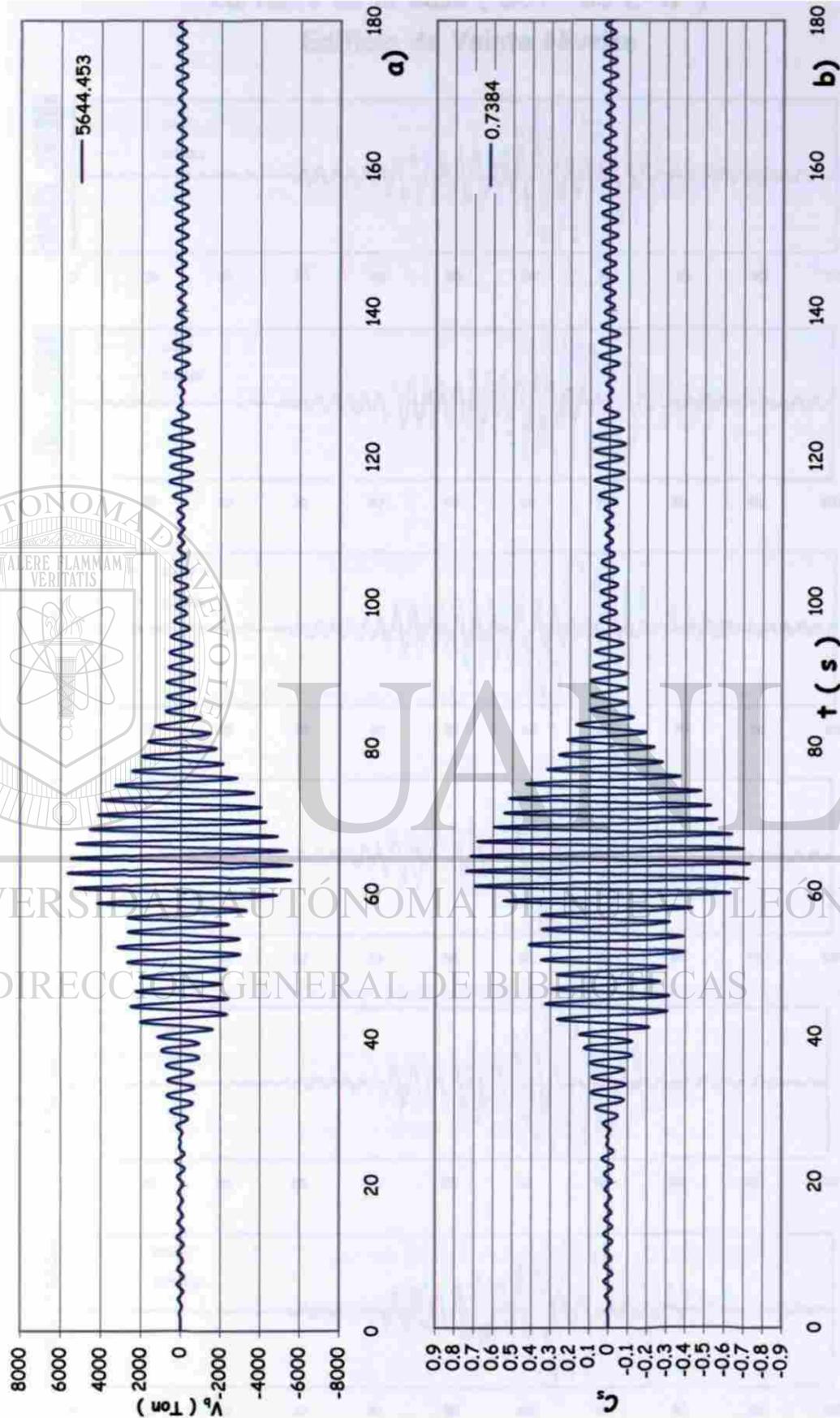
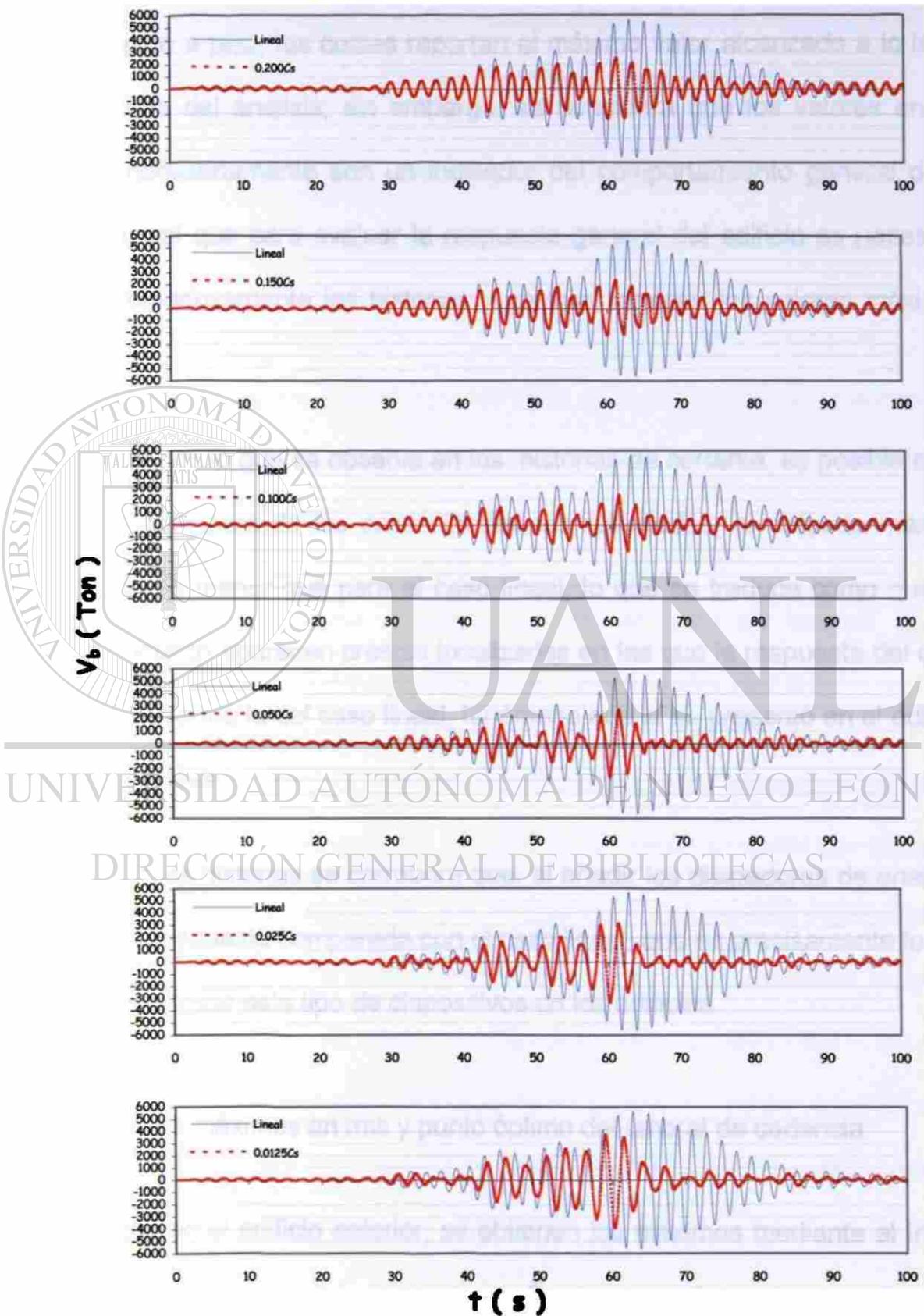


Fig. 7.6 Cortante en la base y Coeficiente sísmico (SCT `85 (E-W)).

**Cortante en la Base ( SCT `85 E-W )**  
**Edificio de Veinte Niveles**



**Fig. 7.7** Historia de cortantes en la base (SCT `85 (E-W)).

#### 7.4.1 Valores máximos, pico a pico

De cada una de las historias de cortante en la base se obtienen los valores máximos pico a pico, los cuales reportan el máximo valor alcanzado a lo largo de la historia del análisis; sin embargo, se considera que los valores en los picos no necesariamente son un indicador del comportamiento general de la estructura, así que para evaluar la respuesta general del edificio es necesario analizar cuidadosamente las historias y calcular también los valores máximos en rms.

De acuerdo con lo que se observa en las historias de cortante, es posible notar que para cualquiera de los casos inelásticos estudiados, el cortante máximo pico a pico es menor que para el caso lineal, lo que se traduce como que en ningún momento aparecen crestas localizadas en las que la respuesta del caso inelástico supera a la del caso lineal, fenómeno que sí se presentó en el edificio de cuatro niveles.

Al observar las historias se corrobora que, al añadir los disipadores de energía, se abate la respuesta comparada con el caso lineal, que es precisamente lo que se busca al utilizar este tipo de dispositivos en los edificios.

#### 7.4.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia

Al igual que en el edificio anterior, se obtienen los máximos mediante el índice rms; los resultados en rms, como ya se ha mencionado antes, ponderan la

respuesta encontrada para un sismo, ya que con este índice se eliminan las crestas que no son representativas del comportamiento general del sistema. Es por ello que los valores calculados de esta forma dan un mejor indicio del comportamiento general de la estructura, en este caso el edificio.

Debido a lo anterior es que se obtiene y compara la respuesta, utilizando este índice para evaluar la conducta que tiene el edificio, con los valores máximos obtenidos pico a pico.

Para el sismo de análisis, los valores máximos, pico a pico, indican que el punto óptimo del umbral de cedencia está localizado entre  $0.1500C_s$  y  $0.1000C_s$ , según se ve en la figura 7.8 a.

Si se comparan los valores máximos en rms, el límite de fluencia óptimo también se localiza en  $0.1000C_s$ , según se aprecia en la figura 7.8 b.

Para esta estructura, ambos índices: valores pico y rms, convergen al mismo valor para el umbral de cedencia, ya que si se observan detenidamente las historias de cortantes, mostradas en la figura 7.7, es posible notar que en ningún momento aparecen crestas en las que la respuesta inelástica supere a la respuesta elástica; es decir, no existen valores pico que no sean representativos de la respuesta obtenida, sino que todo el comportamiento de la historia completa refleja realmente la conducta del edificio, ante la excitación de este acelerograma, en particular.

Comparación de Cortantes en la Base ( SCT `85 E-W )  
Edificio de Veinte Niveles

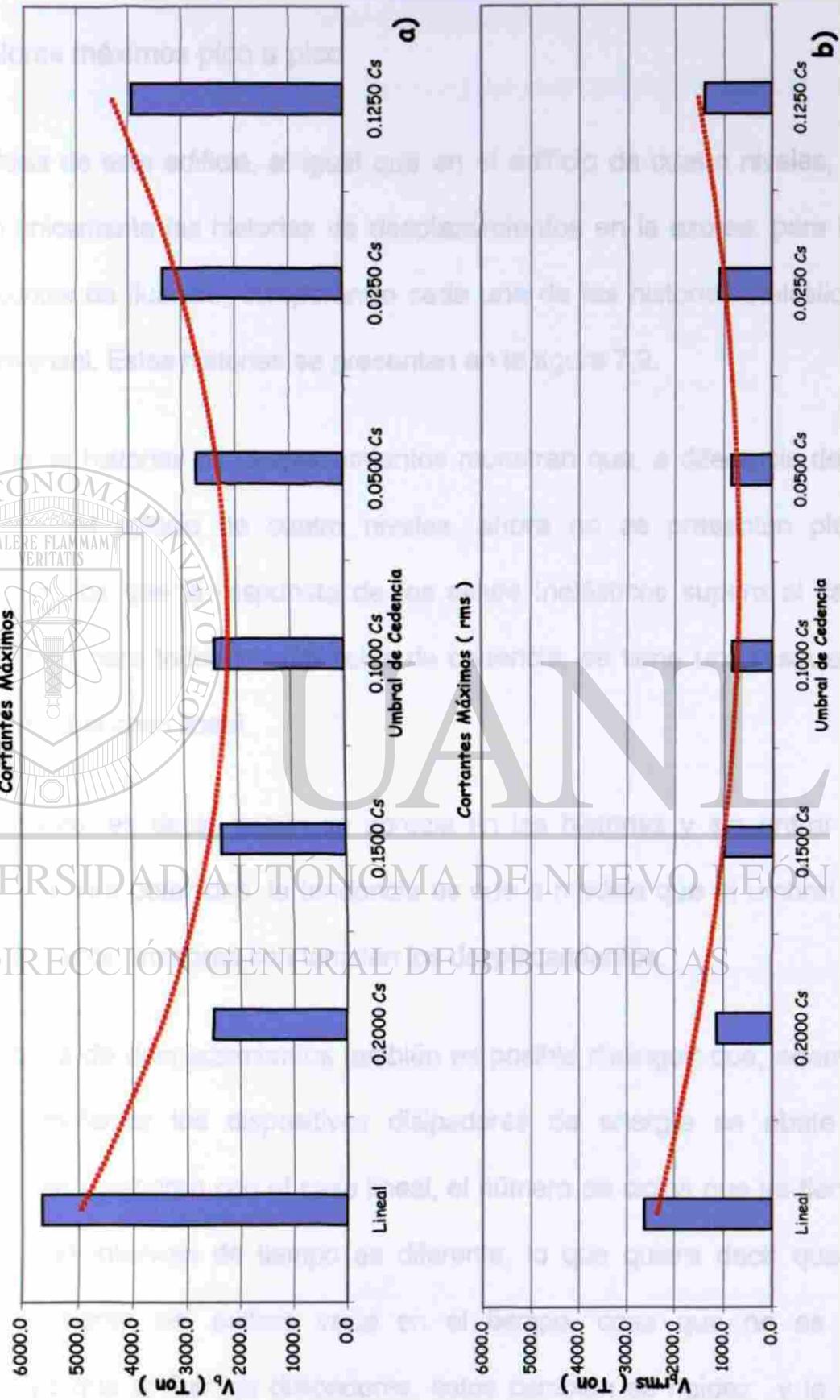


Fig. 7.8 Valores máximos de cortantes (SCT `85 (E-W)).

## 7.5 Desplazamientos

### 7.5.1 Valores máximos pico a pico

En el análisis de este edificio, al igual que en el edificio de cuatro niveles, se presentan únicamente las historias de desplazamientos en la azotea. para los distintos puntos de fluencia, comparando cada una de las historias inelásticas con el caso lineal. Estas historias se presentan en la figura 7.9.

Las gráficas de historias de desplazamientos muestran que, a diferencia de lo observado en el edificio de cuatro niveles, ahora no se presentan picos localizados en los que la respuesta de los casos inelásticos supere al caso lineal; sino que, para todos los umbrales de cedencia, se tiene una respuesta menor que para el caso lineal.

Cualitativamente, es decir, según se aprecia en las historias y sin entrar en detalles de valores obtenidos, la tendencia es que a medida que el umbral de cedencia es menor, menores son también los desplazamientos.

En las historias de desplazamientos también es posible distinguir que, además de que al implantar los dispositivos disipadores de energía se abate la respuesta si se comparan con el caso lineal, el número de ciclos que se tienen para un mismo intervalo de tiempo es diferente, lo que quiere decir que el periodo equivalente del edificio varía en el tiempo, cosa que no es de extrañarse, ya que al fluir los disipadores, éstos cambian su rigidez y la del edificio.

### Historia de Desplazamientos en Azotea ( SCT '85 E-W ) Edificio de Veinte Niveles

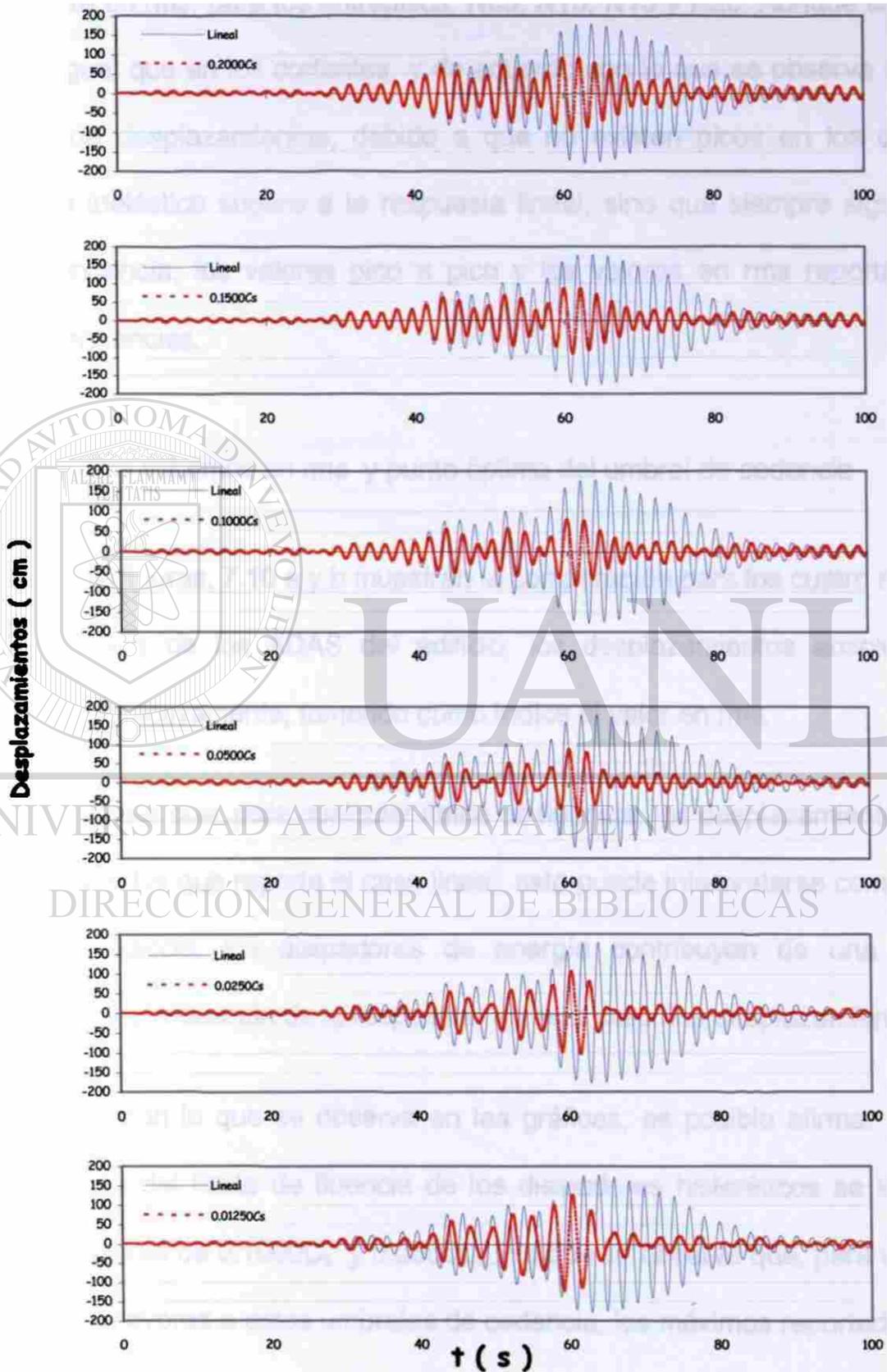


Fig. 7.9 Historia de desplazamientos en azotea (SCT '85 (E-W)).

Además de las historias de desplazamientos, se incluye también, en las figuras 7.10 a y b un resumen de los desplazamientos máximos absolutos y relativos, únicamente en rms, para los entrepisos: N05, N10, N15 y N20. Aunque en este caso, al igual que en los cortantes, y de acuerdo con lo que se observa en las historias de desplazamientos, debido a que no existen picos en los que la respuesta inelástica supere a la respuesta lineal, sino que siempre siguen la misma tendencia, los valores pico a pico y los valores en rms reportan las mismas tendencias.

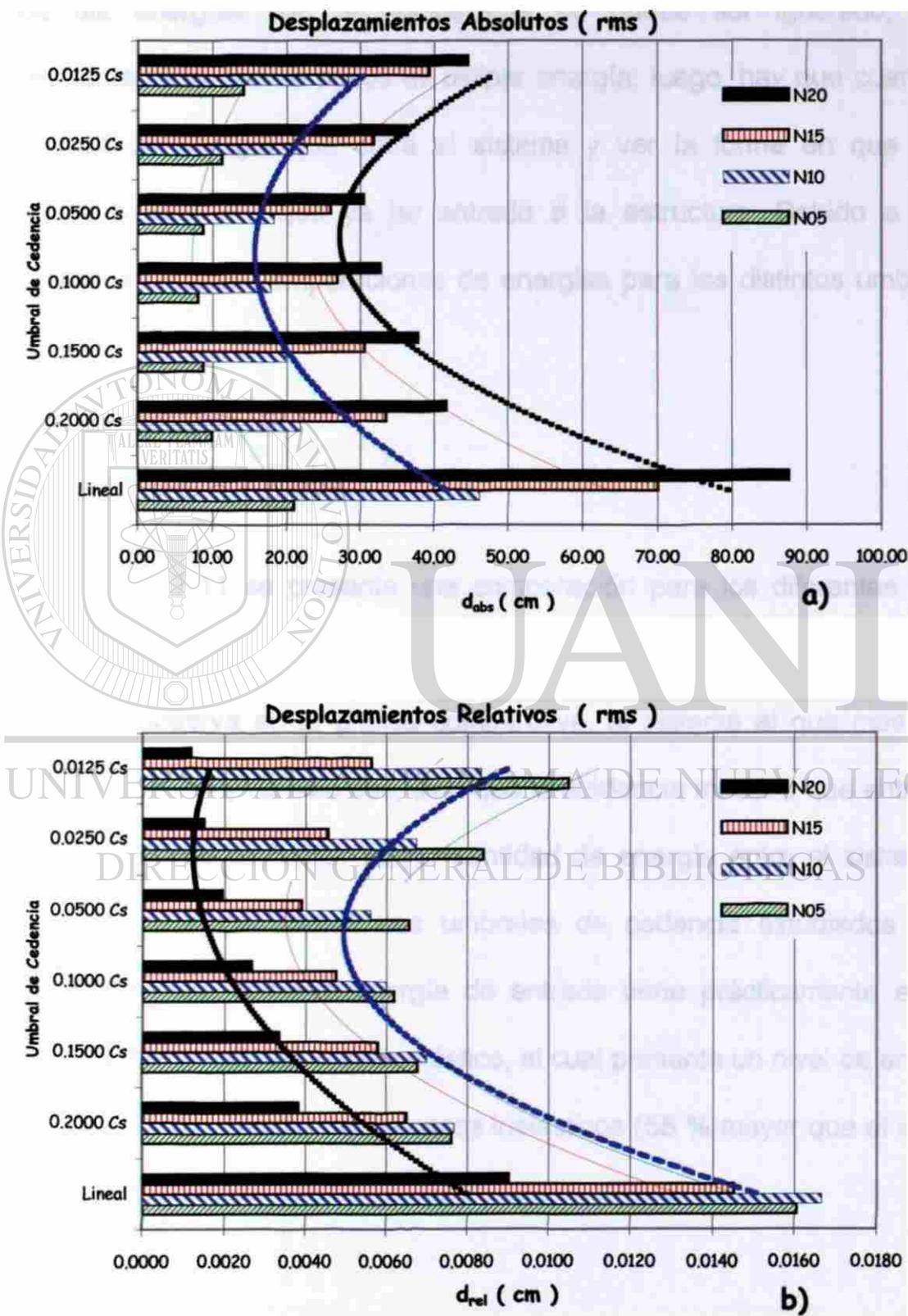
#### 7.5.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia

Las mismas figuras, 7.10 a y b muestran la comparación para los cuatro niveles representativos de los ADAS del edificio, los desplazamientos absolutos y relativos, respectivamente, tomando como índice el valor en rms.

Es posible notar que, para cualquier límite de fluencia, los desplazamientos son menores que los que reporta el caso lineal, esto puede interpretarse como que, para este edificio, los disipadores de energía contribuyen de una forma importante a la reducción de la respuesta, en este caso, los desplazamientos.

De acuerdo con lo que se observa en las gráficas, es posible afirmar que el punto óptimo del límite de fluencia de los disipadores histeréticos se localiza entre los valores de  $0.1000C_s$  y  $0.0500C_s$ . Ya que se observa que, para valores menores o mayores a estos umbrales de cedencia, los máximos reportados son mayores.

**Comparación de Desplazamientos ( SCT `85 E-W )  
Edificio de Veinte Niveles**



**Fig. 7.10 Valores máximos de desplazamientos.**

## 7.6 Energías

Para evaluar la respuesta del edificio de una forma más completa, se considera que las energías son un índice que no puede ser ignorado, ya que precisamente lo que se busca es disipar energía; luego, hay que cuantificar la cantidad de energía que entra al sistema y ver la forma en que ésta se distribuye, una vez que ya ha entrado a la estructura. Debido a ello, se presentan también comparaciones de energías para los distintos umbrales de cedencia.

### 7.6.1 Energía de entrada

En la figura 7.11 se presenta una comparación para los diferentes tipos de energía considerados en este análisis. En el caso de la energía de entrada, según se observa en la gráfica comparativa, el sistema al que más energía entra es al lineal y no sólo eso, sino que la tendencia muestra que entre mayor se el umbral de cedencia, mayor cantidad de energía entra al sistema. Sin embargo, para los últimos tres umbrales de cedencia estudiados en este edificio, se nota cómo la energía de entrada tiene prácticamente el mismo comportamiento; no así el caso elástico, el cual presenta un nivel de energía de entrada muy por encima de los casos inelásticos (55 % mayor que el inelástico mayor).

Comparación de Energías ( SCT `85 E-W )  
Edificio de Veinte Niveles

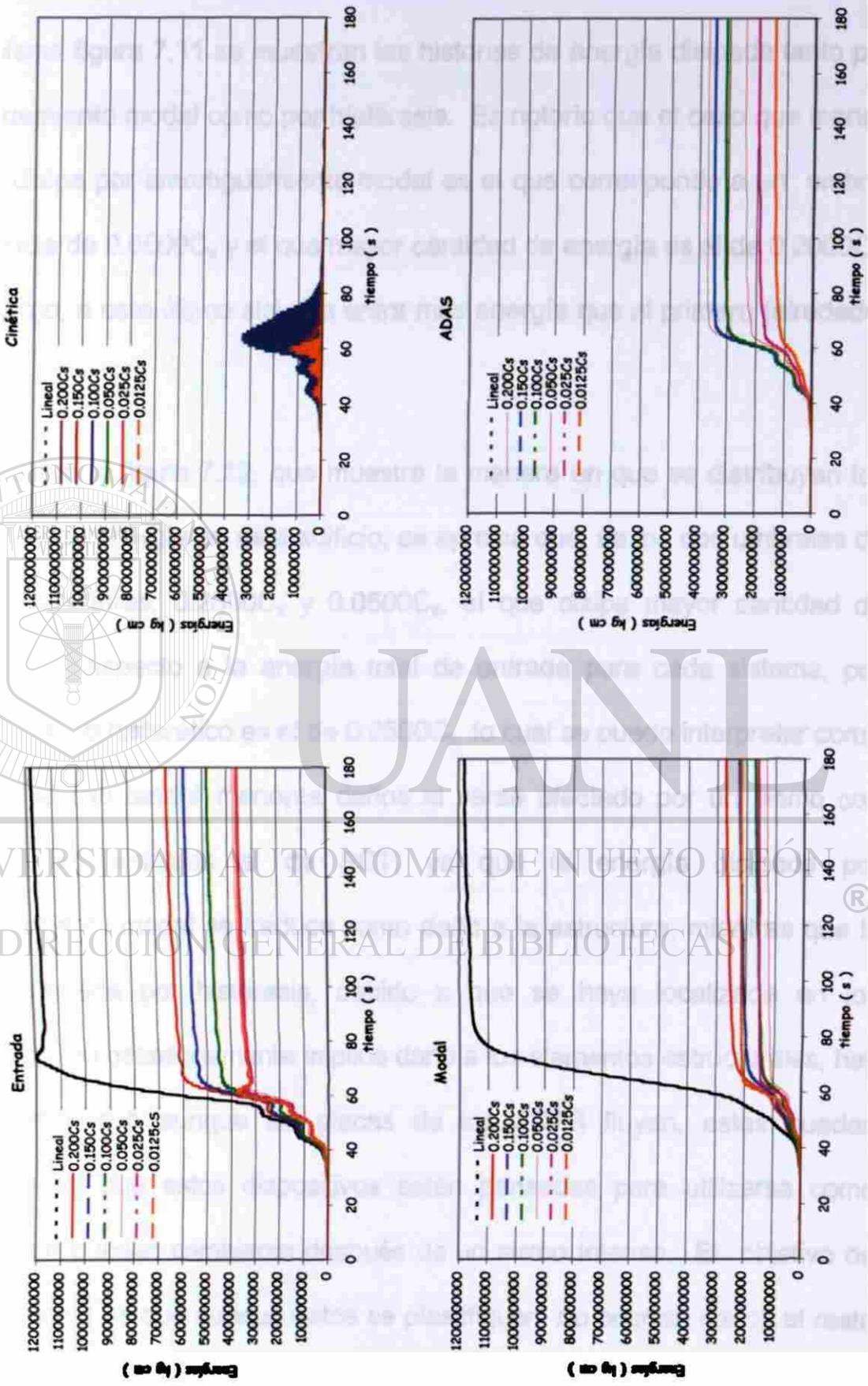


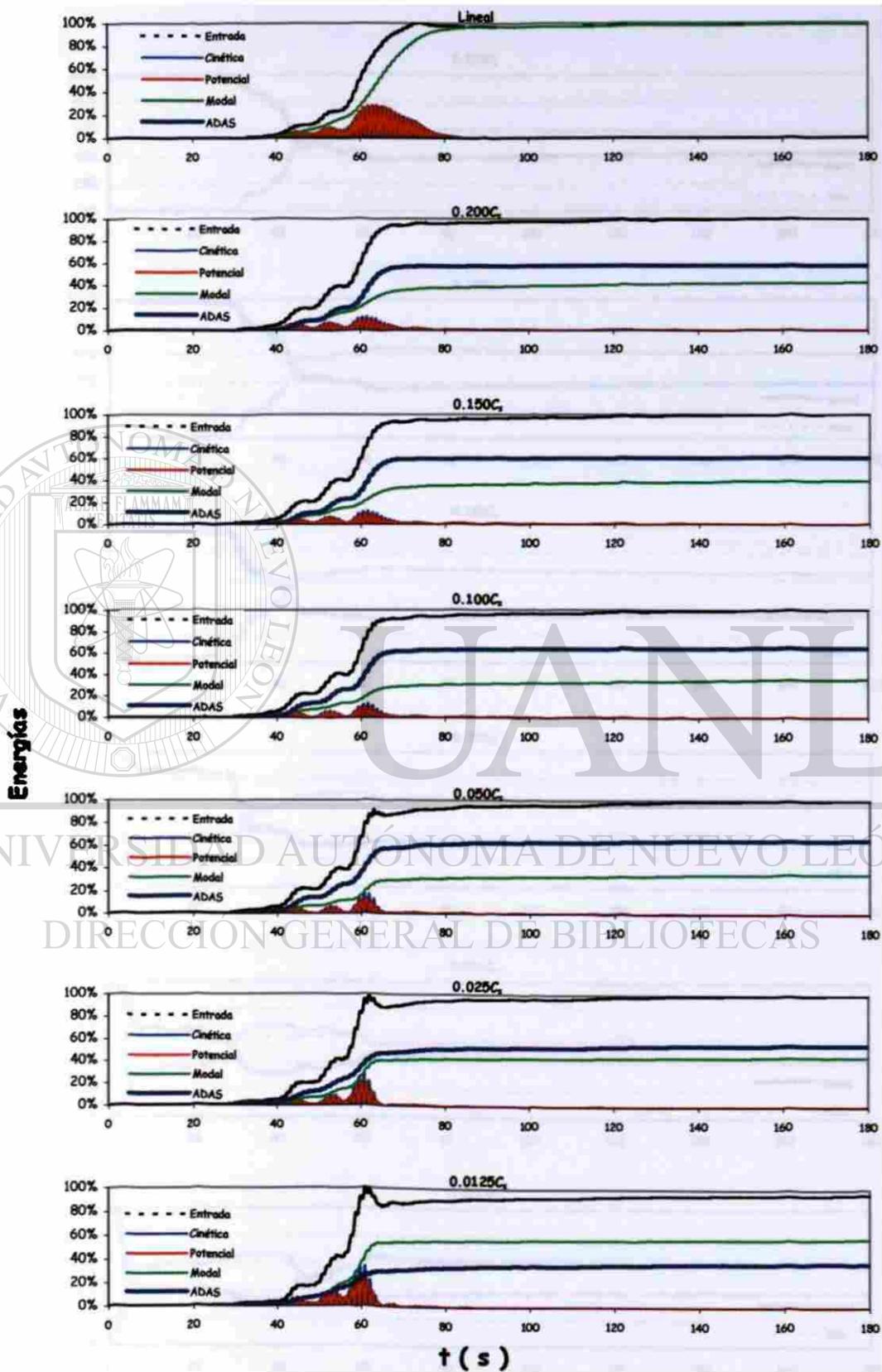
Fig. 7.11 Historias de energías (SCT `85 (E-W)).

## 7.6.2 Energía disipada

En la misma figura 7.11 se muestran las historias de energía disipada tanto por amortiguamiento modal como por histéresis. Es notorio que el caso que menos energía disipa por amortiguamiento modal es el que corresponde a un umbral de cedencia de  $0.0500C_s$ , y el que mayor cantidad de energía es el de  $0.2000C_s$ , sin embargo, a este último sistema entra más energía que al primero (alrededor del 60%).

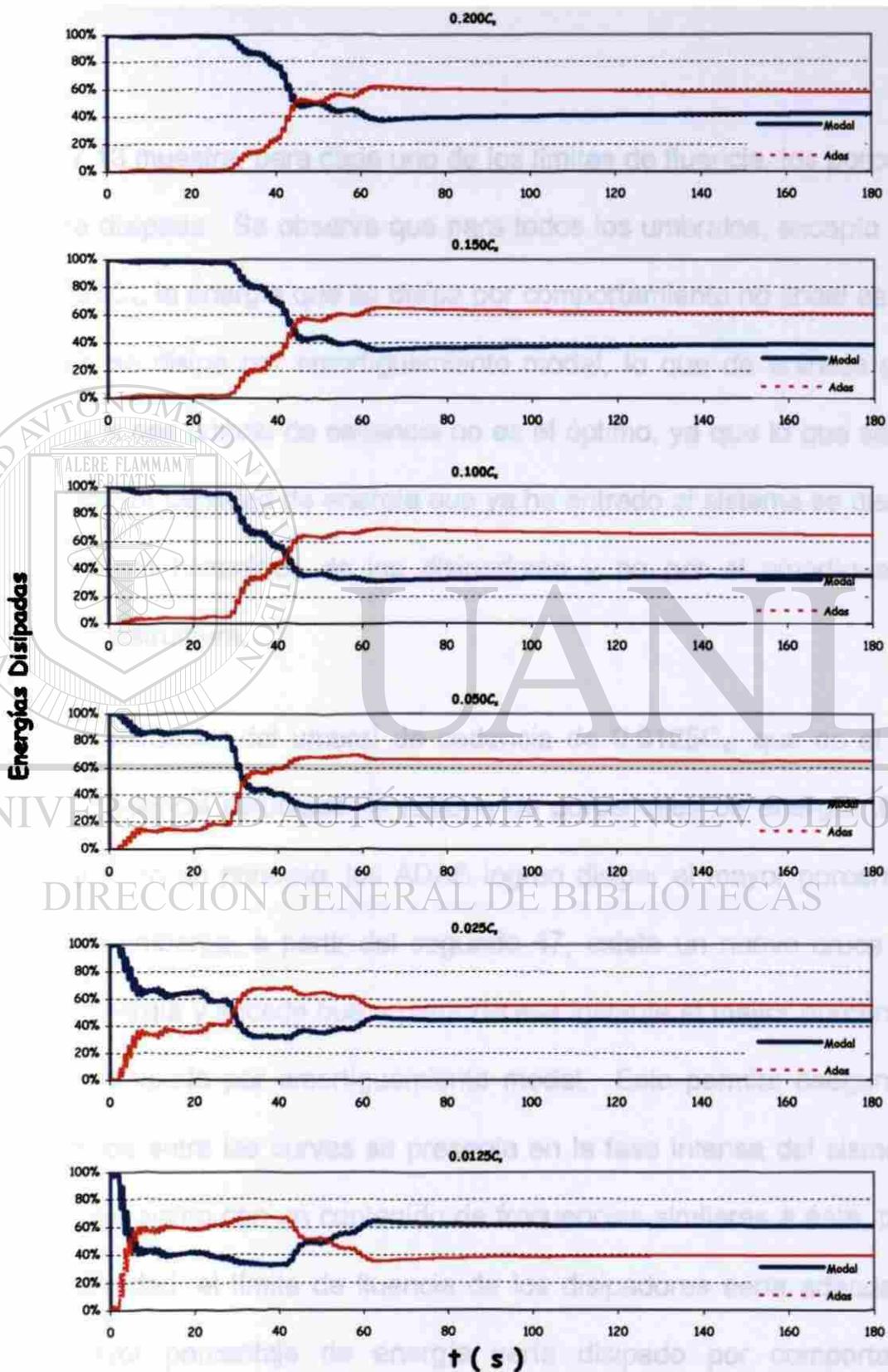
Si se observa la figura 7.12, que muestra la manera en que se distribuyen los porcentajes de energía en este edificio, se aprecia que, de los dos umbrales de cedencia anteriores,  $0.2000C_s$  y  $0.0500C_s$ , el que disipa mayor cantidad de energía, con respecto a la energía total de entrada para cada sistema, por comportamiento histerético es el de  $0.0500C_s$ , lo cual se puede interpretar como que este edificio tendrá menores daños al verse afectado por un sismo con características similares al de SCT, ya que la energía disipada por amortiguamiento modal se traduce como daño a la estructura, mientras que la energía disipada por histéresis, debido a que se haya localizada en los disipadores, no necesariamente implica daño a los elementos estructurales; hay que recordar que aunque las placas de los ADAS fluyan, estas pueden cambiarse ya que estos dispositivos están pensados para utilizarse como fusibles que puedan cambiarse después de un sismo intenso. El objetivo de los disipadores es que aunque estos se plastifiquen, no ocurran daños al resto de la estructura.

**Energías ( SCT `85 E-W )  
Edificio de Veinte Niveles**



**Fig. 7.12** Porcentajes de energías (SCT `85 (E-W)).

**Energías Disipadas ( SCT '85 E-W )  
Edificio de Veinte Niveles**



**Fig. 7.13 Energías disipadas (SCT '85 (E-W)).**

Así, en términos de energía disipada, es posible afirmar que es el umbral de  $0.0500C_s$ , el que se comporta mejor, ya que es el que disipa de una mejor forma, con el mayor porcentaje por histéresis, la energía que ya ha entrado al sistema.

La figura 7.13 muestra, para cada uno de los límites de fluencia, los porcentajes de energía disipada. Se observa que para todos los umbrales, excepto el más bajo,  $0.0125C_s$ , la energía que se disipa por comportamiento no lineal es mayor que la que se disipa por amortiguamiento modal, lo que de entrada permite asegurar que ese umbral de cedencia no es el óptimo, ya que lo que se busca es que la mayor cantidad de energía que ya ha entrado al sistema se disipe por comportamiento histerético de los disipadores y no por el amortiguamiento mismo de la estructura.

En el caso particular del umbral de cedencia de  $0.0125C_s$ , que es el menor umbral de cedencia estudiado, la historia de porcentajes de energía disipada muestra que, en un principio, los ADAS logran disipar el mayor porcentaje de energía; sin embargo, a partir del segundo 47, existe un nuevo cruce de las curvas de energía y sucede que a partir de ese instante el mayor porcentaje de energía es disipado por amortiguamiento modal. Esto permite asegurar que, como el cruce entre las curvas se presenta en la fase intensa del sismo, para cualquier otro sismo con un contenido de frecuencias similares a éste, pero de menor intensidad, el límite de fluencia de los disipadores sería adecuado, ya que el mayor porcentaje de energía sería disipado por comportamiento histerético.

Comparación de Energías Disipadas (SCT `85 E-W )  
Edificio de Veinte Niveles

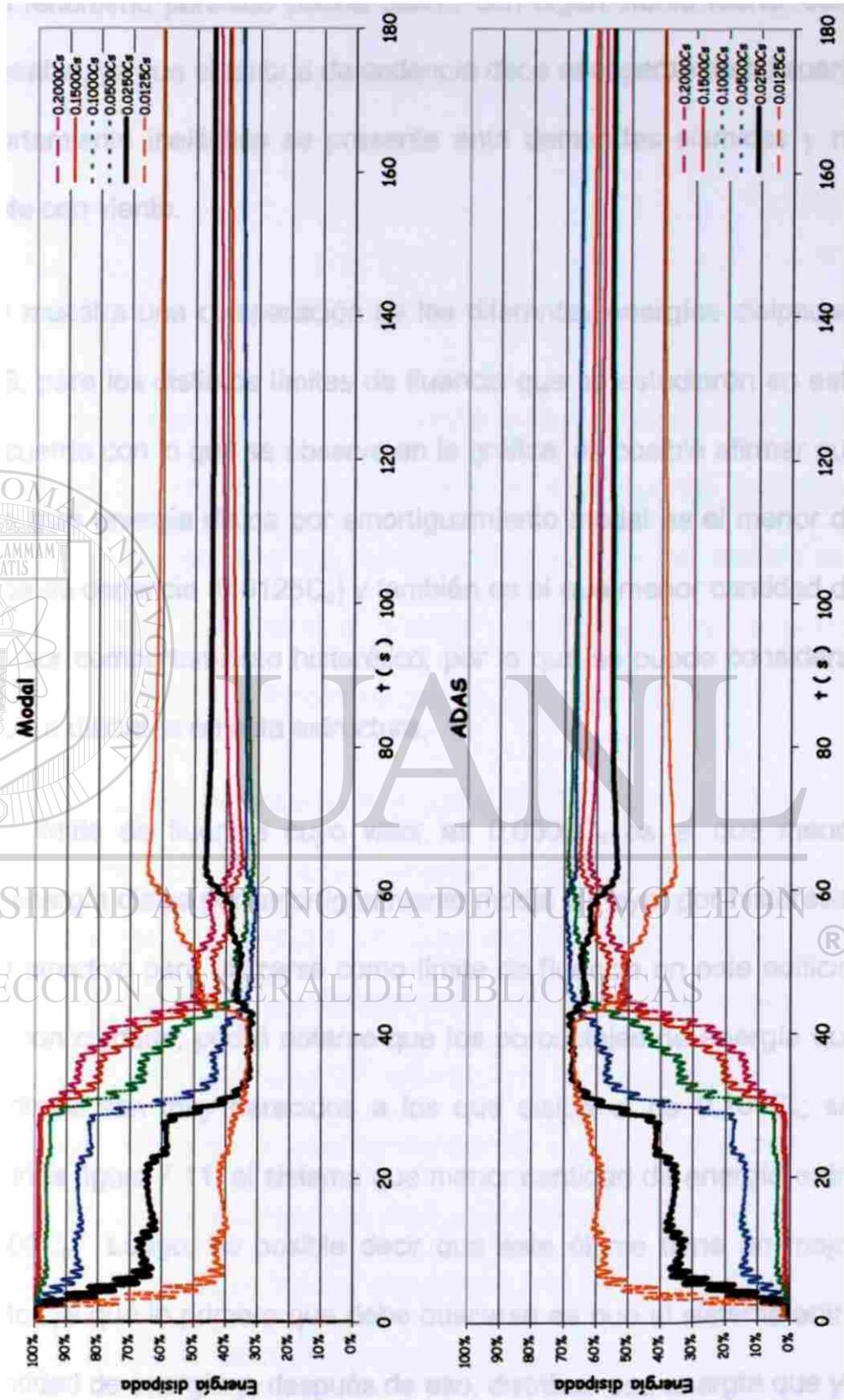


Fig. 7.14 Comparación de energías disipadas (SCT `85 (E-W)).

Desafortunadamente, el sismo de análisis es demasiado para este umbral de cedencia. Un fenómeno parecido podría ocurrir con algún viento fuerte, cosa que no es deseable, ya que el umbral de cedencia debe escogerse de tal suerte que el comportamiento inelástico se presente ante demandas sísmicas y no necesariamente con viento.

La figura 7.14 muestra una comparación de las diferentes energías disipadas, Modal y ADAS, para los distintos límites de fluencia que se estudiaron en este edificio. De acuerdo con lo que se observa en la gráfica, es posible afirmar que el sistema que más energía disipa por amortiguamiento modal es el menor de los umbrales de de cedencia ( $0.0125C_s$ ) y también es el que menor cantidad de energía disipa por comportamiento histerético, por lo que se puede considerar no adecuado para utilizarse en esta estructura.

En cambio, el límite de fluencia cuyo valor es  $0.0500C_s$  es el que menor porcentaje de energía disipa por amortiguamiento modal y mayor por histéresis, lo que lo hace atractivo para utilizarse como límite de fluencia en este edificio. Si se observa con cuidado, podrá notarse que los porcentajes de energía que este sistema disipa son muy parecidos a los que disipa el de  $0.100C_s$ ; sin embargo, según la figura 7.11, el sistema que menor cantidad de energía entra es el de  $0.0500C_s$ . Luego, es posible decir que este último tiene un mejor comportamiento, ya que lo primero que debe buscarse es que al sistema entre una menor cantidad de energía y, después de eso, distribuir esa energía que ya ha entrado, de tal forma que la mayor cantidad posible sea disipada por comportamiento inelástico y no por el amortiguamiento propio del edificio, ya

que eso se traduciría en daño estructural. Entonces, debe concentrarse la energía disipada en los dispositivos de comportamiento histerético; en este caso, ADAS para, de esa forma, localizar los puntos en donde se disipa la energía y evitar el daño a la estructura.

### **7.7 Comportamiento histerético de los ADAS**

No sólo basta con encontrar el umbral de cedencia para el cual se disipe mayor porcentaje de energía por amortiguamiento histerético, sino que hay que cuidar que la ductilidad que reporta cada uno de los ADAS después del análisis sea alcanzable en la realidad, ya que si el análisis reporta algo que no puede lograrse, no es representativo del fenómeno que se pretende modelar.

Las curvas histeréticas, para algunos niveles que se consideran representativos del comportamiento de la estructura, se aprecian en las figuras 7.15 y 7.16. Según lo observado en las gráficas de comportamiento histerético, para umbrales de cedencia menores que  $0.0500C_s$ , las ductilidades alcanzadas en los ADAS alcanzan valores de hasta 27, valores que no son recomendables para los disipadores; en cambio, para umbrales de cedencia mayores que  $0.0500C_s$ , se aprecia que las ductilidades alcanzadas no son mayores que 12. Estos valores de ductilidad sí pueden ser alcanzados por los ADAS. Luego, es posible afirmar, que el umbral de cedencia de  $0.0500C_s$  o incluso el de  $0.1000C_s$  tienen los mejores comportamientos, hablando de los ADAS.

Comportamiento Histerético de los ADAS ( SCT '85 E-W )  
Edificio de Veinte Niveles

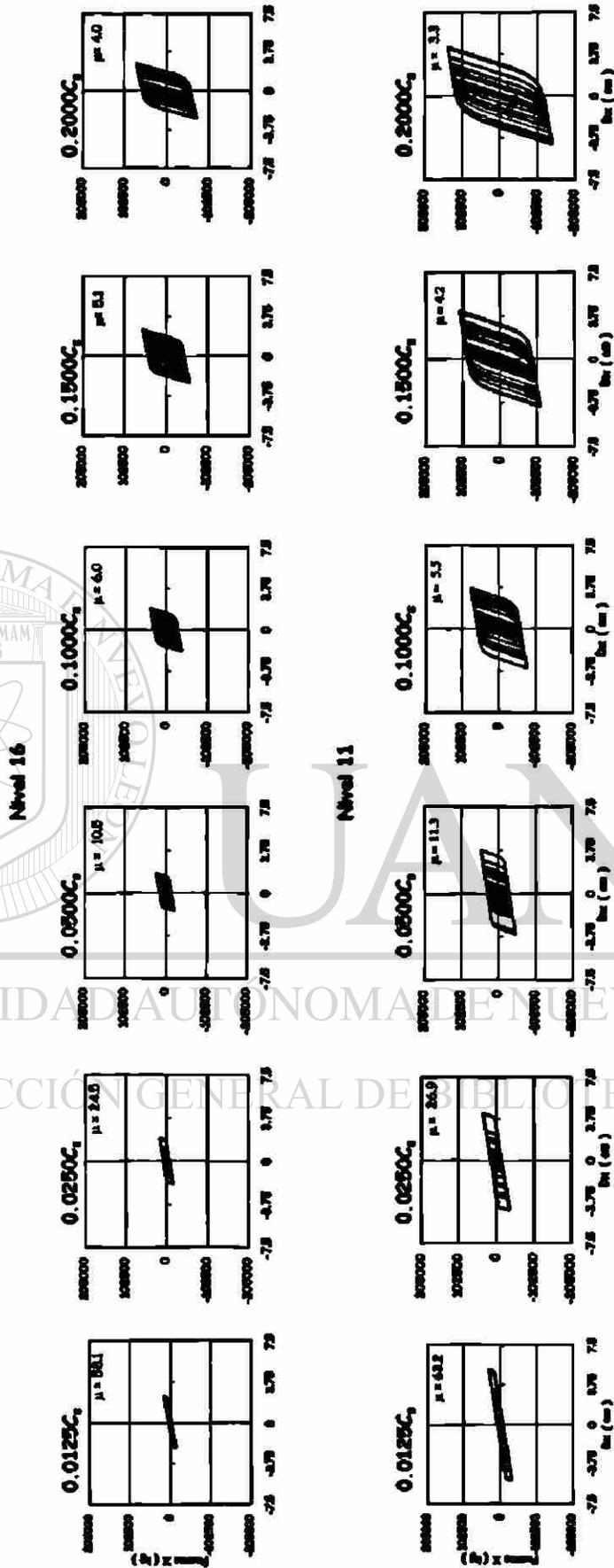


Fig. 7.15 Ciclos histeréticos en niveles superiores (SCT '85 (E-W)).

Comportamiento Histerético de los ADAS ( SCT '85 E-W )  
Edificio de Veinte Niveles

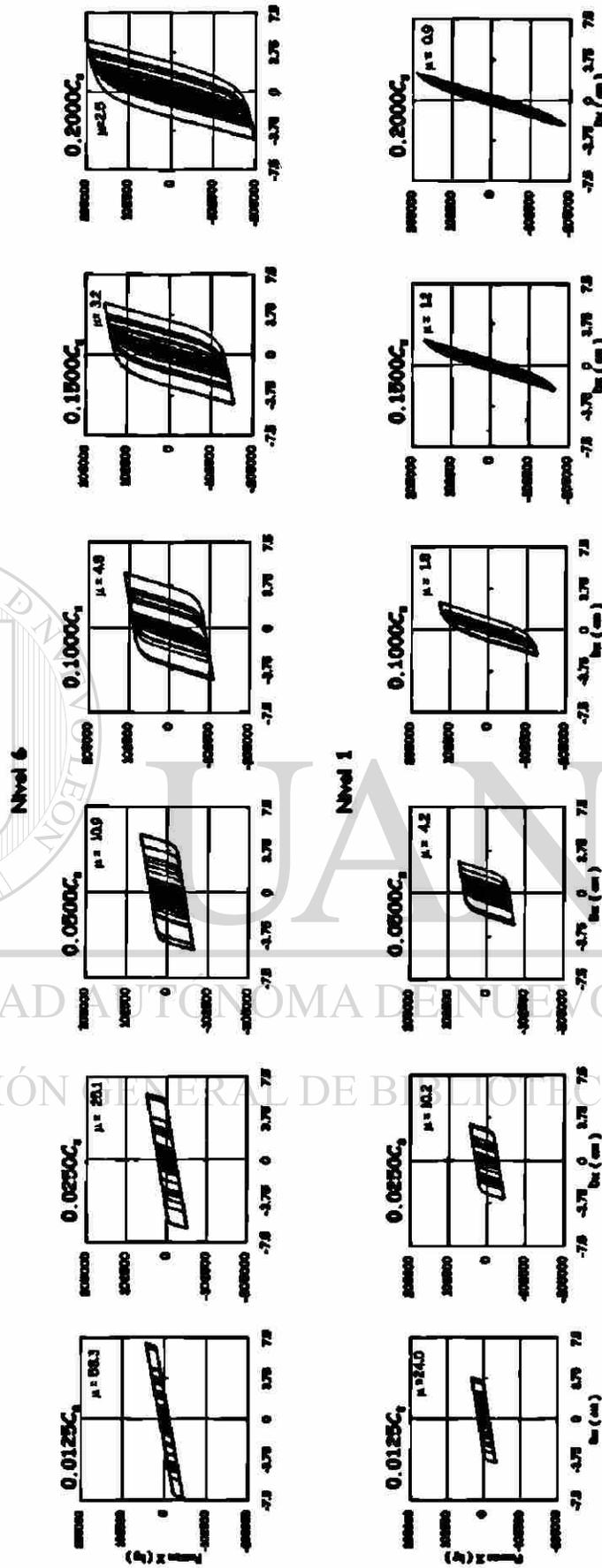


Fig. 7.16 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (SCT '85 (E-W)).

## 7.8 Análisis general de la respuesta

Ahora, después de observar el comportamiento para los diferentes parámetros estudiados, es posible hacer las siguientes afirmaciones:

En cortantes en la base, el menor cortante se obtiene para el umbral de cedencia de  $0.1000C_s$ ; sin embargo, el límite de fluencia de  $0.0500C_s$  tiene un cortante que no es mayor que el anterior en un 2 por ciento. Por lo que se puede afirmar que los cortantes obtenidos para cualquiera de los dos límites de fluencia son prácticamente los mismos.

Hablando de desplazamientos absolutos, tanto en rms como en valores pico, la menor respuesta se obtiene para el límite de fluencia de  $0.1000C_s$ ; no obstante, los desplazamientos relativos, que son los que más se asocian al daño estructural, menores, encontrados, fueron para el umbral de  $0.0500C_s$ . En este caso, la diferencia entre uno y otro límite de fluencia es alrededor del 10 por ciento, para los desplazamientos absolutos y 40 por ciento, para los desplazamientos relativos.

Atendiendo al comportamiento energético, se observó que los dos umbrales antes mencionados disipan la energía en más o menos los mismos porcentajes, tanto para el caso de energía disipada por amortiguamiento modal, como la energía disipada por comportamiento histerético.

Sin embargo, se observó también que el edificio que menor cantidad de energía de entrada tiene es el que tiene los disipadores con un límite de fluencia igual a  $0.0500C_s$ . En este caso, la diferencia entre este umbral y el de  $0.1000C_s$  es alrededor del 60 por ciento, lo que hace posible afirmar que, a pesar de que los porcentajes de energía disipada sean iguales, no necesariamente se distribuyen igual. Esto se observa con mayor claridad en las gráficas que comparan las energías, las cuales se muestran en la figura 7.13. En ellas se aprecia que es el límite de fluencia de  $0.0500C_s$  el que mejor se comporta, ya que a este sistema entra menos cantidad de energía y de la energía que ya ha entrado, menos se disipa por amortiguamiento modal y más por comportamiento histerético, lo que es deseable, ya que de esa forma se tendrá menor daño estructural.

El comportamiento que se observó en los ADAS pone en evidencia que el umbral de cedencia que más dúctil resulta es el de  $0.0500C_s$ , ya que a pesar de que umbrales más bajos presentan mayores valores de ductilidad, éstos no pueden ser alcanzados en la realidad, de acuerdo con las pruebas hechas por Whittaker, *et al.*, 1989, quienes encontraron que los ADAS pueden desarrollar ductilidades hasta de 14; aunque recomiendan que, para fines de diseño, se usen ductilidades de 10 y, según lo observado en los ciclos histeréticos, es precisamente ese límite de fluencia el que se comporta de acuerdo con lo recomendado.

## 7.9 Comentarios

En general, es posible afirmar que el mejor comportamiento es el que presenta el límite de fluencia de  $0.0500C_s$ , ya que, aunque no se obtienen menores cortantes en la base, para el resto de los parámetros evaluados es el que mejor se comporta; sin embargo, el umbral de cedencia de  $0.1000C_s$  ofrece también ventajas sobre los otros umbrales estudiados; pero, en este caso, no se tiene tanta ductilidad como la que alcanza el de  $0.0500C_s$ , lo que puede ser deseable en algunos casos, dependiendo de qué tanto desea el proyectista que se deformen los ADAS ante un evento sísmico, como el que representa el acelerograma utilizado para este análisis.

Vale la pena mencionar que es gracias a que el mayor porcentaje de rigidez lateral del edificio es proporcionado por los ADAS es posible que se disipe energía, ya que, como se vio en el edificio de cuatro niveles, cuando los marcos toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, la energía que los disipadores logran disipar no es la suficiente como para emplear este tipo de mecanismos en la estructura. Existen investigaciones como las desarrolladas por Díaz, O. y Esteva, L. (1998), quienes han estudiado la proporción de rigidez que deben guardar los disipadores con respecto a los marcos.

## CAPÍTULO 8

### APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO

En este capítulo se trata el caso práctico de estudio. Se hace el análisis de un edificio cuyos parámetros de geometría y rigidez no están controlados. El objetivo de este apartado es, después de haber ensayado en dos casos teóricos, llevar a cabo un estudio de la influencia de los dispositivos disipadores de energía en un edificio real. Cabe aclarar que este edificio se encuentra en proceso de construcción, sin embargo, y gracias a que el autor de este trabajo tuvo acceso al proyecto preliminar, le fue posible estudiar la influencia de los disipadores en este edificio en particular.

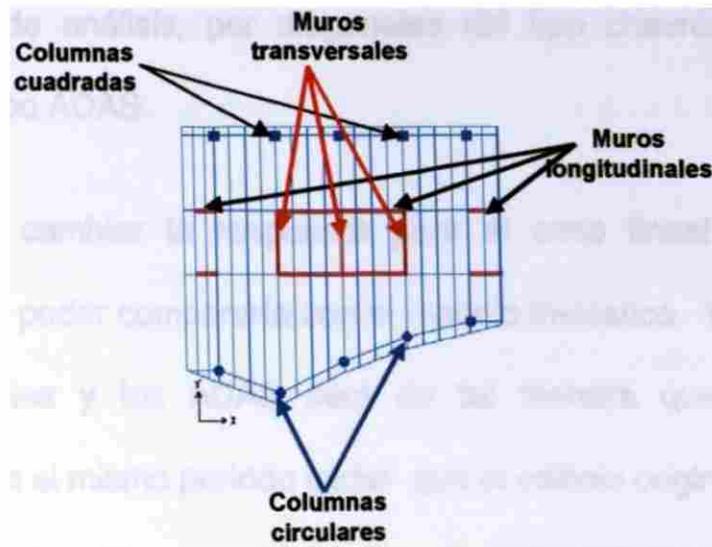
#### 8.1 Descripción del edificio

De acuerdo con el proyecto, este edificio constará de treinta y tres niveles, con alturas de entrepiso variables: desde 2.1, hasta 4.6 m, dependiendo del uso que tiene cada piso. La estructura se armará mediante marcos, cuyas columnas exteriores son de concreto, las de la fachada tienen una sección circular, mientras que las de la parte de atrás son de sección rectangular. Las columnas interiores estarán formadas por perfiles de acero de secciones IPR. El sistema de piso está constituido por un sistema losa-acero, apoyado sobre vigas de acero, también del tipo IPR.

Para darle rigidez lateral a la estructura, en el cubo de los elevadores, se armará un cajón con muros de concreto con tres líneas, en la dirección corta y dos en la dirección larga. Las líneas de muro de la dirección longitudinal, dirección mayor, serán mayores y, además, tienen un muro más hacia delante y uno más hacia atrás. Esta forma de estructurar un edificio es similar a la que se obtiene cuando se construye un núcleo central rígido y las columnas exteriores formando otro sistema rigidizante separado del núcleo. Este sistema es conocido como *tubo en tubo*, y es el que se utiliza en la construcción de edificios altos, ya que se ha visto su funcionalidad en estructuras existentes, como por ejemplo, la Torre SEARS, las Torres Petronas, las Torres Gemelas de Nueva York, entre otras.

Para este trabajo se considera que el sistema de piso tiene la rigidez suficiente como para utilizar la hipótesis del diafragma rígido.

Una vista de la planta típica se aprecia en la figura 8.1, en ella que se advierte el cajón formado por los muros de concreto en el cubo del elevador y la prolongación de los muros en el sentido longitudinal, así como la sección transversal de las columnas exteriores. Es posible, en la figura antes mencionada, notar que la planta la distribución que tienen las columnas en la planta del edificio. Vale la pena mencionar que la configuración que se aprecia en la figura 8.1 es la configuración del proyecto original y no la que se utiliza para analizar la influencia de los disipadores en este edificio.



**Fig. 8.1.** Planta típica del edificio.

Una vista del edificio tridimensional del edificio se muestra en la figura 8.2.

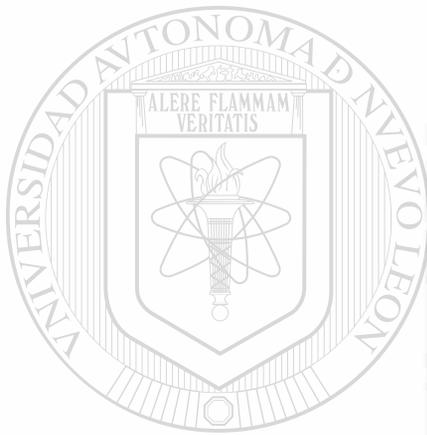


**Fig. 8.2.** Torre Ángel (modelo original, con muros de concreto)

Para estudiar la influencia de los disipadores del tipo ADAS en esta estructura, se propone cambiar los muros de concreto que se encuentran en la dirección

corta, dirección de análisis, por diagonales del tipo chevrón, provistas con disipadores del tipo ADAS.

En afán de no cambiar la respuesta para el caso lineal del marco con disipadores y así poder compararla con el modelo inelástico, la rigidez provista por las diagonales y los ADAS será de tal manera que el edificio con disipadores tenga el mismo periodo inicial que el edificio original ( $T = 3.4187$  s); en este caso, la dirección de análisis es la dirección "Y". Una vista del modelo propuesto para analizar la influencia de los ADAS se aprecia en la figura 8.3.



**Fig. 8.3.** Torre Ángel (modelo con ADAS).

En este edificio se estudia únicamente la proporción de rigidez lateral que se obtiene una vez que los muros transversales se han cambiado por los

diagonales y disipadores. Esta proporción, de acuerdo con los cálculos hechos a partir de los periodos obtenidos tanto para el modelo con disipadores como para el modelo esquelético, es decir, el modelo sin muros ni diagonales, es tal que los marcos solos toman el 22 por ciento de la rigidez lateral del edificio, en la dirección de análisis, que en este caso, como ya se mencionó, es la dirección "Y".

Un detalle que muestra la localización de las diagonales con disipadores se muestra en la figura 8.4.



**Fig. 8.4.** Localización de contravientos con ADAS.

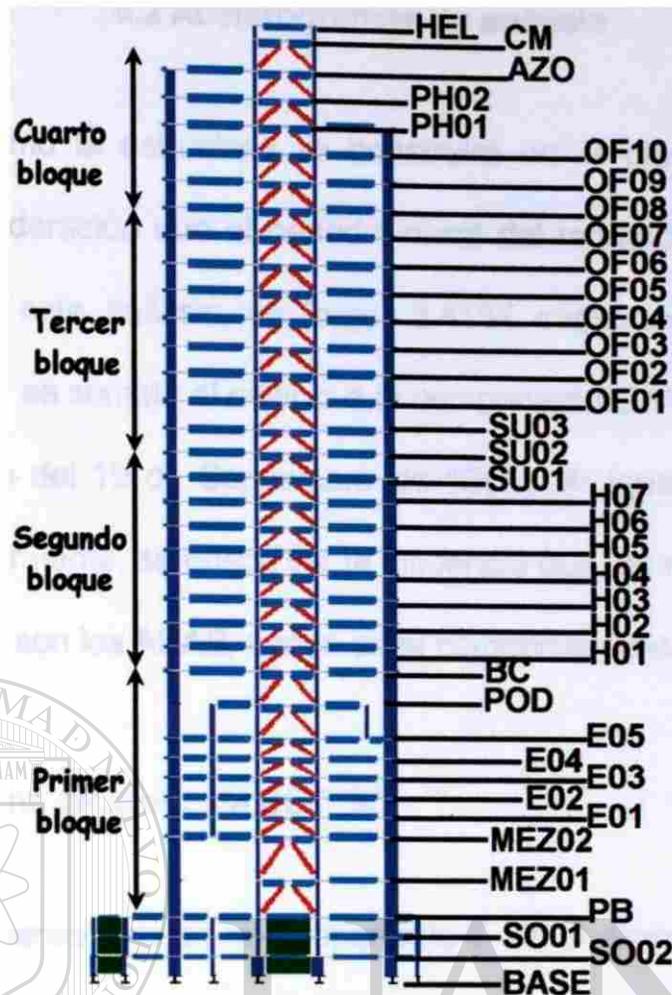
La carga, que está asociada a las masas en cada nivel, en este caso varía dependiendo del uso que tendrá cada entrepiso, así, la carga muerta adicional tiene valores que van desde 375 hasta 1055 Kg/m<sup>2</sup>, mientras que la carga viva que se considera tiene valores desde 70 hasta 720 Kg/m<sup>2</sup>. Cabe recordar que la carga viva que se considera para análisis bajo cargas accidentales, como lo es el sismo o el viento, es menor que la carga que se considera para análisis de

cargas de gravedad, esto de acuerdo con las recomendaciones que hacen los códigos de diseño sísmico.

Al igual que en el edificio de veinte niveles, debido a que el cortante de entrepiso varía con la altura, se consideran cuatro diferentes pendientes post-fluencia, dependiendo del nivel en el que se encuentren, así, los disipadores del primer nivel tendrán una pendiente post-fluencia mayor que las de los niveles superiores.

Se dividió al edificio en cuatro bloques: tres bloques de nueve niveles y un último bloque de 6 niveles. El valor de la pendiente post-fluencia, como ya se mencionó, va disminuyendo en una cuarta parte para cada bloque. Así, para el primer bloque se tienen valores igual al cien por ciento de la rigidez que le toca a cada disipador, en función del cortante basal y para los bloques subsecuentes, esta pendiente se va reduciendo una cuarta parte por cada bloque hasta que en el último bloque los disipadores tienen una fuerza de fluencia igual a la cuarta parte de la fuerza requerida en los disipadores del primer bloque, los cuales tienen una fuerza de fluencia igual al cortante del primer nivel dividido entre el número de disipadores de ese nivel.

Una vista de los niveles del edificio y las diferentes pendientes post-fluencia se muestra en la figura 8.5.



**Fig. 8.5.** Elevación del marco central la Torre Ángel.

Para calcular el valor de la pendiente posterior a la fluencia de los dispositivos de los primeros niveles, la que se considera como el 100 por ciento, se divide el cortante basal entre el número de disipadores que se tienen en el primer nivel.

Ese valor se le asigna al primer bloque; mientras que a los niveles superiores, como ya se dijo, se les asigna un porcentaje de la rigidez de los del primer nivel, dependiendo de la altura a la que se encuentren.

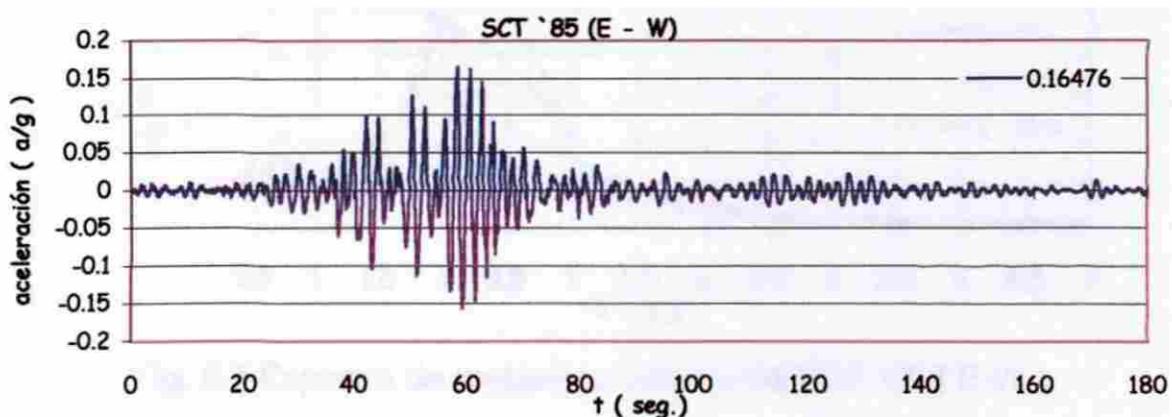
Es necesario tener presente que la rigidez inicial de todos los disipadores es la misma para el rango elástico, lo único que se varía es la fuerza con la cual alcanzan la fluencia los disipadores, de cada bloque.

## 8.2 Acelerogramas de análisis

En este caso, como la estructura se construirá en la ciudad de México, y tomando en consideración que el periodo inicial del modelo matemático de la torre utilizado en este análisis, es largo, 3.4187 segundos en dirección de análisis estudiada, se somete al edificio a la componente E-W del acelerograma de SCT del sismo del 19 de Septiembre de 1985. Al igual que en los casos estudiados anteriormente, se busca ver la influencia que los disipadores del tipo histeréticos, como son los ADAS, tienen en el comportamiento del edificio.

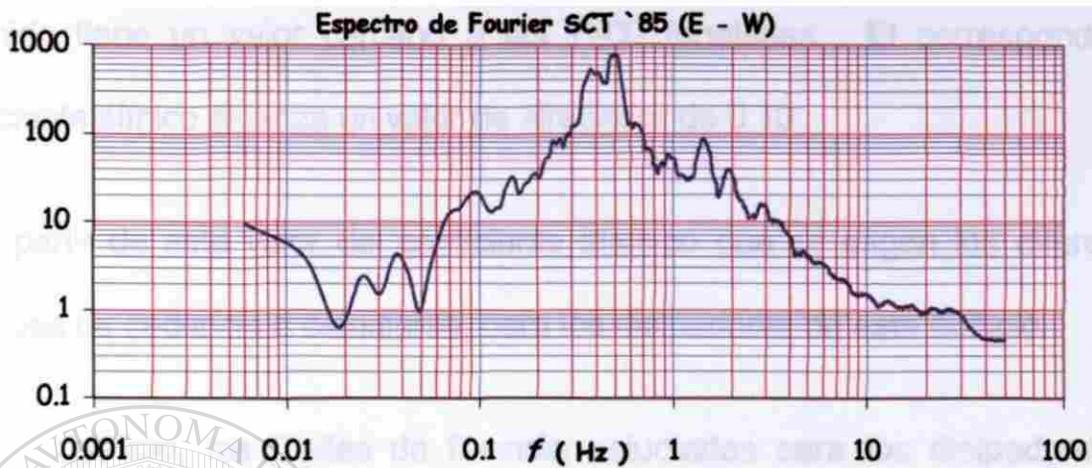
### 8.2.1 Acelerograma del sismo de SCT '85

El registro de aceleraciones de la componente E-W, el sismo de SCT utilizado en el análisis tiene una duración de aproximadamente 180 segundos, con una aceleración máxima registrada de 0.16 g. El acelerograma presenta una marcada fase intensa de alrededor de 40 segundos, en donde se presentan los valores máximos de aceleración. El acelerograma de este sismo se puede ver en la figura 8.6.



**Fig. 8.6** Acelerograma del sismo de SCT '85 ( E-W ).

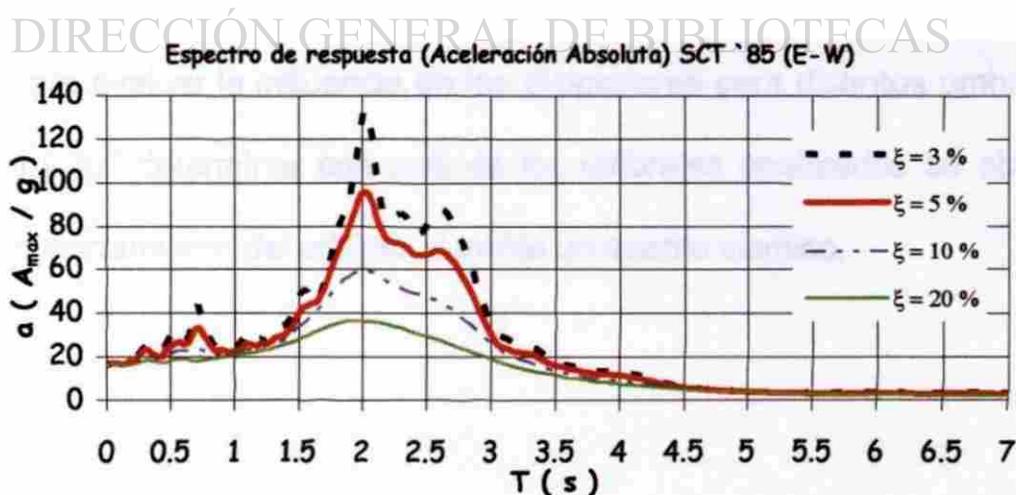
El espectro de Fourier de este sismo muestra que su contenido de frecuencias es amplio, sin embargo, las máximas aceleraciones se encuentran alrededor de los 0.5 Hz. (figura 8.7)



**Fig. 8.7** Espectro de Fourier de SCT '85 ( E-W ).

El espectro de respuesta elástico de este sismo pone en evidencia que existe un pico perfectamente localizado, cercano a los dos segundos.

En la figura 8.8 se aprecia el espectro de respuesta para diferentes porcentajes de amortiguamiento.



**Fig. 8.8** Espectro de respuesta elástico de SCT '85 ( E-W ).

### 8.3 Coeficiente sísmico ( $C_s$ )

En la figura 8.9 a y b se muestran las historias del análisis lineal de cortante en la base y el coeficiente sísmico. Según se aprecia, el mayor cortante basal obtenido tiene un valor cercano a las 7900 toneladas. El correspondiente coeficiente sísmico alcanza un valor de alrededor de 0.10.

Es a partir de este valor del coeficiente sísmico que se eligen los diferentes umbrales de cedencia a estudiarse, para los disipadores de este edificio.

En este edificio, los límites de fluencia estudiados para los disipadores de energía fueron:  $0.2000C_s$ ,  $0.1500C_s$ ,  $0.1000C_s$ ,  $0.0500C_s$  y  $0.0250C_s$ . Hay que recordar, que se hace un barrido de umbrales de cedencia ya que uno de los objetivos es encontrar el límite de fluencia de los disipadores con el cual el edificio tiene un comportamiento óptimo.

De nuevo, se estudian diferentes valores del límite de fluencia de los disipadores ADAS, los cuales se escriben en función del valor del coeficiente sísmico, para evaluar la influencia de los disipadores para distintos umbrales de cedencia y así determinar con cuál de los umbrales analizados se obtiene el mejor comportamiento del edificio, durante un evento sísmico.

Cortante en la Base y Coeficiente Sísmico ( SCT `85 E-W )  
Torre Ángel

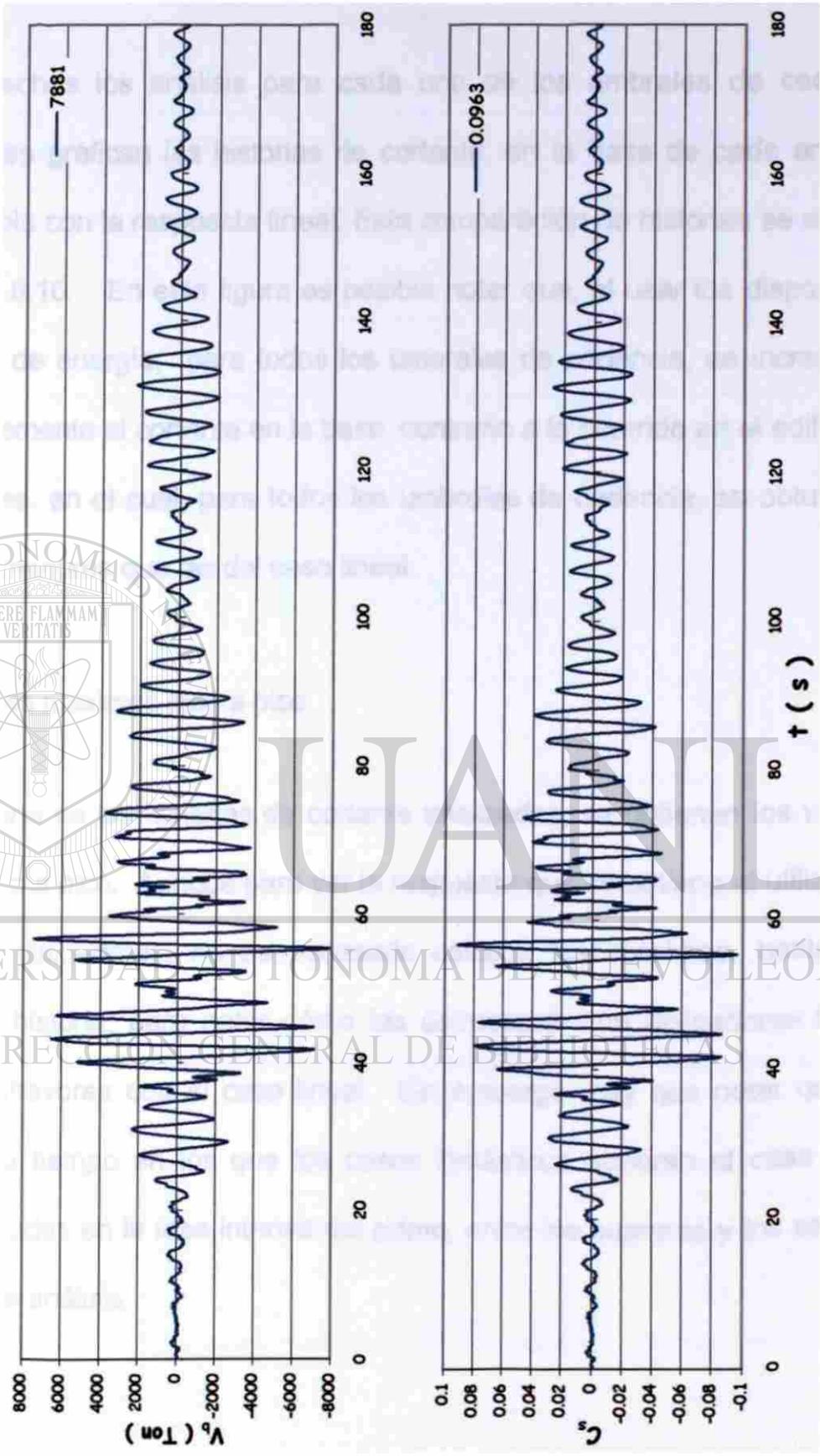


Fig. 8.9. Cortante en la base y Coeficiente sísmico (SCT `85 (E-W)).

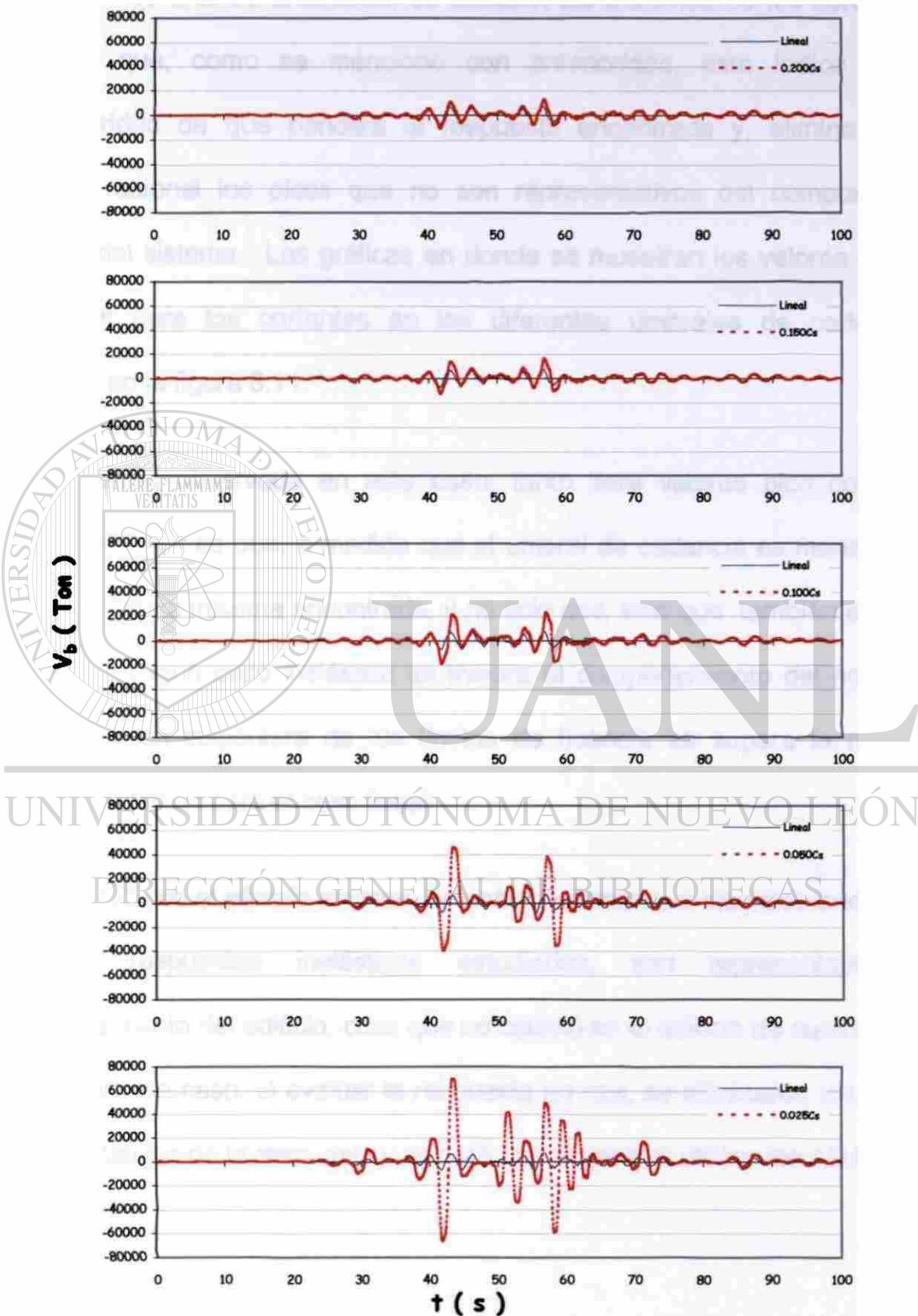
## 8.4 Cortantes en la base

Una vez hechos los análisis para cada uno de los umbrales de cedencia escogidos, se grafican las historias de cortante, en la base de cada análisis, comparándola con la respuesta lineal. Esta comparación de historias se aprecia en la figura 8.10. En esta figura es posible notar que, al usar los dispositivos disipadores de energía, para todos los umbrales de cedencia, se incrementa considerablemente el cortante en la base, contrario a lo ocurrido en el edificio de veinte niveles: en el cual, para todos los umbrales de cedencia, se obtuvieron respuestas menores que las del caso lineal.

### 8.4.1 Valores máximos pico a pico

Para cada una de las historias de cortante analizadas, se obtienen los valores máximos pico a pico. Aunque para ver la respuesta que se obtiene al utilizar los dispositivos disipadores, no es necesario calcular los máximos, basta con observar la historia, para notar cómo las estructuras con disipadores tienen respuestas mayores que el caso lineal. Sin embargo, hay que notar que los intervalos de tiempo en los que los casos inelásticos superan al caso lineal están localizados en la fase intensa del sismo, entre los cuarenta y los sesenta segundos del análisis.

### Cortante en la Base ( SCT `85 E-W ) Torre Ángel



**Fig. 8.10** Historia de cortantes en la base (SCT `85 (E-W)).

#### 8.4.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia

Como en los análisis anteriores, se calculan los máximos de los cortantes en rms; ya que, como se mencionó con anterioridad, este índice tiene la particularidad de que pondera la respuesta encontrada y, elimina de una manera racional los picos que no son representativos del comportamiento general del sistema. Las gráficas en donde se muestran los valores máximos obtenidos para los cortantes en los diferentes umbrales de cedencia se aprecian en la figura 8.11.

La tendencia observada en este caso, tanto para valores pico como para valores en rms, es que, a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es la respuesta máxima encontrada, y no sólo eso, sino que también es notorio que para ningún caso inelástico se mejora el comportamiento del edificio, es decir, que en cualquiera de los límites de fluencia se supera la respuesta máxima obtenida para el caso lineal.

De acuerdo con el párrafo anterior, es posible afirmar que los picos encontrados en las respuestas inelásticas estudiadas, son representativos del comportamiento del edificio, cosa que no ocurrió en el edificio de cuatro niveles, ya que en ese caso, al evaluar la respuesta en rms, se eliminaron los picos no representativos de la respuesta y se notó una mejoría al utilizar los ADAS.

Comparación de Cortantes en la Base ( SCT `85 E-W )  
Torre Ángel

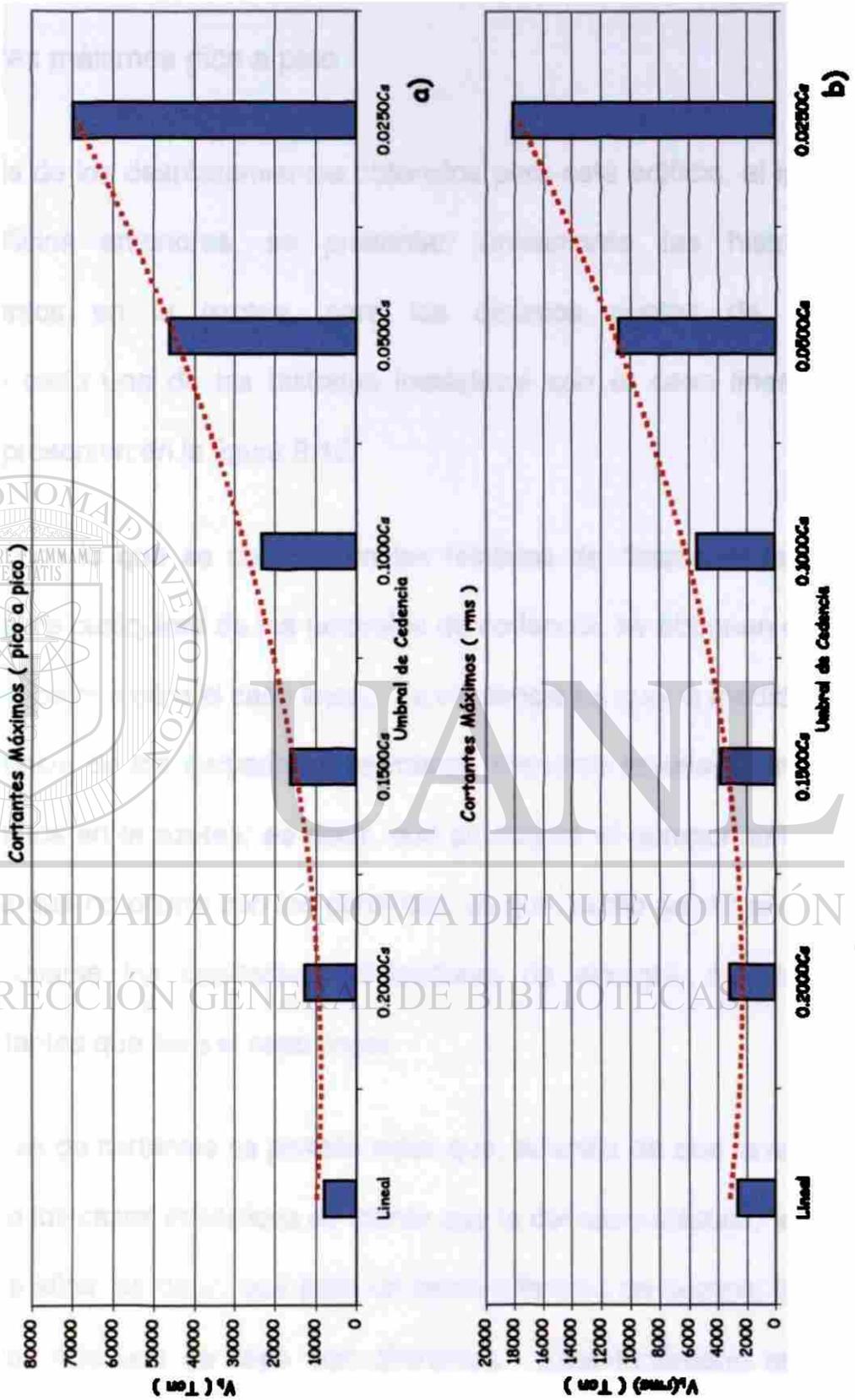


Fig. 8.11 Valores máximos de cortantes (SCT `85 (E-W)).

## 8.5 Desplazamientos

### 8.5.1 Valores máximos pico a pico

En el análisis de los desplazamientos obtenidos para este edificio, al igual que en los edificios anteriores, se presentan únicamente las historias de desplazamientos en la azotea, para los distintos puntos de fluencia, comparando cada una de las historias inelásticas con el caso lineal. Estas historias se presentan en la figura 8.12.

De acuerdo con lo que se observa en las historias de desplazamientos, es notorio que para cualquiera de los umbrales de cedencia, se obtienen menores desplazamientos que para el caso lineal. La tendencia es que, a medida que el límite de fluencia de los disipadores es menor, menores resultan también los desplazamientos en la azotea; es decir, que se mejora el comportamiento del edificio, cosa que no ocurre con los cortantes; ya que, como se vio en el punto anterior, al usarse los dispositivos disipadores de energía, se obtuvieron mayores cortantes que para el caso lineal.

En las historias de cortantes es posible notar que, además de que la respuesta obtenida para los casos inelásticos es menor que la del caso elástico, existe un desfase entre ellas; es decir, que para un cierto intervalo de tiempo, los ciclos que presenta cada uno de ellos son diferentes. Este fenómeno encuentra explicación en que, debido a la fluencia de los disipadores, se pierde rigidez en el edificio, lo que se traduce en un cambio en el periodo del edificio.

### Historia de Desplazamientos en Azotea ( SCT `85 E-W ) Torre Ángel

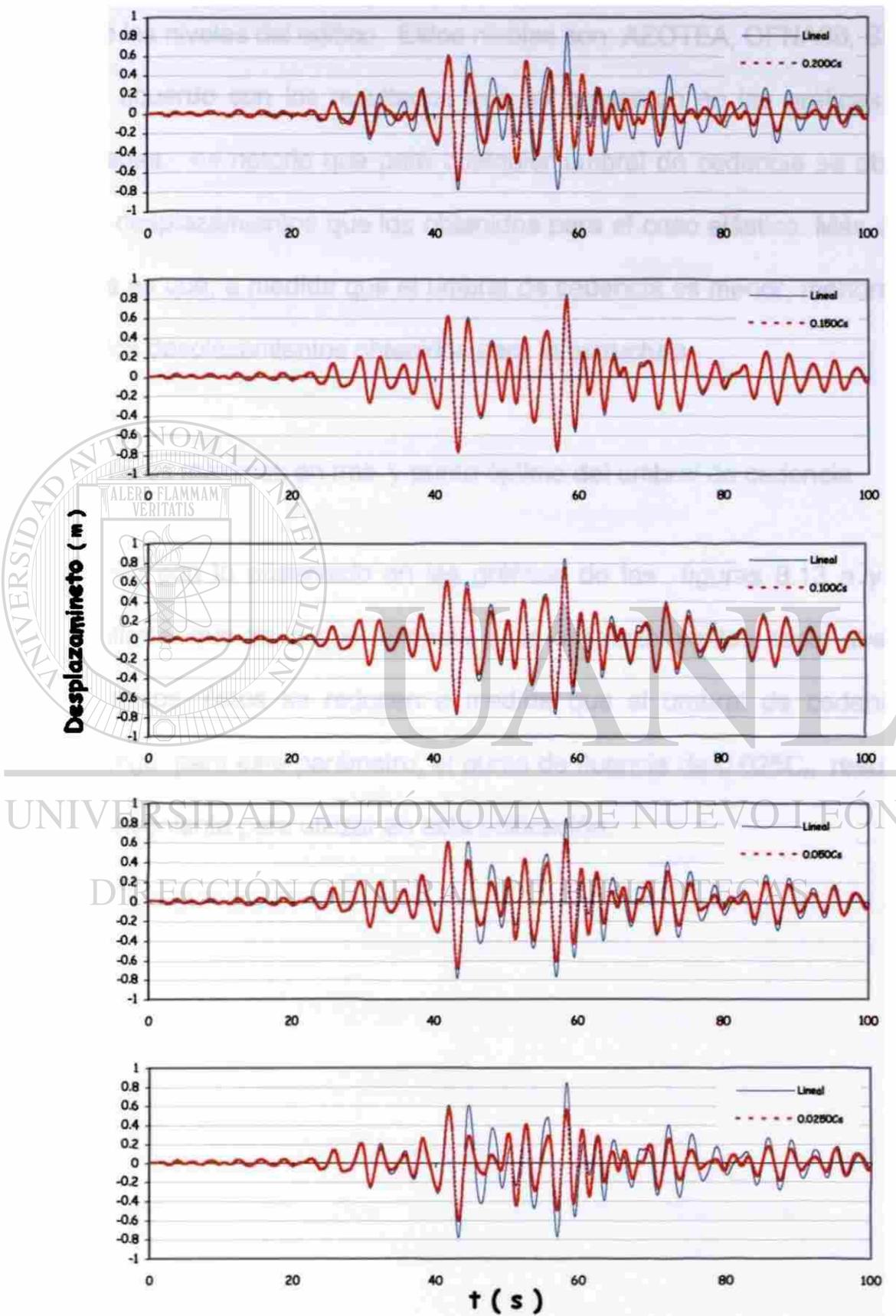


Fig. 8.12 Historia de desplazamientos en azotea (SCT `85).

En las figuras 8.13 a y b se incluyen gráficas que contienen un resumen de los desplazamientos máximos absolutos y relativos, únicamente en rms, para cuatro de los niveles del edificio. Estos niveles son: AZOTEA, OFNA08, SU02, y H01. De acuerdo con los resultados que se presentan en las gráficas antes mencionadas, es notorio que para cualquier umbral de cedencia se obtienen menores desplazamientos que los obtenidos para el caso elástico. Más aún, la tendencia es que, a medida que el umbral de cedencia es menor, menores son también los desplazamientos obtenidos para la estructura.

### 8.5.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia

De acuerdo con lo observado en las gráficas de las figuras 8.13 a y b, es posible afirmar que en lo que respecta a los desplazamientos, tanto absolutos como relativos, éstos se reducen a medida que el umbral de cedencia es menor, luego, para este parámetro, el punto de fluencia de  $0.025C_s$  resulta ser el más conveniente para utilizar en esta edificación.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### Comparación de Desplazamientos ( SCT `85 E-W ) Torre Ángel

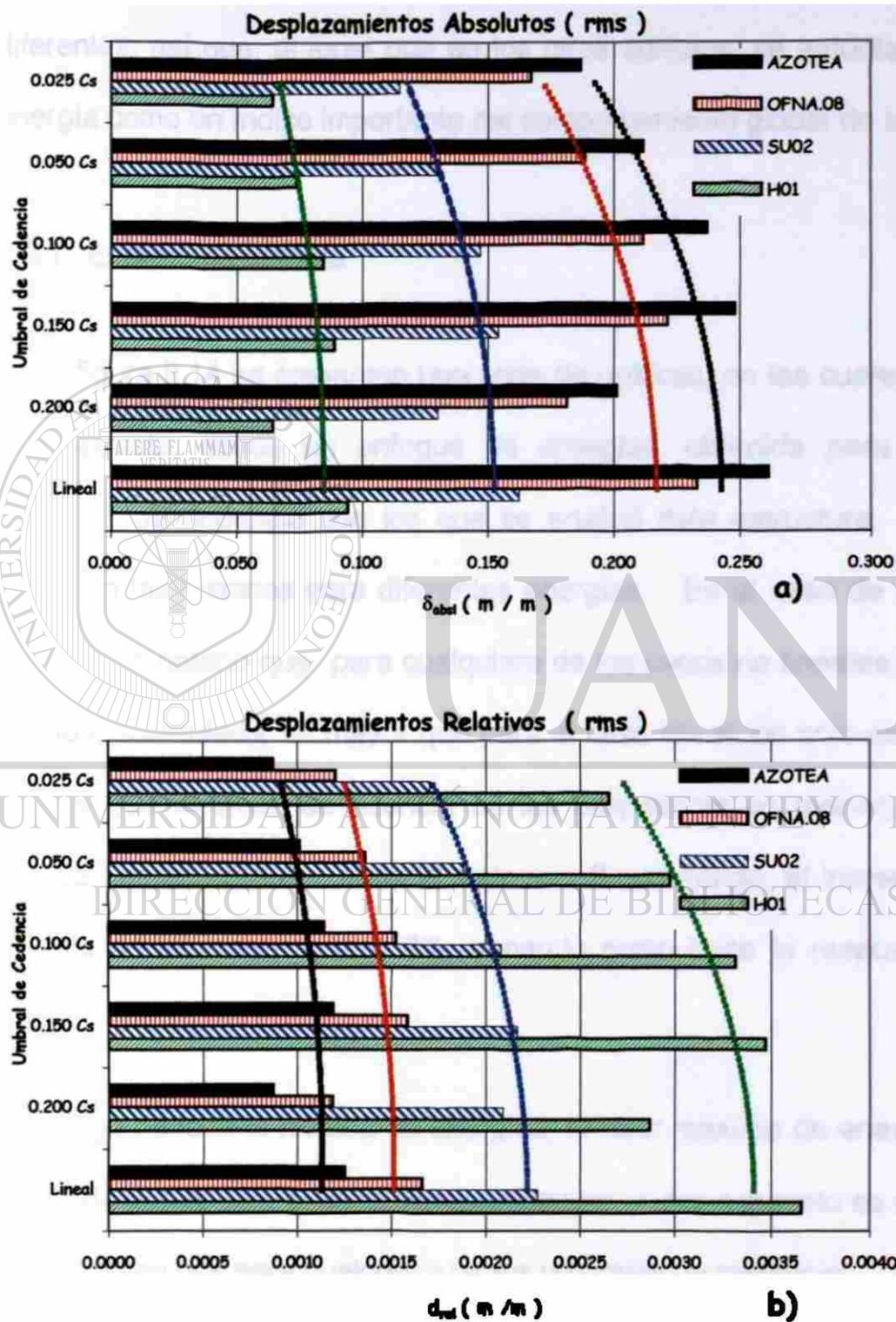


Fig. 8.13 Valores máximos de desplazamientos.

## 8.6 Energías

Hasta ahora se ha evaluado la respuesta del edificio, atendiendo a los cortantes en la base y los desplazamientos, ambos parámetros han mostrado tendencias diferentes; así que, al igual que en los otros edificios, se estudiará también la energía como un índice importante del comportamiento global de la estructura.

### 8.6.1 Energía de entrada

En la figura 8.14 se presentan una serie de gráficas, en las cuales se compara la respuesta, desde un enfoque de energías, obtenida para los distintos umbrales de cedencia con los que se analizó esta estructura. Las gráficas muestran las historias para diferentes energías. En el caso de la energía de entrada, es notorio que para cualquiera de los casos no lineales la energía de entrada, acumulada, es mayor que para el caso lineal; no sólo eso, sino que a medida que el límite de fluencia de los disipadores es menor, mayor es la cantidad de energía que entra al sistema. Sin embargo, el incremento en esa energía no es mayor que el 8%, tomando como base la respuesta del caso lineal.

A lo largo de toda la historia de energías, el valor máximo de energía es mayor a medida que el umbral de cedencia es mayor, y, por supuesto es mayor para el caso elástico que para cualquiera de los umbrales de cedencia.

Comparación de Energías (SCT `85 E-W )  
Torre Ángel

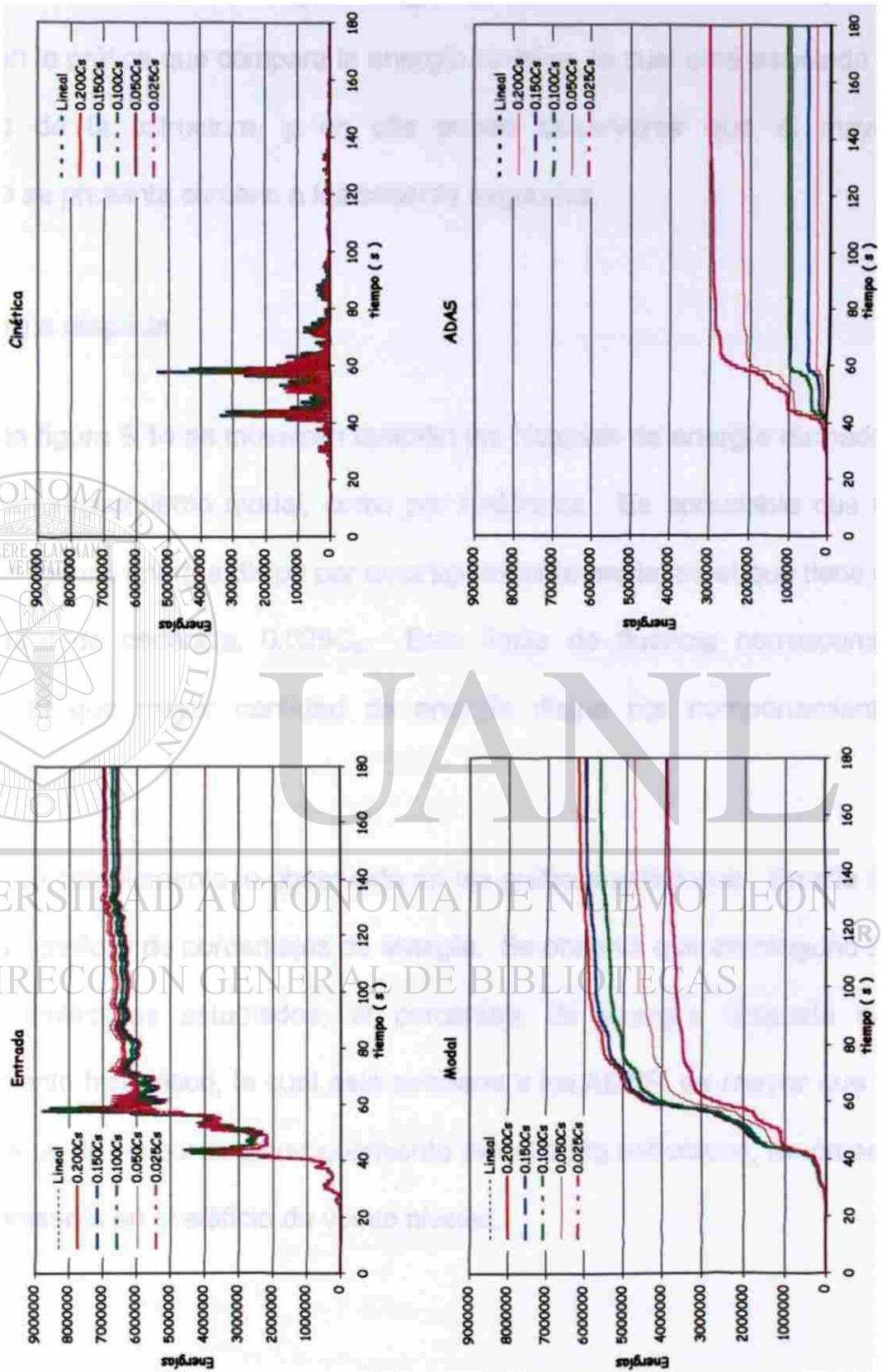


Fig. 8.14 Historias de energías (SCT `85 (E-W)).

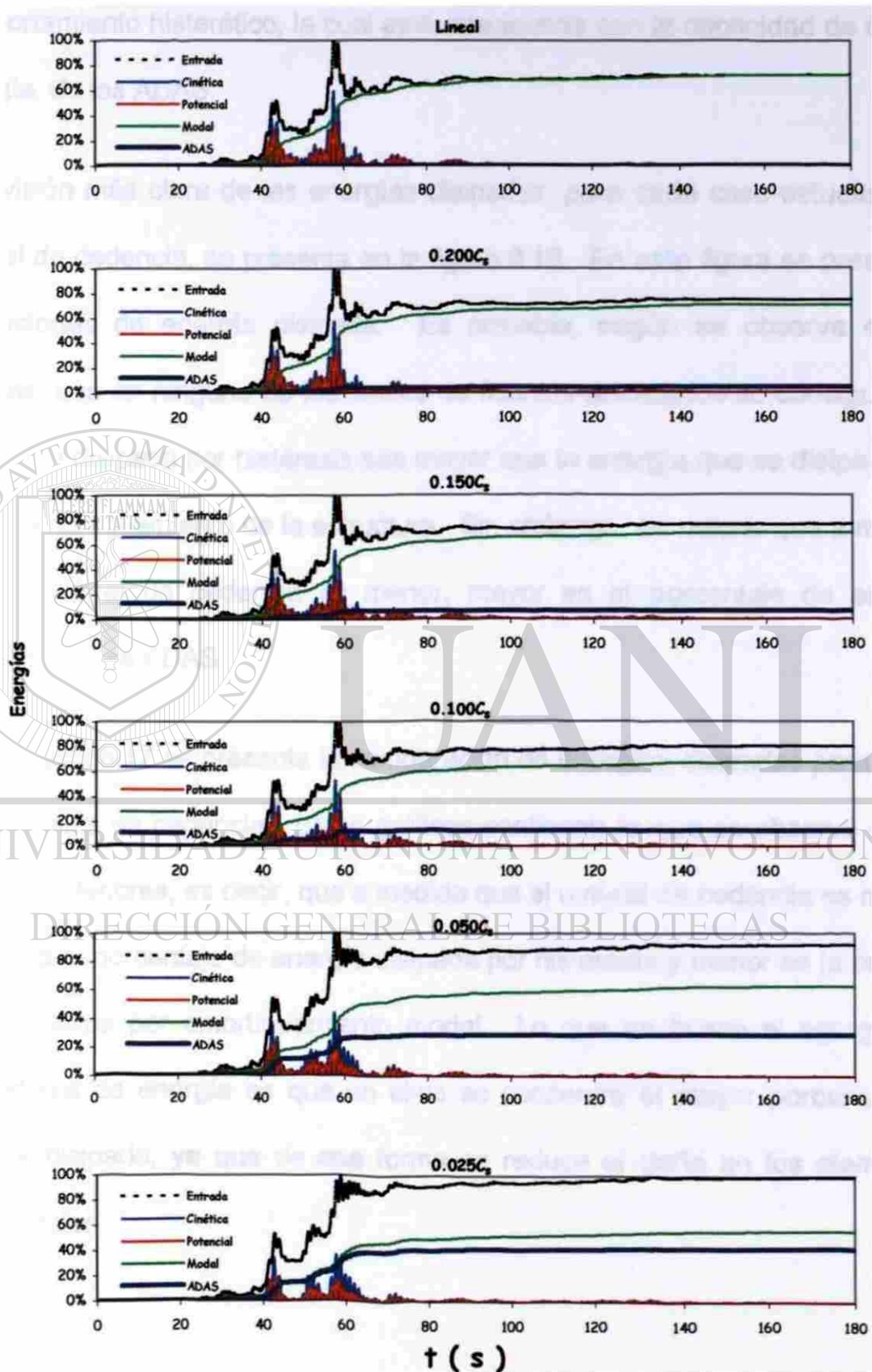
Sin embargo, este valor máximo se presenta, como era de esperarse, en la fase intensa del sismo, entre los 40 y 60 segundos de análisis. Esto se puede constatar en la gráfica que compara la energía cinética, la cual está asociada al movimiento de la estructura, y en ella puede observarse que el mayor movimiento se presenta cercano a los sesenta segundos.

### 8.6.2 Energía disipada

En la misma figura 8.14 se muestran también las historias de energía disipada, tanto por amortiguamiento modal, como por histéresis. Es apreciable que el sistema que menos energía disipa por amortiguamiento modal es el que tiene el menor umbral de cedencia,  $0.025C_s$ . Este límite de fluencia corresponde justamente al que mayor cantidad de energía disipa por comportamiento histerético.

La figura 8.15 complementa lo observado en las gráficas anteriores. En ella se presenta las gráficas de porcentajes de energía. Se observa que en ninguno de los casos inelásticos estudiados, el porcentaje de energía disipada por comportamiento histerético, la cual está asociada a los ADAS, es mayor que la energía que se disipa por el amortiguamiento modal de la estructura, fenómeno que sí se presentó en el edificio de veinte niveles.

### Energías ( SCT `85 E-W ) Torre Ángel



**Fig. 8.15** Porcentajes de energías (SCT `85 (E-W)).

Hay que recordar que la energía disipada por amortiguamiento modal es la que está asociada al daño que puede sufrir la estructura, no así la de comportamiento histerético, la cual está relacionada con la capacidad de disipar energía, de los ADAS.

Una visión más clara de las energías disipadas, para cada caso estudiado de umbral de cedencia, se presenta en la figura 8.16. En esta figura se presentan las historias de energía disipada. Es palpable, según se observa en las gráficas, que en ninguno de los límites de fluencia analizados se consigue que la energía disipada por histéresis sea mayor que la energía que se disipa por el propio amortiguamiento de la estructura. Sin embargo, es notorio que a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es el porcentaje de energía disipado por los ADAS.

En la figura 8.17 se presenta la comparación de energías disipadas para todos los umbrales de cedencia. Estas gráficas confirman lo que se observó en las gráficas anteriores; es decir, que a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es el porcentaje de energía disipada por histéresis y menor es la energía que se disipa por amortiguamiento modal. Lo que se busca al agregar los disipadores de energía es que en ellos se concentre el mayor porcentaje de energía disipada, ya que de esa forma se reduce el daño en los elementos estructurales.

### Energías Disipadas ( SCT '85 E-W ) Torre Ángel

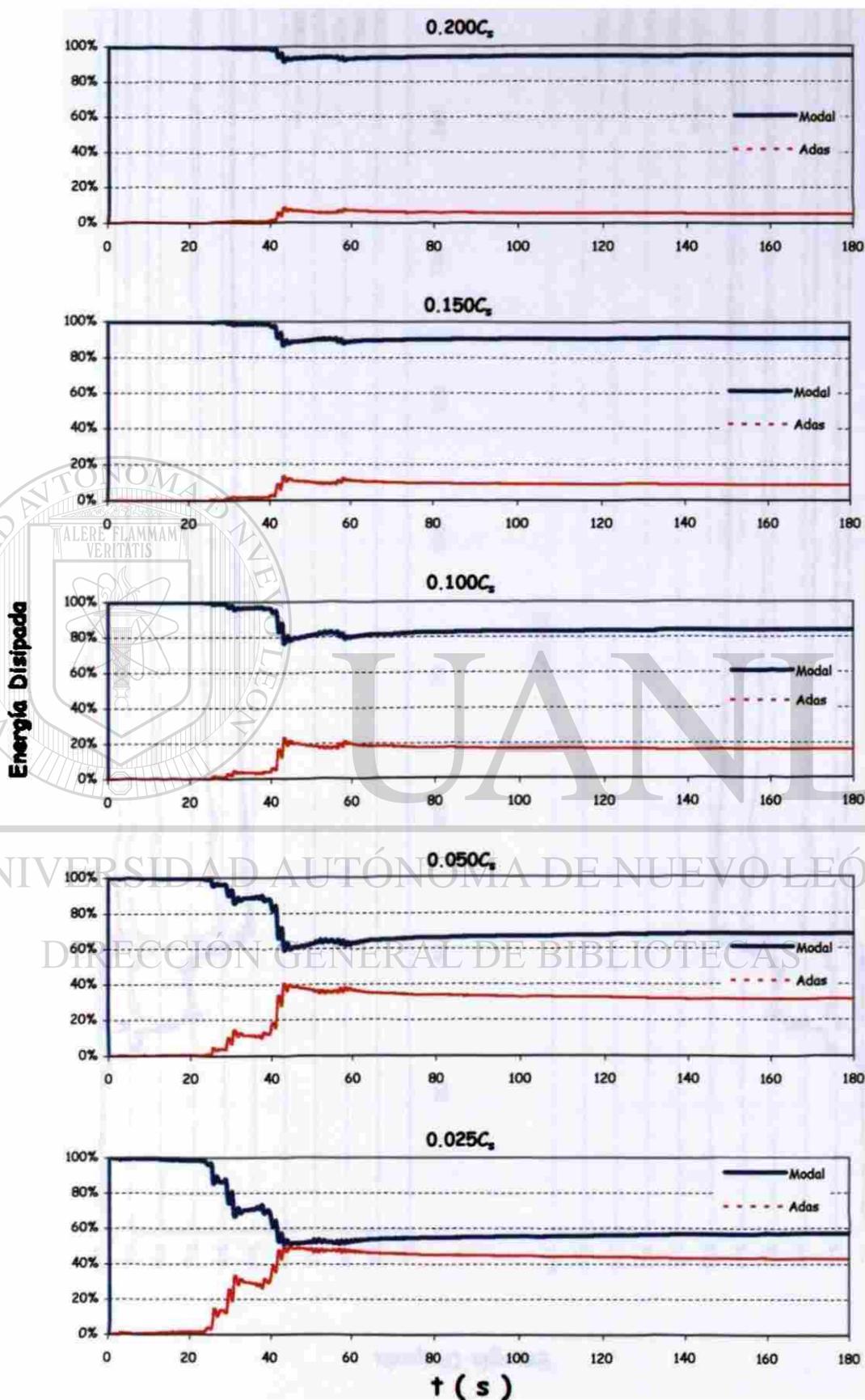
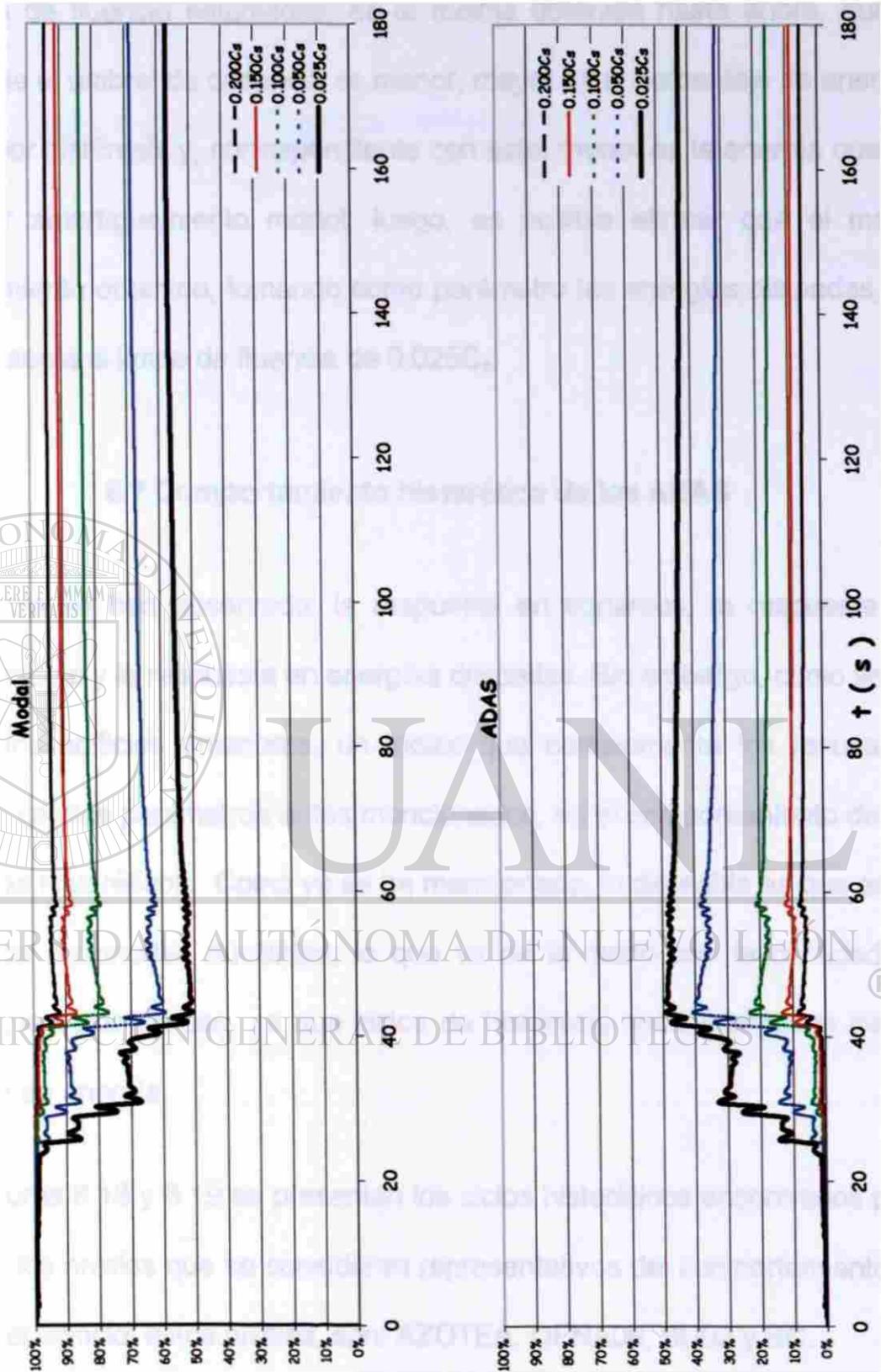


Fig. 8.16 Energías disipadas (SCT '85 (E-W)).

Comparación de Energías Disipadas (SCT '85 E-W)

Torre Ángel



Energía Disipada

Fig. 8.17 Comparación de energías disipadas (SCT '85 E-W)).

La tendencia observada en esta gráfica, que compara los resultados para todos los límites de fluencia estudiados, es la misma obtenida hasta ahora, que a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es el porcentaje de energía disipado por histéresis y, correspondiente con esto, menor es la energía que se disipa por amortiguamiento modal, luego, es posible afirmar que el mejor comportamiento obtenido, tomando como parámetro las energías disipadas, es el que presenta el límite de fluencia de  $0.025C_s$ .

### 8.7 Comportamiento histerético de los ADAS

Hasta ahora se han observado: la respuesta en cortantes, la respuesta en desplazamiento y la respuesta en energías disipadas. Sin embargo, como se ha visto en los edificios anteriores, un índice que complementa los resultados obtenidos con los parámetros antes mencionados, es el comportamiento de los disipadores histeréticos. Como ya se ha mencionado, lo deseable es que estos dispositivos desarrollen ductilidad, lo que va de la mano con la cantidad de energía que éstos disipan, ya que ciclos de histéresis anchos implican mayor disipación de energía.

En las figuras 8.18 y 8.19 se presentan los ciclos histeréticos encontrados para cuatro de los niveles que se consideran representativos del comportamiento de general del edificio; estos niveles, son: AZOTEA, OFNA08, SU02 y BC.

Comportamiento Histerético de los ADAS ( SCT '85 E-W )

Torre Ángel  
AZOTEA

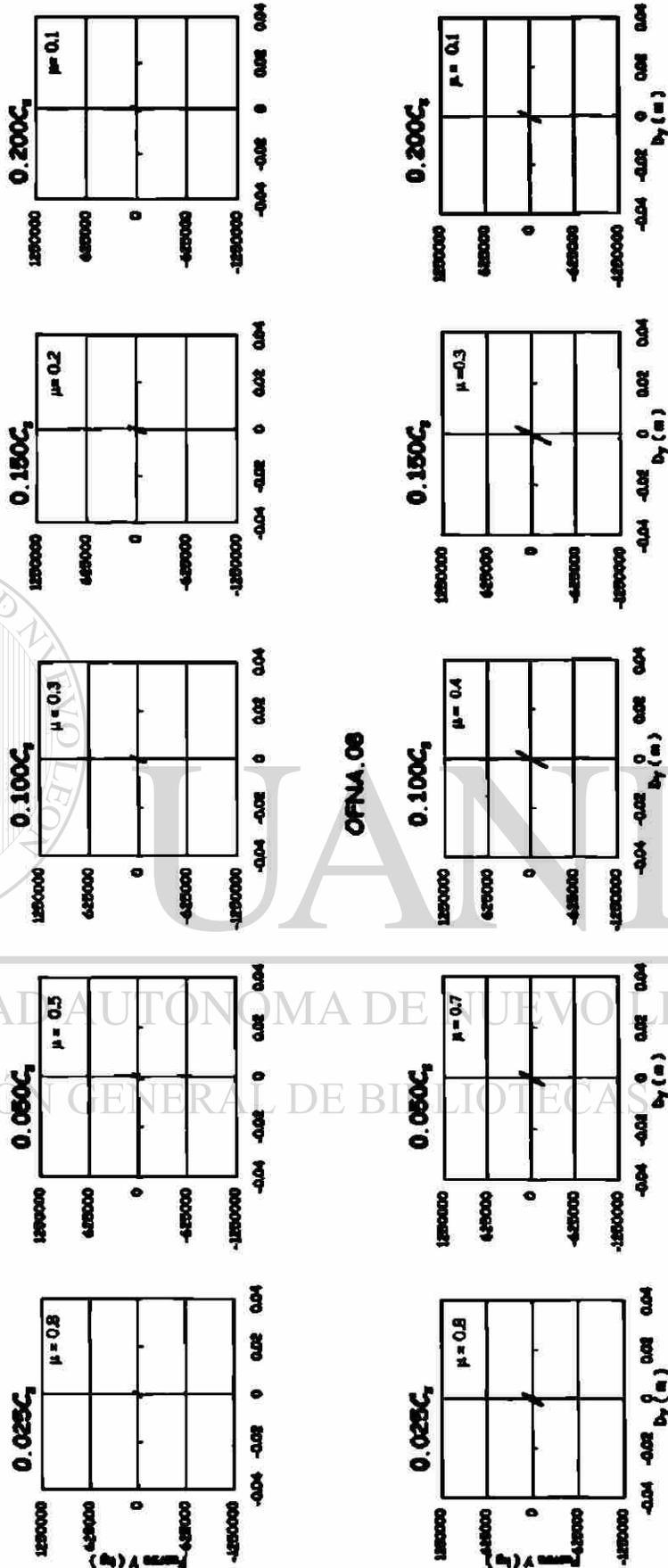
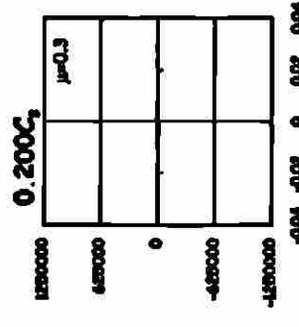
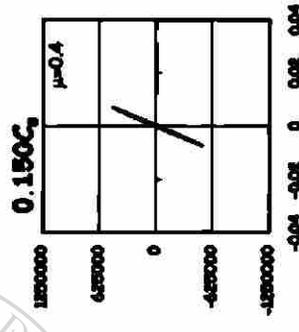
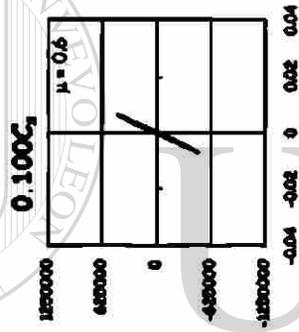
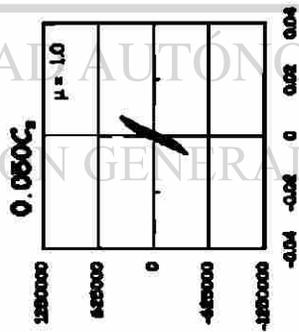
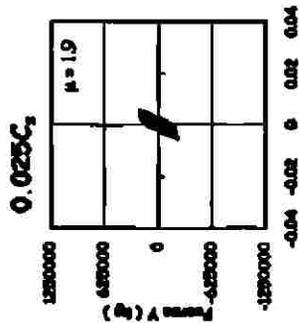


Fig. 8.18 Ciclos histeréticos en niveles superiores (SCT '85 (E-W)).

Comportamiento Histerético de los ADAS ( SCT `85 E-W )

Torre Ángel

6U02



BC

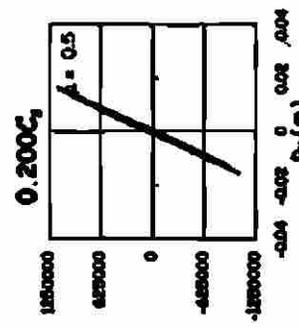
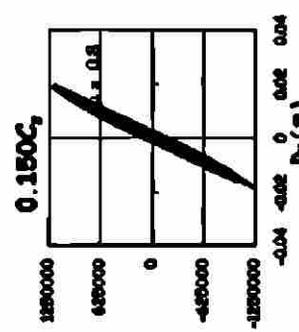
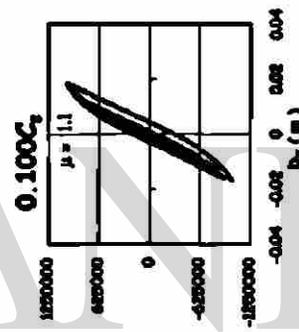
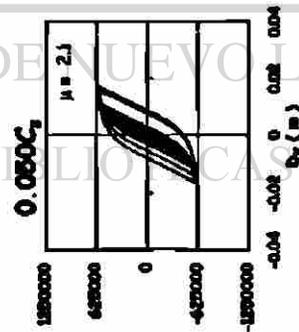
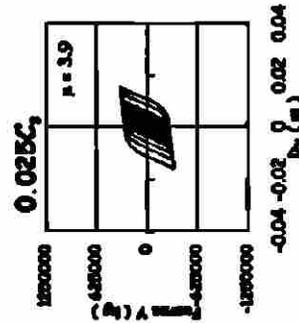


Fig. 8.19 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (SCT `85 (E-W)).

Según se aprecia en los ciclos histeréticos de los niveles antes mencionados, para los niveles inferiores, SU02 y BC, la ductilidad se presenta sólo si el umbral de cedencia es menor o igual que  $0.050C_s$ , ya que, para umbrales mayores, los valores de ductilidad encontrados son menores que 1, i.e.,  $\mu < 1$ , lo que se traduce como que no existe ductilidad, lo cual implica que no se disipa energía.

De acuerdo con lo observado en los ciclos histeréticos, es posible afirmar que el límite de fluencia que mejor se comporta, hablando de histéresis en los ADAS, es el de  $0.025C_s$ , ya que es el que mayor ductilidad desarrolla y las ductilidades encontradas son menores que 10, que es el valor de ductilidad recomendado para fines de diseño.

### 8.8 Análisis general de la respuesta

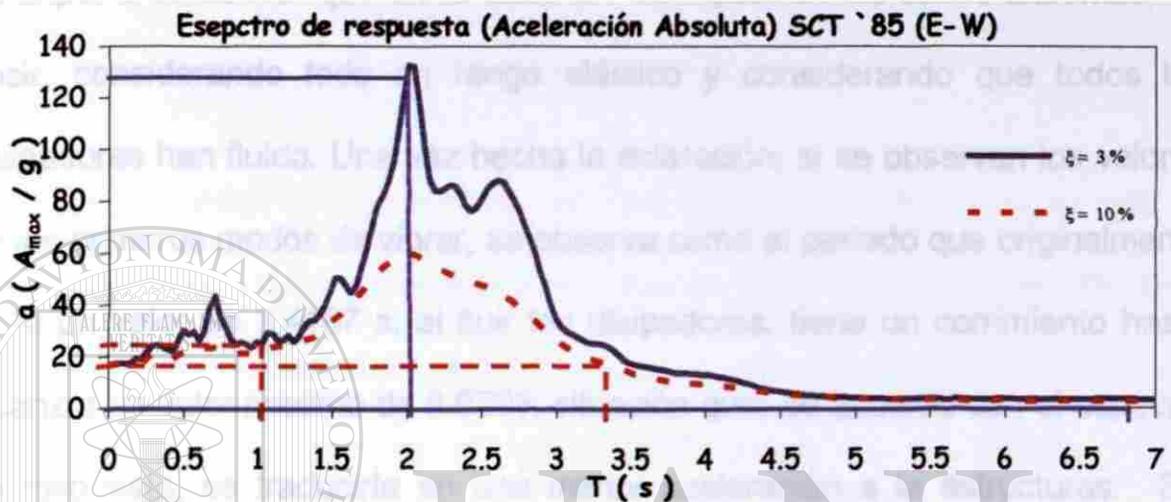
Hasta ahora, para esta estructura en particular, se ha encontrado que al cambiar los muros de concreto por diagonales provistas con disipadores de energía, en cuestiones de desplazamientos y energía se mejora el comportamiento del edificio. Sin embargo, el análisis de cortantes en la base mostró que para ninguno de los límites de fluencia estudiados se consiguió que la respuesta fuese menor, ni si quiera eliminando las crestas en las historias, al utilizar el valor en rms. Lo que pone de manifiesto que los picos que se pretendía eliminar, al utilizar este índice, son en realidad representativos del comportamiento de la estructura.

Si se observan detenidamente las historias de cortantes (figura 8.10), es posible advertir dos cosas. La primera es que al agregar dispositivos ADAS, la respuesta en cortantes es mayor que, para el caso lineal, y que el intervalo de tiempo en donde se obtiene esta tendencia está perfectamente localizado en la historia de cortantes, justo en la fase intensa del acelerograma utilizado para el análisis, entre 40 y 60 segundos. Y lo segundo que se percibe es que, si se cuentan los ciclos en un cierto intervalo de tiempo, para el caso lineal y el caso inelástico, es notorio que el periodo global del edificio es diferente. Este fenómeno se debe a que, cuando los ADAS se encuentran fluyendo, es decir, una vez que han incurrido en su rango inelástico, su rigidez cambia con respecto a la que tenían al encontrarse en el intervalo de comportamiento lineal.

Debido a la fluencia de los disipadores, el periodo aparente de la estructura cambia, y, por supuesto, su comportamiento es diferente que el del caso elástico, en el cual se toma como una verdad que el periodo equivalente de la estructura no varía en el tiempo, sino que se mantiene constante, lo cual no ocurre en la realidad, ya que la fluencia o la pérdida de rigidez, y por ende, el cambio en el periodo aparente de las estructuras es un hecho que ocurre al ser sometidas a sismos intensos.

Ha quedado claro entonces, como ya es sabido, que el periodo de la estructura juega un papel muy importante en la respuesta que ésta tiene ante cualquier excitación que sea una suma de armónicos; en este caso, esa fuente de excitación es el sismo.

El espectro de respuesta es una herramienta que aclara que para diferentes periodos se obtienen diferentes respuestas. En la figura 8.20 se presenta el espectro de respuesta elástico, para la componente este-oeste del sismo de SCT '85. Está claro que estructuras con un periodo cercano a 2 segundos son las que mayor respuesta tienen al excitarse con este sismo.



**Fig. 8.20** Espectro de respuesta elástico de SCT '85 ( E-W ).

En la figura se presenta el espectro de respuesta para dos diferentes fracciones del amortiguamiento crítico, 3 y 5 por ciento. Antes de hacer alguna observación respecto a la gráfica, es necesario ver la tabla siguiente; en ella se presentan los valores de los modos encontrados para la estructura de este caso, únicamente en la dirección de análisis. En la columna de la izquierda se presentan los modos para el caso elástico y en la de la derecha los modos considerando que la rigidez de los ADAS es el 25 por ciento de la rigidez que tenían originalmente; es decir, considerando que todos los disipadores han alcanzado su nivel de fluencia.

**Tabla 8.1**  
**Modos de vibrar .**

Modos	Elástico	Inelástico
1	3.4187	6.9205
2	1.0442	2.1073
3	0.5646	1.1290
4	0.4024	0.5886

Es importante aclarar que en la tabla 8.1 se muestran los casos extremos, es decir, considerando todo en rango elástico y considerando que todos los disipadores han fluido. Una vez hecha la aclaración, si se observan los valores de los primeros modos de vibrar, se observa como el periodo que originalmente tenía un valor de 3.4187 s, al fluir los disipadores, tiene un corrimiento hasta alcanzar un valor máximo de 6.9205; situación que, de acuerdo con el espectro de respuesta, se traduciría en una menor aceleración a la estructuras. Sin embargo, el segundo modo, que originalmente se encontraba en 1.0442 s, en el intervalo elástico, una vez que los ADAS han alcanzado su umbral de cedencia, es posible llegar como máximo al valor de 2.1073 s.

Si se observa el espectro de respuesta, es notorio que en este caso el corrimiento del periodo trae como consecuencia una amplificación en la respuesta y no una disminución.

Si bien es cierto que no todos los disipadores pueden fluir al mismo tiempo, el hecho del corrimiento del periodo, al fluir un cierto número de ADAS es inminente, como inminente también es que el segundo modo de vibrar se acerca a la zona de máxima respuesta. También es cierto, por definición, que

al fluir los ADAS, el amortiguamiento global de la estructura aumenta; sin embargo, la zona de máxima respuesta en el espectro permanece aunque el amortiguamiento se aumente, eso se puede constatar al comparar el espectro de respuesta para dos fracciones de amortiguamiento, que es justamente lo que se representa en la figura 8.20.

### 8.9 Comentarios

La creencia común que se maneja con respecto a los disipadores es que, al utilizarlos en la estructura, siempre mejoran el comportamiento de ella; más aún, existe la creencia de que al disipar energía mediante este tipo de mecanismos se favorece el comportamiento global de los edificios. Sin embargo, según los resultados obtenidos en este trabajo y para este caso en particular, se ha podido constatar que esas ideas no necesariamente son ciertas; ya que, como se pudo observar en este edificio, colocar disipadores de energía del tipo histeréticos no favoreció el comportamiento, sino que el edificio se vio afectado en vez de beneficiarse. Según lo observado en las historias de cortante, figura 8.11, fue notorio que al utilizar los disipadores en este edificio, los cortantes en la base aumentaron considerablemente, desde el doble hasta siete veces el cortante elástico, dependiendo del límite de fluencia de los disipadores.

Otro aspecto que sobresale de este estudio, es que, en general, en el medio profesional, se mantiene la idea de que los modos superiores no contribuyen de manera significativa, como lo hace el primer modo, al comportamiento de la

estructura. No obstante, al menos en este caso específico, se observó que es precisamente el segundo modo el que responde y domina el comportamiento de la estructura, hablando de los resultados en cortantes.

Si bien, es cierto que al utilizar los disipadores de energía se encontró que los desplazamientos son menores que para el caso lineal; además de que para ninguno de los límites de fluencia estudiados los desplazamientos relativos excedieron de 0.004, valor menor a 0.006, el cual es el máximo permitido por los códigos de diseño.

Por otro lado, y de acuerdo a lo que se ha observado en este trabajo es posible afirmar que al presentarse el fenómeno de histéresis, la cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal es menor, situación que no necesariamente se traduce como una mejora en el comportamiento global del edificio, sino que pueden existir algunos casos, como el estudiado en este capítulo, en que se perjudique a la estructura si se le provee de dispositivos disipadores de energía, en este caso los ADAS.

## CAPÍTULO 9

### CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la influencia que los disipadores de energía del tipo histerético, en particular los denominados ADAS, tienen en los edificios de diferentes periodos. Para esto, se estudiaron tres edificios, con diferentes características dinámicas, sujetos a excitaciones sísmicas de diferentes tipos, buscando, para cada caso, que la excitación hiciera que trabajaran los disipadores histeréticos. Para cada edificio estudiado se analizaron diferentes umbrales de cedencia de los disipadores. Después de hechos los análisis correspondientes es posible hacer las siguientes afirmaciones:

- iii)* Los disipadores histeréticos, si se hace un buen diseño, son una buena opción para disipar energía y evitar así que la disipación de energía corra por cuenta del amortiguamiento propio del edificio, lo que indudablemente se traduciría en daño a la estructura.
- iv)* Si se desea evitar o minimizar el daño permanente en los elementos estructurales adicionando mecanismos disipadores de energía, se debe buscar que estos disipen energía, para conseguir esto, los disipadores deben aportar un porcentaje significativo de la rigidez lateral total del edificio. En particular en este trabajo se encontró que al menos el cincuenta por

ciento de la rigidez lateral total debe ser proporcionada por los dispositivos disipadores. Para cada edificio en particular debe buscarse una proporción óptima de rigidez lateral entre los marcos y los disipadores de energía así como un umbral de cedencia de los disipadores tal que, para la proporción de rigidez analizada, se obtenga el comportamiento óptimo del edificio.

- v) Es posible, en los casos en que los disipadores no hagan que modos superiores sean excitados y que dominen en la respuesta de los edificios, encontrar un umbral óptimo de fluencia, para conseguir así que la estructura se comporte mejor ante las excitaciones sísmicas. Para los casos estudiados se encontró, por ejemplo que para el edificio de veinte niveles, el hecho de adicionarle dispositivos disipadores, benefició de manera significativa la respuesta del edificio, ya que al incluir este tipo de mecanismos se encontró que tanto los desplazamientos como los cortantes resultaron menores que para el caso elástico, situación que no se presentó en el edificio de cuatro niveles y mucho menos en la Torre Ángel. En este último caso, se puso en evidencia, que al adicionarle los mecanismos disipadores, no se abatió la amplitud de la respuesta en cortantes sino que se amplificó debido a la influencia de los modos superiores.

- vi) El hecho de que al agregar disipadores de energía se obtengan menores desplazamientos en el edificio no necesariamente significa que ocurrirá lo mismo con los cortantes, como pudo comprobarse en La Torre Ángel, estructura para la cual, en general, se consiguió que tanto los desplazamientos absolutos como los relativos fueran menores que los del

caso lineal, sin embargo se vio que para todos los umbrales de cedencia estudiados, los cortantes resultaron mayores que para el caso elástico.

vii) El enfoque energético complementa los resultados obtenidos en cortantes y desplazamientos y hace posible elegir, de una mejor manera, el punto de fluencia óptimo para los disipadores de energía.

viii) Es posible, en los casos en que los modos superiores participen de una manera importante en un análisis no lineal, que al emplear los disipadores se consiga que la respuesta se amplifique en vez de abatirse, lo que indudablemente empeoraría el comportamiento de los edificios en caso de sismo. Este fenómeno se presentó en la Torre Ángel, en la cual se observó que para cierta combinación de parámetros, un modo superior dominó en la respuesta del edificio y por esa razón, los cortantes resultaron ser mayores, para los casos inelásticos estudiados, que los que se obtuvieron en el caso lineal. Específicamente, este fenómeno se puede presentar en edificios de periodo largo, como el estudiado en el capítulo 8.

ix) El hecho de que se aumente el amortiguamiento de la estructura, al fluir los disipadores de energía, no es una garantía de que disminuirá la respuesta del sistema, ya que pueden presentarse las siguientes situaciones:

- En el caso en el que el periodo fundamental equivalente se encuentre en la zona ascendente del espectro de respuesta no se conseguirá abatir la respuesta, situación que se presentó en el edificio de cuatro niveles.

- En el caso de que los periodos de los modos superiores se aproximen al periodo dominante del movimiento sísmico, se obtendrán amplificaciones en la respuesta del edificio, situación que se presentó en el edificio estudiado en el capítulo 8.

x) Por último, se concluye que es necesario seguir estudiando el comportamiento de las estructuras provistas con dispositivos disipadores de energía, ya que si se diseñan adecuadamente, pueden ser una forma efectiva de abatir la respuesta de las estructuras ante excitaciones sísmicas.

Algunas sugerencias para continuar esta investigación son:

- Estudiar la respuesta de edificios asimétricos al usar mecanismos disipadores de energía en ello.
- Establecer criterios de reposición de los disipadores de energía. Tal vez en función del número de ciclos que estos pueden desarrollar o mediante el monitoreo a este tipo de sistemas durante los eventos sísmicos.

- 
- Elaborar análisis con y sin disipadores de energía, considerando no linealidad de los elementos estructurales (vigas y columnas), para evaluar el deterioro de la estructuras con el objetivo de establecer un criterio adicional para el usos de los dispositivos disipadores de energía.

## REFERENCIAS

- Aguinaga, F. Jara, J. M. (1993), Reducción de daños sísmicos mediante el uso de osciladores resonantes. Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.
- Arista, A. y Gómez, R. (1993), Respuesta sísmica de modelos estructurales con distribución asimétrica de Disipadores de energía. Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.
- Avilés, J. y Perez-Rocha, L. E. (1998), Site and soil-structure interaction in the Valley of Mexico. Soil Dynamics and Earthquake Engineering V. 17 pp. 20-39.
- Bazán, Enrique y Meli, Roberto. (1998), Diseño Sísmico de Edificios. Limusa, Noriega, México, 317 pp.
- Bozzo, Luis M. (2002), Análisis y diseño de estructuras equipadas con disipadores de energía. 1er CONGRESO VIRTUAL CISMID "TERREMOTO DE ATICO-PERÚ DEL 23 JUNIO 2001-UN AÑO DESPUÉS", Cuarta semana del 29 de Julio al 2 de Agosto del 2002, Lima, Perú. <http://www.ecie.org/sismoatico/semana4/020.pdf>.
- Cid, J. (1999), Zonificación Sísmica de la Ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos sísmicos locales. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, España.
- Constantinou, M. C., et. al. (1993), Fluid Viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation. Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, ATC 17-1, San Francisco California, pp. 581-592.

- Chan, et. al. (1993), Development of a design procedure for structures with added viscoelastic dampers. Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, V2, pp. 473-484.
- Chia-Ming, Uang Bertero, Vitelmo. (1998), Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake-resistant Design. Report No. UCB/EERC-88/18. Earthquake Engineering Research Center. College of Engineering, University of California, Berkeley, California.
- Chopra, A. (2001), Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Second Edition, Prentice Hall, 844 pp.
- Crisafulli, Francisco y Villafañe, Elbio, Espectros de respuesta y de diseño. Guía de Estudio, Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Sismorresistente.  
<http://200.9.147.88/catedras/civil/ISR-Espectros.pdf>
- Departamento del Distrito Federal. (1987), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial. México, D. F.
- Departamento del Distrito Federal. (1987), Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- Díaz, O. y Esteva, L. (1998), Confiabilidad de marco con disipadores. Informe de Investigación Elaborado para la DGAPA, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Espinoza, B. Fortunato. (1999), Determinación de características dinámicas de estructuras. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. 170 PP.
- Garza, T. Federico. (2001), Ventajas del sistema de aislamiento sísmico pendular de amortiguamiento rotular en edificaciones nuevas o por rehabilitar. Primer Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica. Bogotá, Colombia.

- Garza, T. Federico y Silva, F. L. González. (1999), Aislamiento Sísmico Pendular de una Nave de Prensa en Guadalajara, Jal, México. Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Morelia, Michoacán, México.
- Gómez, S. Ma. de la Consolación. (1994), Estudio paramétrico de estructuras con mecanismos disipadores. Tesis de Maestría, DEPMI, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- González, A. Ricardo y Noguez, L. Francisco. (1994), Respuesta teórica de un edificio con aisladores de base. Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, N° 46, 23-52, 1994.
- González, A. Ricardo. (1995), Análisis y predicción de comportamiento dinámico de estructuras usando identificación de sistemas y linealización Equivalente. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 90 pp.
- Jara, M. José. (1994), Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores. Revista de Ingeniería Sísmica, N° 47, 35-79.
- Jara, M. José, et. al. (1992), Seismic performance of buildings with energy dissipating systems. Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp. 2455-2460.
- Kelly, et. al. (1977), Practical soft story earthquake isolation system. Earthquake Engineering Research Center. Report No. UCB/EERC-77/27, Berkeley, California.
- Lermo, J. y Chávez-García F. (1994), Site effects evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 13, 413-423.
- Martínez, R. Enrique. (1998), Tres casos de estructuras de acero con disipadores pasivos de energía para zonas de alta sismicidad. Memorias del V Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Toluca, México.

- Ordaz, M., et. al. (1996), Criterios de diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos. Revista de Ingeniería Sísmica, N° 53, 25-35.
- Ramírez, C. Otilia. (1991), Respuesta experimental de una estructura metálica de dos niveles, provista de dispositivos disipadores de energía. Trabajo de Investigación, DEPTI, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Reinoso, A. Eduardo. (1996), Algunos resultados recientes sobre el peligro sísmico en la ciudad de México. Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, N° 53, 1-24.
- Rodríguez, Mario. (1991), Disipación de energía por terremotos en estructuras. Memorias VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Vol. I, 4.1-4.10.
- Ruiz, E. et. al. (1996), Análisis comparativo de dos marcos uno diseñado convencionalmente: y otro con dispositivos TADAS. Revista de Ingeniería Sísmica, N° 53, 37-48.
- Silva, G. Francisco L. (1993), Criterio para diseño sísmico de estructuras con disipadores de energía. Tesis Profesional, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Silva, G. Francisco L. y Ruiz, G. Sonia. (1994), Comparación de la respuesta sísmica de marcos con dispositivos disipadores de energía y sin ellos. Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, N° 48, 23-40.
- Sosa, Armando, et. al. (1991), Comportamiento de estructuras con aislamiento sísmico. Memorias VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Vol. I, 4.31-4.40.
- Sosa, G y Ruiz, S. E. (1992), Análisis estructural y costos de edificios con aisladores sísmicos. Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, N° 40, 11-28.
- Taylor Devices, Inc. <http://www.taylordevices.com/>

- Tena-Colunga, Arturo. (1993), Determinación analítica de la rigidez lateral de los dispositivos tipo ADAS. Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.
- Tena-Colunga, A., et. al. (1993), Evaluación sísmica de dos edificios de concreto reforzado reestructurados con dispositivos disipadores de energía Tipo ADAS. Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.
- Tena-Colunga, Arturo. (1998), Modelado analítico de edificios con disipadores de energía. Aplicaciones en proyectos de reparación. Memorias del V Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Toluca, México.
- Tena-Colunga, Arturo. (2000), Modelado analítico de edificios con disipadores de energía. Revista de Ingeniería Sísmica, N° 62, 29-62.
- Thyagarajan, Sh. Ravi. (1990), Modelling and Analysis of Hysteretic Structural Behavior. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 173 pp.
- Torres, M. Gilbert F. Importancia de la microzonificación sísmica de las principales ciudades del estado de Veracruz.  
<http://www.smsp.org.mx/rhigiene/docs/Importancia%20de%20la%20Microzonificaci%C3%B3n%20%28Torres%20Morales.%29.doc>
- Urrego, G. Olga Eugenia, et. al. (1993), Influencia de la distribución de disipadores de energía en la respuesta sísmica de un edificio. Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.
- Urrego, G. Olga Eugenia. (1994), Elección del mejor arreglo de disipadores en un marco estructural plano. Tesis de Maestría, DEPMI, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 144 pp.
- Vargas O. Efraín. (1993), Influencia de dispositivos de energía en el comportamiento dinámico de dos edificios. Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.

Vargas, O. Efraín, et al. (1991), Comportamiento sísmico de edificios con sistemas disipadores de energía. Memorias VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Vol. I, 4.41-4.51.

Villaverde, Roberto. (1993), Are Vibration Control Techniques a Competitive Alternative for the Seismic Design of Structures. Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jal., México.

Wakabayashi, M. y Martínez E. (1998), Diseño de Estructuras Sismorresistentes. Mc. Graw Hill, México.

Whittaker, et. al. (1989), Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements. Reporte UCB/EERC-89/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Wilson, E. y Habibullah, A. ETABS: Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems, Nonlinear Version 8.06. Computers and Structures Inc., Berkeley California. 1994-2002.

Xi, Zhu y Yongjun Ni, Strength Reduction Factor Spectra Based on Structural Damage Performance. College of Civil Engineering and Architecture, Northern Jiaotong University, Beijing, China,  
[http://cee.uiuc.edu/sst1/Beijing\\_Symposium/p-63/IV-11.Zhu.pdf](http://cee.uiuc.edu/sst1/Beijing_Symposium/p-63/IV-11.Zhu.pdf)

Zeevaert, Leonardo. (1991), Interacción suelo-estructura de cimentación. México, Ed. Limusa Noriega.

## **RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO**

**Efraín Grajales Vargas**

**Candidato para el Grado de**

**Maestro en Ciencias con Especialidad en Estructuras**

**Tesis: COMPORTAMIENTO DE LOS EDIFICIOS CON DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA.**

**Campo de Estudio: Dinámica Estructural (Ingeniería Sísmica)**

### **Biografía:**

**Datos Personales:** Nacido en México, D.F. el día 19 de Septiembre de 1975, hijo de Antonio Hugo Grajales Medina y Martha Vargas Vargas.

**Educación:** Egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana, del área de concentración de estructuras, grado obtenido Ingeniero Civil, titulado en Marzo de 1999, con dos proyectos terminales "Disipación de Energía en Sistemas de un Grado de Libertad" y "Adecuación de Diez Redes de Agua Potable en Comunidades del Estado de Chiapas". Obtuvo la *Medalla al Mérito Universitario* de su generación.

**Experiencia Profesional:** Auxiliar técnico en la Planta PRET de ICA-CU en el periodo de Julio a Septiembre de 1997. Ingeniero calculista en la empresa IPESA (1999). Desarrollo de diversos proyectos de ingeniería (junio del 2000 a julio del 2002). Becario en el departamento de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería Civil a partir de Agosto del 2002.

