
TABLA DE CONTENIDO

Parte	Página
PRÓLOGO	x
NOMENCLATURA	xvi
LISTA DE FIGURAS	xx
LISTA DE TABLAS	xxix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos y alcances.....	3
2. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
2.1 Parámetros a evaluar.....	6
2.2 Respuesta de los edificios.....	10
2.3 Hipótesis de esta investigación.....	10
3. DISPOSITIVOS REDUCTORES DE RESPUESTA.....	11
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
4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA Y EFECTOS DE SITIO.....	61
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

Parte

Página

9. CONCLUSIONES.....	286
REFERENCIAS.....	290

TABLA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS
(NOMENCLATURA)

a	aceleración
b	ancho de las soleras
b₁	ancho de las placas en sus extremos
b₂	ancho de la garganta de las placas
b_{1eq}	ancho equivalente de las placas en sus extremos
e	espesor de la solera
f	frecuencia en Hz
g	aceleración de la gravedad
h	altura de las placas
n	número de soleras en forma de "U"
s	segundos
t	espesor de cada placa
t	tiempo
rms	root mean square (raíz media cuadrática)

A	Zona sísmica
AB	Recta que va del punto "A" al punto "B"
AX	Recta que va del punto "A" al punto "X"

B	Zona sísmica
C	Zona sísmica
C_s	Coefficiente Sísmico
D	Zona sísmica
D	Desplazamiento
D_i	Desplazamiento i-ésimo
D_u	Desplazamiento último
D_y	Desplazamiento de fluencia
ADAS	Added Damping and Stiffness
A_r	Nivel de amplificación
E	Módulo de elasticidad del acero
E_D	Energía disipada por amortiguamiento modal
E_H	Energía disipada por histéresis
E_i	Energía de entrada
E_K	Energía cinética
F	Fuerza
F_s	Fuerza restitutiva
F_y	Fuerza de fluencia
F_u	Capacidad última del conjunto de soleras
F_{uDis}	Fuerza última del disipador
Hz	Hertz (unidad de medida 1/s)
K_{ADAS}	Rigidez lateral de los dispositivos ADAS
K_{MARCO}	Rigidez lateral tomad por los marcos

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

W **Peso total de la estructura**

α **Parámetro adimensional para localizar el "punto de recobre"**

β **Parámetro adimensional**

Δ **Desplazamiento**

Δ_y **Desplazamiento de fluencia**

μ **Ductilidad**

σ **Esfuerzo**

σ_y **Esfuerzo de fluencia**

σ_u **Esfuerzo último del acero**

θ **Ángulo de inclinación con respecto al eje horizontal de los**
contravientos

ξ **Fracción de amortiguamiento crítico**

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
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

Figura	Página
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

Figura	Página
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 repuesta 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

Figura	Página
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

Figura	Página
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 (El Centro); $K_{ADAS} = 25 \%$	201
6.60 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro); $K_{ADAS} = 25 \%$	202
6.61 Ciclos histeréticos en niveles superiores (El Centro); $K_{ADAS} = 50 \%$	203
6.62 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro); $K_{ADAS} = 50 \%$	204
6.63 Ciclos histeréticos en niveles superiores (El Centro); $K_{ADAS} = 75 \%$	205
6.64 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro); $K_{ADAS} = 75 \%$	206
6.65 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU `85(E-W)); $K_{ADAS} = 25 \%$	208

Figura	Página
6.66 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (CU `85(E-W)); KADAS = 25 %.....	209
6.67 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU `85(E-W)); KADAS = 50 %.....	210
6.68 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (CU `85(E-W)); KADAS = 50 %.....	211
6.69 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU `85(E-W)); KADAS = 75 %.....	212
6.70 Ciclos histeréticos 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

Figura	Página
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	Coefficiente 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

Figura		Página
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

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
2.1	Parámetros evaluados.....	7
8.1	Modos de vibrar.....	283