

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PROPUESTA DE CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO
CONFORME A REGLAMENTO PARA MARCOS NO
DÚCTILES DE CONCRETO REFORZADO CON
DISIPADORES HISTERÉTICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
P R E S E N T A

**HORACIO DE JESÚS
NANGULLASMÚ HERNÁNDEZ**

DIRECTOR DE TESIS: **DR. ARTURO TENA COLUNGA**

1.	DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA Y SU RELACIÓN CON LA FILOSOFIA ACTUAL DE DISEÑO.....	1
1.1	Generalidades.....	1
1.2	Filosofía de diseño sismorresistente tradicional.....	1
1.3	Diseño por desempeño.....	3
1.4	Control de la respuesta sísmica.....	5
1.4.1	Sistemas de control activo.....	6
1.4.2	Sistemas de control híbrido.....	8
1.4.3	Sistemas de control pasivo.....	9
1.5	Conclusiones.....	19
2.	ESTADO DEL ARTE EN INVESTIGACIÓN DE DISIPADORES POR HISTÉRESIS DEL MATERIAL.....	20
2.1	Introducción.....	20
2.2	Ámbito Mundial.....	20
2.2.1	Investigación Experimental.....	20
2.2.2	Investigación Analítica.....	24
2.3	Ámbito Nacional.....	26
2.3.1	Investigación Experimental.....	26
2.3.2	Investigación Analítica.....	30
3.	DESCRIPCIÓN DE LOS DISIPADORES HISTERÉTICOS.....	37
3.1	Introducción.....	37
3.2	Modelado elástico.....	37
3.2.1	Dispositivos Solera.....	39
3.2.2	Dispositivos ADAS.....	41
3.2.3	Dispositivos TADAS.....	44
3.3	Modelado para análisis no lineales.....	46
3.3.1	Rigidez efectiva de un disipador.....	46
3.3.2	Método de la diagonal equivalente.....	47
3.3.3	Método del elemento axial equivalente.....	48
4.	ESTADO DEL ARTE EN APLICACIONES DE DISIPADORES POR HISTÉRESIS DEL MATERIAL.....	51
4.1	Introducción.....	51
4.2	Ámbito Nacional.....	51
4.2.1	Reparación.....	51
4.2.2	Diseño Original.....	55

5.	METODOLOGÍA Y ALCANCES.....	57
5.1	Primera etapa de la investigación.....	57
5.1.1	Configuración estructural	58
5.1.2	Casos de estudio	61
5.1.3	Descripción de la metodología de diseño.....	63
5.1.4	Criterio para el diseño de los contravientos	65
5.1.5	Criterio para el diseño de vigas y columnas.....	67
5.2	Segunda etapa de la investigación.....	69
5.2.1	Criterio para la modelación de contravientos.....	70
5.2.2	Criterio para la modelación de vigas	71
5.2.3	Criterio para la modelación de las columnas	72
5.2.4	Criterio para la modelación de los disipadores.....	72
5.2.5	Criterio para el mecanismo de colapso.....	74
6.	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS ESTÁTICOS NO LINEALES	75
6.1	Diagramas de deformación inelástica de los disipadores de energía (μ_d)	76
6.1.1	Modelos de cinco niveles	77
6.1.2	Modelos de mediana altura (10 y 15 niveles)	80
6.1.3	Modelos de 20 niveles	83
6.1.4	Modelos de 25 niveles	86
6.1.5	Comentarios	89
6.2	Mapeos de fluencia	91
6.2.1	Modelos de 5 niveles	94
6.2.2	Modelos de 10 niveles	95
6.2.3	Modelos de 15 niveles	97
6.2.4	Modelos de 20 niveles	99
6.2.5	Modelos de 25 niveles	101
6.3	Curvas cortante-distorsión de entrepiso y globales	104
6.3.1	Modelos de 5 niveles	104
6.3.2	Modelos de 10 niveles	106
6.3.3	Modelos de 15 niveles	108
6.3.4	Modelos de 20 niveles	112
6.3.5	Modelos de 25 niveles	115

6.4	Envolventes de distorsiones	120
6.5	Parámetros obtenidos de las curvas cortante normalizado-distorsión	126
6.5.1	Factores de comportamiento sísmico Q	127
6.5.2	Factores de sobrerresistencia R	133
7.	CONCLUSIONES	135
	REFERENCIAS.....	139

Figura 1.1. Diagrama de estados límites de servicio y colapso	2
Figura 1.2. Diagrama representativo del modelado de un sistema estructural (adaptado de Tena 2010)	3
Figura 1.3. Matriz de los objetivos de diseño sísmico basado en el desempeño (Bertero 2002)	4
Figura 1.4. Una clasificación de los sistemas de control de la respuesta sísmica	6
Figura 1.5. Sistema de control de masa activa (Jara 1994)	7
Figura 1.6. Sistema de contraventeo activo (Jara 1994)	7
Figura 1.7. Edificio Sendagaya INTES con oscilador de masa híbrido	8
Figura 1.8. Aisladores sísmicos “Robinson” (http://www.seismicisolation.com/)	10
Figura 1.9. Comparación de la respuesta de edificios con y sin aislamiento basal (Adaptado de www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber)	10
Figura 1.10. Puente Rangitikei, Isla Norte de Nueva Zelanda (www.frankship.com/enimaintrunk.html)	11
Figura 1.11. Torre Taipei 101, Taiwán (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Taipei_101_Tuned_Mass_Damper.png)	12
Figura 1.12. Estructura con disipadores de energía	13
Figura 1.13. Una clasificación de los disipadores de energía	13
Figura 1.14. Disipador viscoelástico (tomado de Tena 2003)	14
Figura 1.15. Ejemplo de disipador viscoso (http://www.staaleng.com/seismic_strengthening.htm)	14
Figura 1.16. Ejemplo de disipador PALL (adaptado de http://www.ideers.bris.ac.uk/resistant/damping_friction.html)	15
Figura 1.17. Ejemplo de conexiones atornilladas friccionantes (Aiken 2006)	16
Figura 1.18. Disipador en U (Jara 1994)	16
Figura 1.19. Dispositivo ADAS (foto cortesía de Javier Alonso, Tena 2003)	17
Figura 1.20. Dispositivo TADAS (a) Comportamiento (Tsai <i>et al.</i> 1993) , b) Placas de acero (Tena 2003)	17
Figura 1.21. Relación Fuerza- Desplazamiento para disipadores dependientes del desplazamiento (Adaptado de Whittaker <i>et al.</i> 1999)	18
Figura 1.22. Relación Fuerza- Desplazamiento para disipadores dependientes de la velocidad (Adaptado de Whittaker <i>et al.</i> 1999)	19
Figura 2.1. Marco de acero rehabilitado con ADAS (Aiken <i>et al.</i> 1993)	21
Figura 2.2. Configuración del espécimen de prueba (Watabe <i>et al.</i> 1988)	22
Figura 2.3. Dispositivo experimental de prueba pseudodinámica	23
Figura 2.4. Hotel Hsin-Chu Ambassador, Taiwan (http://hotel.priceline.com.sg/en/taiwan/hsinchu/ambassador-hotel-_hsinchu.html)	24
Figura 2.5. a) Modelo para sistemas de un grado de libertad con disipadores metálicos, b) curva global cortante-distorsión	25
Figura 2.6. Prototipo a) Vista frontal, b) Vista en planta	26
Figura 2.7. Dispositivo de carga cíclica para el dispositivo “U”	27
Figura 2.8. Dispositivo Solera (foto cortesía de Ricardo González Alcorta, Tena 2003)	28
Figura 2.9. Dispositivo placa atiesada ensayado en Cenapred	28
Figura 2.10. Dispositivo tipo viga propuesto por Ortega	29

Figura 2.11. Dispositivo de carga para contravientos desadheridos UAM-A.....	30
Figura 2.12. Propuestas para estimar $R_{\mu\xi}$ y ξ 10%, a) Suelo firme b) Suelo blando (tomado de Arroyo y Terán 2002).....	31
Figura 2.13. Comparación de la plastificación de los elementos en marcos estudiados (Ruiz <i>et al.</i> 1996).....	32
Figura 3.1 Montado de disipadores de energía en marcos contraventeados (Adaptado de Tena 2000).....	38
Figura 3.2 Colocación y geometría de los dispositivos solera (Tena 2000).....	39
Figura 3.3 Elemento Solera (Tena 2000).....	40
Figura 3.4 Comparación de las geometrías idealizadas con la real para las placas de los dispositivos ADAS (Tena 2000).....	41
Figura 3.5 Geometría y comportamiento de un dispositivo TADAS.....	44
Figura 3.6 Curva típica bilineal fuerza-deformación de un dispositivo disipador de energía (Tena 2002).....	46
Figura 3.7 Modelo de la diagonal equivalente (Adaptado de Tena-Colunga 2002).....	48
Figura 3.8 Modelo del elemento axial equivalente.....	49
Figura 4.1. Edificio Izazaga 38- 40. (Google Maps).....	52
Figura 4.2. Reestructuración del Hospital de Cardiología del Centro Médico Siglo XXI (Tena 2003).....	52
Figura 4.3 Complejo de oficinas centrales del Instituto Mexicano del Seguro Social (http://maps.google.com.mx/).....	53
Figura 4.4 Reestructuración del edificio Torre Monterrey.....	54
Figura 4.5 Edificio SAGAR (fotos cortesía Gustavo Ayala y Raúl Jean, Tena 2003).....	54
Figura 4.6 Conjunto la Jolla (Cortesía de EMRSA, Tena 2003).....	56
Figura 5.1 Sistema de marcos con contraventeo y disipador.....	57
Figura 5.2 Configuración en planta de los marcos analizados.....	58
Figura 5.3 Configuración de los marcos planos analizados.....	58
Figura 5.4 Representación de los cambios de sección para los modelos estudiados. Los colores ilustran esquemáticamente los cambios de sección.....	59
Figura 5.5 Modelos evaluados de marcos planos con los diversos parámetros tomados en cuenta.....	62
Figura 5.6 Curva típica fuerza-deformación de un dispositivo con comportamiento bilineal (Tena 2000).....	65
Figura 5.7 Secciones rectangulares doblemente armadas.....	68
Figura 5.8 Representación del aporte de los contravientos a las columnas.....	68
Figura 5.9 Momento de diseño en columnas.....	69
Figura 5.10 Comportamiento inelástico de los contravientos (Prakash <i>et al.</i> 1992).....	71
Figura 5.11 Diagrama Momento-curvatura de una viga.....	71
Figura 5.12 Diagrama de Interacción Momento-Carga Axial.....	72
Figura 6.1 Idealización bilineal de los diagramas cortante-distorsión.....	75
Figura 6.2 Rotaciones plásticas acumuladas a) restringiendo en función de las ductilidades objetivo, b) sin restricciones.....	76
Figura 6.3 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de cinco niveles y $\vartheta=45^\circ$ para los diversos balances β	77

Figura 6.4 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de cinco niveles y $\vartheta=40^\circ$ para las diversas pendientes posteriores a la fluencia K_2	78
Figura 6.5 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de cinco niveles y $\vartheta=40^\circ$	79
Figura 6.6 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de cinco niveles y $\vartheta=45^\circ$	79
Figura 6.7 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 10 niveles y $\vartheta=40^\circ$	80
Figura 6.8 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 15 niveles y $\vartheta=40^\circ$	81
Figura 6.9 Comportamiento de una columna a flexotensión cuando $\beta=25\%$ y la inclinación del contraviento de soporte es de 40°	81
Figura 6.10 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 10 niveles y $\vartheta=40^\circ$	82
Figura 6.11 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 10 niveles y $\vartheta=45^\circ$	83
Figura 6.12 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 20 niveles y $\vartheta=40^\circ$	85
Figura 6.13 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 20 niveles y $\vartheta=45^\circ$	85
Figura 6.14 Rotaciones plásticas acumuladas para $\beta=25\%$: a) restringiendo en función de las rotaciones plásticas, b) restringiendo en función de las ductilidades objetivo.....	87
Figura 6.15 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 25 niveles y $\vartheta=40^\circ$	88
Figura 6.16 Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 25 niveles y $\vartheta=45^\circ$	89
Figura 6.17 Representación de matizados en colores cálidos.....	91
Figura 6.18 Representación de matizados en colores cálidos para las ductilidades μ_d desarrollado por los disipadores.....	92
Figura 6.19 Mapeos de fluencia para modelos de 10 niveles.....	93
Figura 6.20 Mapeos de fluencia para modelos de 5 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$, $\alpha=25\%$, a) $\beta=100\%$, b) $\beta=75\%$, c) $\beta=50\%$, d) $\beta=25\%$	94
Figura 6.21 Mapeo de fluencia para modelos de 5 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=25\%$	95
Figura 6.22 Mapeo de fluencia para modelos de 5 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=25\%$	95
Figura 6.23 Mapeo de fluencia para modelos de 10 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$	96
Figura 6.24 Mapeo de fluencia para modelos de 10 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$	97
Figura 6.25 Mapeo de fluencia para modelos de 15 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=50\%$	98
Figura 6.26 Mapeo de fluencia para modelos de 15 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$	99
Figura 6.27 Mapeo de fluencia para modelos de 20 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=50\%$	100
Figura 6.28 Mapeo de fluencia para modelos de 20 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$	101
Figura 6.29 Mapeo de fluencia para modelos de 25 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=50\%$	102
Figura 6.30 Mapeo de fluencia para modelos de 25 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$	103
Figura 6.31 Curvas cortante normalizado-distorsión para modelos de 10 niveles.....	104

Figura 6.32 Curva cortante normalizada-distorsión global para modelos de 5 niveles, $\alpha=75\%$, $\beta=25\%$, $K_2=0.05$	105
Figura 6.33 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 5 niveles	105
Figura 6.34 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 5 niveles	106
Figura 6.35 Curva cortante normalizado-distorsión global para modelos de 10 niveles, $\alpha=25\%$, $K_2=0.05$	106
Figura 6.36 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 10 niveles	107
Figura 6.37 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 10 niveles	108
Figura 6.38 Curva cortante normalizado-distorsión global para modelos de 15 niveles, $\alpha=25\%$	109
Figura 6.39 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 15 niveles	110
Figura 6.40 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 15 niveles	111
Figura 6.41 Curva cortante normalizado-distorsión global para modelos de 20 niveles, $\alpha=75\%$	112
Figura 6.42 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 20 niveles	114
Figura 6.43 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 20 niveles	114
Figura 6.44 Curva cortante-distorsión global para modelos de 25 niveles, $\alpha=50\%$	116
Figura 6.45 Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 25 niveles	118
Figura 6.46 Curva cortante-distorsión para el modelo de 25 niveles	120
Figura 6.47 Curvas envolventes de distorsiones de entrepiso modelos 15 niveles	121
Figura 6.48 Curvas envolventes de distorsiones de entrepiso, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$	123
Figura 6.49 Curvas envolventes de distorsiones de entrepiso, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$	124
Figura 6.50 Comparativa de curva envolventes de distorsiones de entrepiso y mapeo de fluencia asociado. Modelo 15N, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$	125
Figura 6.51 Factor de distorsión asociado a Δ_u para ambos ángulos de inclinación en los contravientos de soporte	126
Figura 6.52 Idealización bilineal de los diagramas cortante-distorsión	127
Figura 6.53 Factores de comportamiento sísmico Q para los modelos donde $\theta=45^\circ$	128
Figura 6.54 Factores de comportamiento sísmico Q para balances de rigideces óptimos	132
Figura 6.55 Factores de comportamiento sísmico R para balances de rigideces óptimos	134

DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA Y SU RELACIÓN CON LA FILOSOFÍA ACTUAL DE DISEÑO

1.1 Generalidades

La historia del ser humano y la construcción ha estado estrechamente ligada, desde la prehistoria, cuando el hombre buscaba protección contra los efectos de la intemperie. Conforme evolucionaban las ciudades y aumentaban en población, las necesidades de infraestructura también se hicieron necesarias y con ello el progreso técnico de las obras de ingeniería.

Uno de los mayores peligros para dichas obras civiles han sido los movimientos sísmicos, debido a que no se pueden predecir cuándo ocurrirán. La ciencia puede, mediante estudios probabilísticos, identificar los lugares con mayor riesgo donde un sismo puede ocurrir, con qué magnitud y su posible intensidad. Esta información se encuentra disponible y se espera que los ingenieros estructurales tengan la suficiente comprensión de los efectos de sitio en edificios para crear diseños que sean seguros para la intensidad máxima probable. Los códigos técnicos de edificación incorporan toda esta información (por ejemplo, Normas Técnicas Complementarias del Reglamento para las Construcciones del Distrito Federal, Manual de Obras Civiles, International Building Code, Eurocode, etc.), y requieren que dichas estructuras provean diseños apropiados para cada región.

En México el proceso de diseño está altamente vinculado a los diseños por sismo; la causa de ello es que gran parte de la República Mexicana se encuentra en alto peligro sísmico, especialmente la zona costera del Pacífico y su zona de subducción entre la Placa de Cocos y Norteamérica.

1.2 Filosofía de diseño sismorresistente tradicional

El proceso de diseño tradicional indica que para que un sistema estructural sea estable, debe resistir los efectos causados por las cargas gravitacionales (acciones permanentes y variables) que actúan en un sistema estructural y cumplir con los requisitos de servicio especificados. Dependiendo del lugar donde vaya a desplantarse la estructura, hay que considerar los efectos de las cargas accidentales (sismo, viento, oleaje o explosiones) que en algunas regiones la magnitud de éstas son tan grandes que sería antieconómico diseñarlas como sistemas con comportamiento elástico (Meli 2002).

Para diseño de edificios nuevos, su comportamiento sísmico se modela de una manera simple como si fuera un material lineal elástico, capaz de manejar las demandas de deformación y resistencia que le solicitan los movimientos sísmicos de magnitud baja, y para sismos moderados y fuertes se espera que las fuerzas y deformaciones sean mayores y que vengan acompañadas de un daño estructural determinado. Por tal razón, la estructura se diseña para soportar una sola vez el sismo de diseño, protegiendo la vida humana y el patrimonio (Bertero 2002).

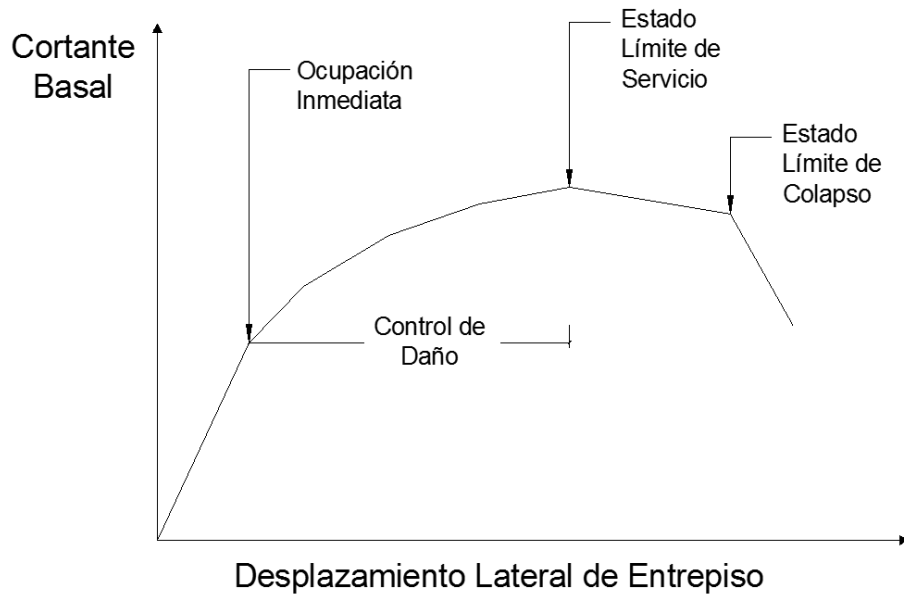


Figura 0.1. Diagrama de estados límites de servicio y colapso (adaptado de Bertero 2002)

En la figura 0.2 se presenta la curva obtenida de un análisis ante carga lateral monótona creciente o “pushover”, es un diagrama de la fuerza lateral o del cortante basal aplicado a una estructura y la deformación lateral resultante, dado que una estructura está sujeta a un patrón lentamente creciente y monótono de fuerzas laterales.

Dicho daño estructural asociado en estructuras de concreto con grietas y degradación de resistencia, particularmente, o su plastificación en el caso de metales y aleaciones, está ligado con la incursión del sistema estructural en el intervalo inelástico y se toma en cuenta reduciendo la demanda sísmica usando coeficientes de reducción de carga Q' y R relacionados con la ductilidad y el factor de las sobrerresistencias respectivamente como se muestra en la figura 1.2 (Ruiz 2002).

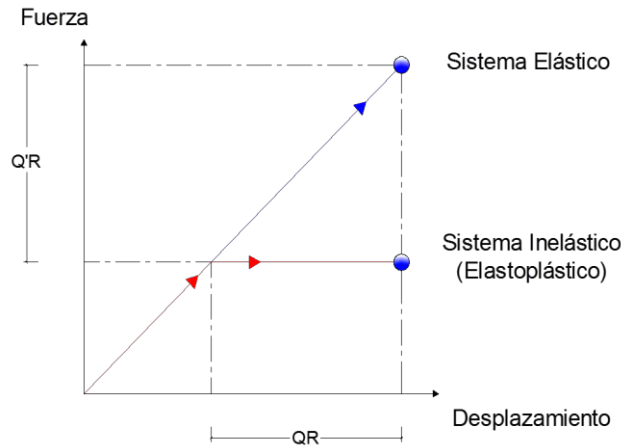


Figura 0.2. Diagrama representativo del modelado de un sistema estructural (adaptado de Tena 2010)

Esta filosofía ha sido bastante exitosa en el sentido de preservar la vida de sus ocupantes, pero ha resultado demasiado costosa en el ámbito de reparación por daño estructural y no estructural. Como consecuencia de los daños post-sismo observados en edificios alrededor del mundo (por ejemplo, Valparaíso 1985, Loma Prieta 1989, Northridge 1994, Kobe 1995), los ingenieros estructurales se han puesto a reflexionar acerca de la efectividad de los métodos de diseño convencionales y también han propuesto sistemas más competentes (Bertero 2002).

En el territorio nacional, después de los sismos ocurridos en el año de 1985 y de los diversos daños estructurales que se presentaron como consecuencia de ellos, los ingenieros mexicanos se interesaron en técnicas alternativas para proteger la integridad de los habitantes de dichas estructuras. Dos fueron los temas centrales de esos métodos innovadores para mejorar la respuesta ante eventos sísmicos: el diseño por desempeño y el control de la respuesta sísmica (Tena 2010).

1.3 Diseño por desempeño

A mediados de los años ochenta las corporaciones con negocios activos en áreas de sismicidad significativa comenzaron a pedir mejoras en las instalaciones corporativas con el objetivo de asegurar que pudieran reanudar rápidamente las operaciones comerciales que siguen a un sismo importante (Hamburger 2000). También, en respuesta a presiones de prestamistas hipotecarios, los dueños constructivos comenzaron a pedir mejoras que permitirían que los edificios fueran reparados después de terremotos importantes para que los costos de la

reparación no se excedieran de lo especificado a fracciones del costo del reemplazo total del edificio.

En 1992, la Agencia Federal de Administración de Emergencias (FEMA) contrató a un equipo del Consejo Sísmico de Seguridad de Edificios (Building Seismic Safety Council, BSSC), de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers, ASCE) y del Consejo de Tecnología Aplicada (Applied Technology Council, ATC) para desarrollar un sistema aplicable a nivel nacional de normas para la rehabilitación sísmica de edificios. Las tres organizaciones tenían a un equipo de casi 100 ingenieros e investigadores destacados de los Estados Unidos de América para trabajar en este proyecto, que culminó cinco años más tarde en la publicación del FEMA-273 (Hamburger 2000).

El primer paso en el uso de la metodología FEMA-356 (versión actualizada del documento original FEMA-273), es la selección de parte del equipo dueño-estructurista de una serie apropiada de objetivos de funcionamiento que sirvan como base para el diseño. Cada uno de estos objetivos consiste en especificar una cantidad permitida de daño, asociado a cierto nivel operacional, y de la magnitud del sismo para el cuál no se desea experimentar un mal funcionamiento.

En la figura 1.3 se definen cuatro niveles de funcionamiento: operacional, ocupación inmediata, seguridad de vida y colapso incipiente. Cabe señalar que los niveles de desempeño se deben definir no solamente en términos del daño a las estructuras, sino también en términos del daño a las componentes no estructurales y al contenido del edificio y considerando las consecuencias para los ocupantes (Bertero 2002).

Criterio Desemp. Nivel Sísmico	Operación Completa	Ocupación Inmediata	Seguridad de Vida	Colapso Incipiente
Frecuente	□	■	■	■
Ocasional	●	■	■	■
Raro	▲	●	■	■
Muy raro	○	▲	●	■

Diagonal de desempeño: Estructuras de Ocupación Estándar (de Frecuente a Muy raro)

Diagonal de estructura: Estructuras Esenciales/Peligrosas (de Frecuente a Muy raro)

Diagonal de estructura: Estructuras Críticas (de Ocasional a Muy raro)

Región de desempeño: DESEMPEÑO INACEPTABLE (área amarilla)

Figura 0.3. Matriz de los objetivos de diseño sísmico basado en el desempeño (Bertero 2002)

El nivel de funcionamiento de operación completa ocurre en el intervalo elástico. El nivel de funcionamiento de la ocupación inmediata también ocurre en un estado de la respuesta estructural elástica, y el daño estructural por lo tanto insignificante, pero anticipa que un cierto daño moderado puede ocurrir a los componentes no estructurales, tales que los sistemas mecánicos y eléctricos pueden no ser funcionales (Bertero 2002).

El nivel de seguridad de vida se define como el nivel de daño que ocurre en el 75% de la deformación lateral; por tal motivo, existe daño estructural y no estructural extenso, pero con un cierto margen contra el colapso. El nivel de colapso es un estado de daño completo, en el cual la estructura está al borde del derrumbe (Bertero 2002).

El ingeniero puede utilizar cualquiera de las cuatro técnicas analíticas existentes para la evaluación de este método como son: el método estático lineal, el método dinámico lineal, un método estático no lineal (pushover) o un método dinámico no lineal. El propósito del análisis es predecir las demandas de deformación en los componentes estructurales individuales en un objetivo global del desplazamiento. Este objetivo global de desplazamiento representa la deformación lateral total inducida en la estructura para el sismo de diseño.

1.4 Control de la respuesta sísmica

El control de la respuesta sísmica en estructuras para mejorar su funcionamiento durante movimientos del terreno fue propuesto hace más de un siglo, pero ha sido en la década de los 70's que los ingenieros se han interesado por esta técnica de control como una alternativa tanto para la reparación de estructuras dañadas como para el diseño de nuevas (Tena 2011). Estos sistemas tienen hasta la fecha un sinnúmero de pruebas experimentales y sólo las más competentes tienen aplicaciones prácticas en diferentes países. Aunque existen un sinnúmero de sistemas de control, se pueden clasificar dichos sistemas dentro de tres grandes grupos, como se muestra en la figura 1.4.

El uso ahora de estos sistemas se encuentran en muchos de los países afectados por los sismos, como en Italia, Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos y México, y se han demostrado las ventajas significativas al adaptar a las estructuras existentes, o diseñando las estructuras de alta importancia tales como hospitales, instalaciones de defensa, y puentes críticos, para eventos de gran magnitud.

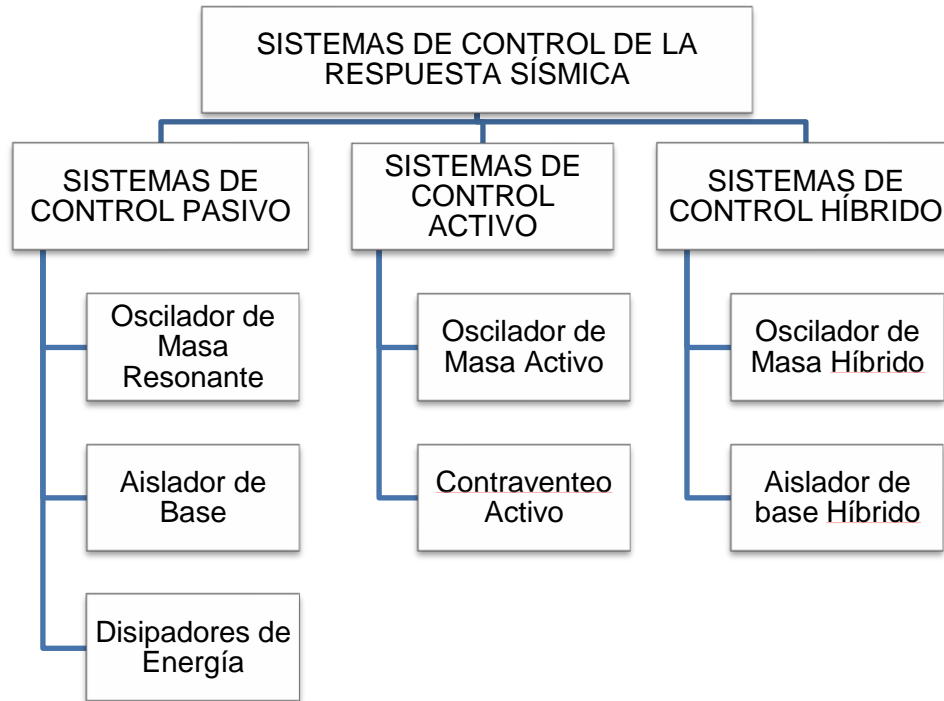


Figura 0.4. Una clasificación de los sistemas de control de la respuesta sísmica

1.4.1 Sistemas de control activo

Un sistema de control activo se basa en el principio de disipar las vibraciones de una estructura mediante la aplicación de fuerzas externas. El movimiento se detecta mediante la inclusión de sensores, en varias partes de la estructura, que miden la respuesta de esta y de las excitaciones externas. Los sensores se conectan a una computadora que a su vez envía señales a los actuadores que aplican fuerzas a la estructura con la finalidad de contrarrestar el movimiento de la mejor manera posible (Jara 1994).

Esta técnica ha tenido éxito para controlar la respuesta amplificada de edificios muy altos ante vientos, en ciudades como Nueva York, Chicago o Tokio. Sin embargo, su aplicación a sismos es muy compleja, pues a diferencia de lo que sucede con los vientos, las acciones varían en intensidad y sentido casi instantáneamente. La complejidad de este sistema hace casi utópico crear un software capaz de indicar como la estructura debe modificar su respuesta instantáneamente a la excitación presentada, pero es aún más complejo que los sistemas electromecánicos ejecuten la decisión del software de manera adecuada (Tena 2011).

Este sistema es una modificación del sistema pasivo con osciladores resonantes del cual se hablará con más detalle posteriormente. El movimiento de la masa sobre el último nivel de la estructura es controlado 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 (figura 1.5). A diferencia del sistema pasivo, el activo controla el movimiento del edificio para temblores de banda angosta y ancha. La primera aplicación de este sistema se hizo en Japón para un edificio de acero de 11 niveles (Jara 1994). Una de las principales desventajas de estos sistemas es que no tolera fallas de ningún tipo y la demanda de energía que se requiere para aplicar las fuerzas de control es demasiada grande.

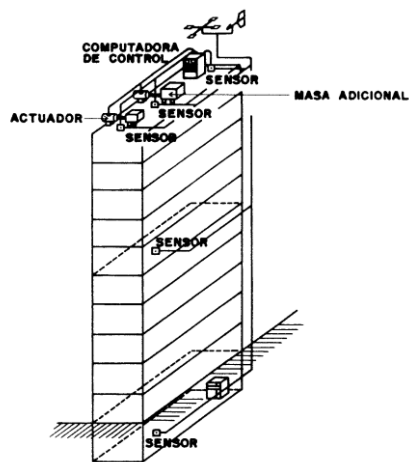


Figura 0.5. Sistema de control de masa activa (Jara 1994)

El contraventeo activo como su nombre lo indica son contravientos colocados concéntricamente y abarcan uno o varios niveles de la estructura (figura 1.6). Su principal función consiste en modificar las propiedades dinámicas de la estructura para alejar su periodo fundamental de las frecuencias dominantes que se presentan en un sismo, para cada instante de este, y con ello evitar el efecto de resonancia en la estructura. Una de las alternativas planteadas es modificar la inclinación del contraviento a cada paso de tiempo, lo que permitiría cambiar la rigidez de los marcos (Jara 1994).

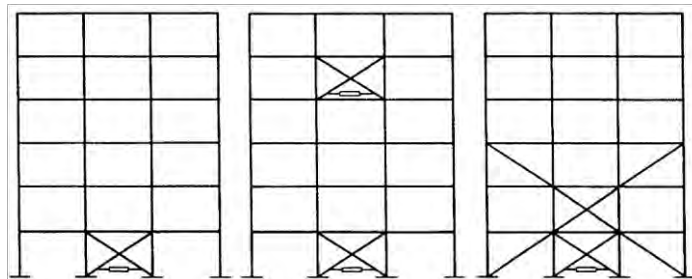


Figura 0.6. Sistema de contraventeo activo (Jara 1994)

1.4.2 Sistemas de control híbrido

Un sistema de control híbrido es aquél que emplea una combinación de dispositivos activos y pasivos. Su principio está basado en que este tipo de dispositivo pueda aliviar algunas de las limitantes que existen cuando cada sistema actúa por separado. Adicionalmente un sistema de control híbrido es más confiable que un sistema de control exclusivamente activo. La investigación en esta área ha presentado un crecimiento rápido a causa del interés en estos sistemas y a los esfuerzos combinados de Japón y los EUA principalmente, enfocándose principalmente en dos de ellos: el oscilador de masa híbrido y el aislador semi-activo (Housner *et al.* 1997).

El sistema más común de este tipo usado para aplicaciones de escala normal en ingeniería civil son los osciladores de masa híbrida, y estos son una combinación del oscilador de masa resonante y un actuador de control activo. La capacidad de este dispositivo para reducir las respuestas dinámicas de la estructural recae principalmente en el movimiento natural del oscilador de masa resonante. Las fuerzas del actuador se emplean para aumentar la eficacia del oscilador híbrido y para aumentar su rigidez a los cambios de las características dinámicas de la estructura. Un ejemplo de la aplicación de este sistema fue instalado en el edificio de Sendagaya INTES en Tokio en 1991 (figura 1.7). El oscilador de masa híbrido fue instalado en el onceavo piso y consta de dos masas para controlar los movimientos transversales y torsionales de la estructura, mientras que los actuadores hidráulicos proporcionan las características de control activo (Soong y Spencer 2002).

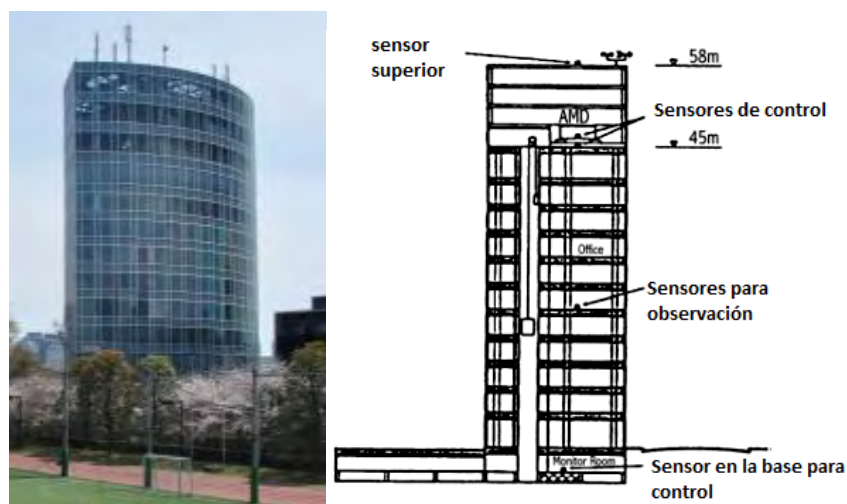


Figura 0.7. Edificio Sendagaya INTES con oscilador de masa híbrido
(Adaptado de Soong y Spencer 2002).

Otra clase de sistema de control de este tipo que se ha investigado es el aislamiento de base híbrido, el cual consiste en un sistema pasivo de aislamiento de base combinado con un actuador. No obstante, los sistemas de aislamiento de base son sistemas pasivos y su capacidad se ve limitada para adaptarse a las demandas de cambio para la reducción de la respuesta estructural. Con la adición de un dispositivo de control activo a la estructura aislada en su base, se puede alcanzar un alto nivel de desempeño sin un aumento substancial en el costo, siendo muy atractivo desde un punto de vista práctico. El aislamiento por sí mismo puede reducir las distorsiones de entrepiso y la aceleración absoluta de la estructura, pero con un desplazamiento absoluto considerable. La combinación del aislamiento de base con un sistema de control activo, además de disminuir las distorsiones de entrepiso, al mismo tiempo limita el máximo de desplazamiento de la base (Housner *et al.* 1997).

1.4.3 Sistemas de control pasivo

Experimental y analíticamente se ha demostrado que una estructura es capaz de disipar la energía que le suministra un sismo de distintas maneras. Según el planteamiento energético presentado por Uang y Bertero (Tena 2011) la ecuación de conservación de la energía en la estructura está dada por:

$$E = E_c + E_e + E_h + E_d \quad (1.1)$$

donde:

E = energía de entrada del sismo que le induce a la estructura

E_c = energía cinética del movimiento de la estructura

E_e = energía de deformación elástica (recuperable)

E_h = energía disipada por deformación de la estructura, (no recuperable y ligada a daño estructural)

E_d = energía disipada por amortiguamiento adicional

Como se mencionó anteriormente, no es económico diseñar a las estructuras para resistir sismos intensos dependiendo exclusivamente de aquellas energías que no causan daño a los elementos estructurales (E_c y E_e). En el diseño sismo-resistente tradicional se hace uso de la energía disipada por la deformación de la estructura (articulaciones plásticas en vigas), producida por el comportamiento inelástico de la misma.

Es por este motivo que se ha estado estudiando a los sistemas de control para que maximicen la energía disipada por amortiguamiento adicional (E_d), con

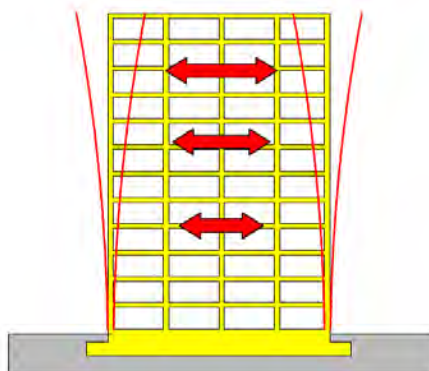
elementos de diseño especial colocados en lugares estratégicos y en consecuencia minimizar E_h (Martínez y Méndez 2004, Tena 2011). Uno de los sistemas de control pasivo más conocido y de los primeros en utilizarse, es el **aislamiento de base**, el cual desacopla parcialmente a la estructura del movimiento del terreno producido por el sismo. Este sistema consta de una montura flexible que permite prolongar el periodo fundamental del sistema aislador-estructura; un medio que aporte rigidez lateral ante bajos niveles de carga, tales como las debidas a la acción del viento y/o a sismos de pequeña o moderada magnitud, pero también que sea capaz de soportar la rigidez y resistencia suficiente ante cargas verticales (figura 1.8)



Figura 0.8. Aisladores sísmicos “Robinson” (<http://www.seismicisolation.com/>)

El objetivo de este sistema es el disminuir las fuerzas de inercia en la superestructura mediante el incremento del periodo y del amortiguamiento de la estructura desplazada en terreno firme. Esto hace que la estructura permanezca esencialmente elástica durante un sismo de magnitud considerable concentrando el comportamiento no lineal exclusivamente al sistema de aislamiento. Con respecto al diseño tradicional existen reducciones considerables en las respuestas dinámicas de la estructura, en el cortante basal, en las distorsiones de entrepiso, aceleraciones de piso, efectos de torsión, etc, (figura 1.9)

Edificio sin sistema de aislamiento



Edificio con sistema de aislamiento

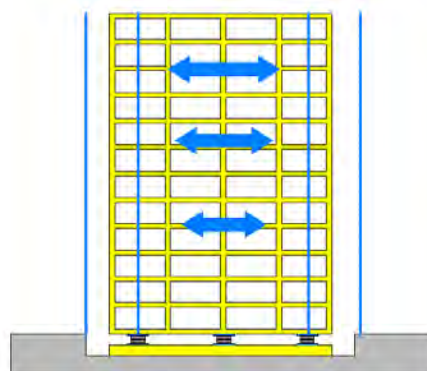


Figura 0.9. Comparación de la respuesta de edificios con y sin aislamiento basal (Adaptado de www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber)

La era moderna del aislamiento sísmico es considerada por muchos haber comenzado a inicios de los 70 en Nueva Zelanda con la investigación liderada por los profesores Skinner y Robinson en la Universidad de Canterbury (Tena 2011) que finalmente se concretó con la construcción de un puente a través del río del sur de Rangitikei en la región central de la isla del norte de ese país (figura 1.10). Actualmente este sistema se ha empleado en países de alta incidencia sísmica tanto en estructuras nuevas como en edificios históricos con valor cultural.



Figura 0.10. Puente Rangitikei, Isla Norte de Nueva Zelanda
(www.frankship.com/enimaintrunk.html)

Los aisladores más comunes son los elastoméricos (laminados y laminados con corazón de plomo), amortiguadores histeréticos de acero, amortiguadores por extrusión de plomo, amortiguadores deslizantes, de teflón, de fricción y de acción pendular (Tena 2011).

Algunas de las limitaciones que hay que tomar en cuenta en el diseño e implantación de este sistema consisten en que su capacidad de reducir la respuesta estructural depende de la frecuencia de excitación y del tipo de terreno de desplante, que deben ser suelos firmes o roca de preferencia. El caso omiso a esta primicia incurrirá en la incertidumbre del intervalo de periodos donde se presentaran las amplificaciones dinámicas, además de que pueden existir asentamientos diferenciales.

Otra técnica de control pasivo son los **osciladores de masa resonante**, importada del control de vibración de maquinarias, la cual consiste en reducir la respuesta dinámica de la estructura original transfiriendo parte de la energía vibratoria al oscilador resonante, que consiste en una masa adicional relativamente pequeña, colocada por lo general en los últimos pisos de la estructura, conectada especialmente por medio de un resorte en un extremo y por

el otro a un dispositivo amortiguador. Este sistema fue propuesto originalmente por Frahm en 1909 (Tena 2011).

En 1956 Den Hartog demostró que para un sistema de dos grados de libertad, si el periodo de la carga coincide con el periodo de vibrar del segundo nivel, 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. Al existir 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 (Jara 1994).

Los trabajos descritos anteriormente fueron desarrollados para el control de vibración de maquinarias, donde la frecuencia de operación de la maquinaria es conocida; sin embargo, los edificios están sometidos a cargas accidentales con una amplia gama de frecuencias, es decir, no son movimientos armónicos simples. En los últimos 25 años se han conducido varias investigaciones para estudiar la aplicación de osciladores resonantes ante sismo o viento. En México, este tema ha sido estudiado por Jesús Iglesias en 1989 en la UAM, Sonia Ruiz en la UNAM, Paniagua y colaboradores en 1989, José Manuel Jara en la U. Michoacana en 1993 y Roberto Villaverde en la década de los 80's principalmente (Tena 2011).

Uno de los edificios más representativos en el cual se ha implantado este sistema es la torre Taipei 101 (figura 1.11). Su construcción inició en 1997 y se concluyó seis años después. Su oscilador de masa resonante está formado por una gigante bola dorada de acero de 660 toneladas de peso compuesta de planchas metálicas y se encuentra suspendida sobre tensores desde la parte alta del piso 88 y en su base sujeta con bombas hidráulicas. Según sus técnicos, puede soportar sismos de hasta 7.0 grados en la escala de Richter y vientos de más de 450 km/h (Tarp 2005).



Figura 0.11. Torre Taipei 101, Taiwán
(http://en.wikipedia.org/wiki/File:Taipei_101_Tuned_Mass_Damper.png)

Los **dispositivos disipadores de energía** son dispositivos ubicados en el interior de la estructura instalados comúnmente en elementos de contraventeo (figura 1.12). La filosofía de los sistemas estructurales con disipadores de energía consiste en distribuir demandas de ductilidad en una forma racional, formando puntos especiales que disipen energía en forma estable que se puedan reparar. Su uso es eficiente en edificios de pequeña, mediana y gran altura, aunque se presenta una dispersión significativa en precios según la tecnología usada. La eficacia de estos sistemas dependen de la cantidad de dispositivos, su ubicación en el sistema estructural, tipo de disipador y su adecuado diseño (Gómez 2007).

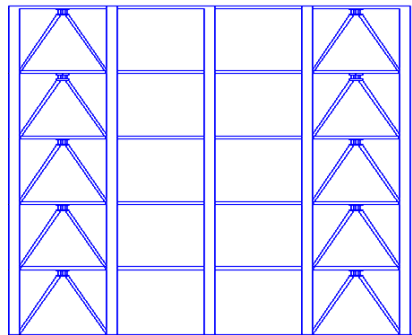


Figura 0.12. Estructura con disipadores de energía

La disipación de energía se realiza a través del comportamiento plástico de metales dúctiles, la extrusión del plomo, la deformación de corte de polímeros viscoelásticos, la pérdida de energía en fluidos viscosos circulando a través de orificios, la fricción entre superficies en contacto bajo presión, etc (figura 1.13).

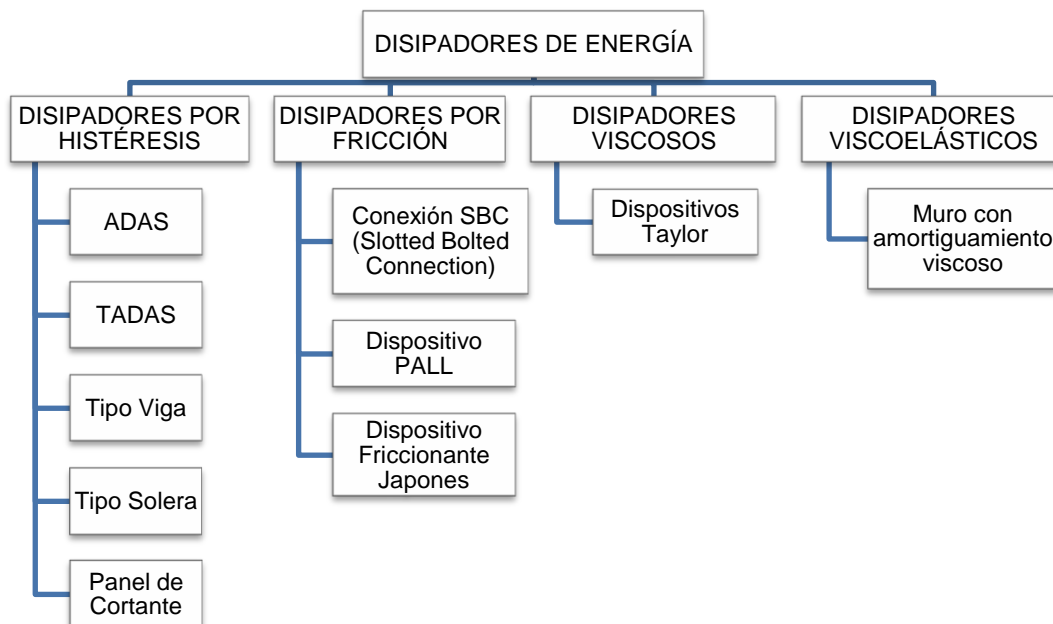


Figura 0.13. Una clasificación de los disipadores de energía

El estudio de dispositivos que disipan energía utilizando materiales **viscoelásticos** sólidos inicia en los años setenta para reducir los desplazamientos de los edificios ante la acción del viento. Estos disipadores están hechos de capas de polímeros acrílicos firmemente adheridos (figura 1.14); su comportamiento depende del nivel de deformación por cortante de las capas del polímero utilizado, de la frecuencia de oscilación y de la temperatura; siendo esta última la mayor limitante para este disipador debido a que este parámetro puede variar entre un 30% y 50% para gradientes de temperatura de 10°C para bajas frecuencias y son aún mayores para altas frecuencias (Tena 2011).

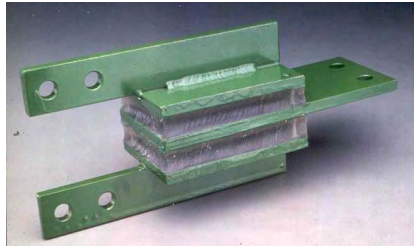


Figura 0.14. Disipador viscoelástico (tomado de Tena 2003)

Una de sus aplicaciones más famosas a nivel mundial fue su implantación en la cuerda inferior de las travesas de alma abierta de las hoy desaparecidas Torres Gemelas en Nueva York. En México, existe una aplicación de este dispositivo en Santa Fé, en el edificio de oficinas de la multinacional 3M (Tena 2003).

Los **disipadores viscosos** son muy similares a los amortiguadores para automóviles, normalmente están hechos de un tubo de acero inoxidable rellenos con un fluido de silicón que se estimula con un pistón de acero inoxidable que contiene una placa de bronce con orificios. Su comportamiento depende de la resistencia con la cual se opone el fluido a pasar por dicho orificio. La disipación de energía es proporcional a la velocidad de deformación al aplicar la carga y no modifican la rigidez ni la resistencia. Los dispositivos más famosos de este tipo son los Taylor y se instalan en diagonal, por medio de contravientos (figura 1.15)



Figura 0.15. Ejemplo de disipador viscoso
(http://www.staaleng.com/seismic_strengthening.htm)

Los **disipadores por fricción** consisten en arreglos de placas deslizantes atornilladas y la energía disipada es proporcional al desplazamiento. Avtar Pall fue el primero en estudiarlos y aplicarlos en Canadá. Los disipadores de fricción Pall son simples y bajos en costo. Consisten en una serie de placas de acero atornilladas a pernos de acero de alta resistencia (figura 1.16). Estos disipadores de fricción se diseñan para no deslizarse con el viento. Durante sismos moderados los disipadores Pall se deslizan ante una carga óptima predeterminada antes de que la fluencia se presente en otros miembros estructurales y disipan una porción importante de la energía sísmica. Otra característica de estos dispositivos es que el período natural del edificio varía con la amplitud de la vibración. Por lo tanto el fenómeno de resonancia se evita (Pall 2004).

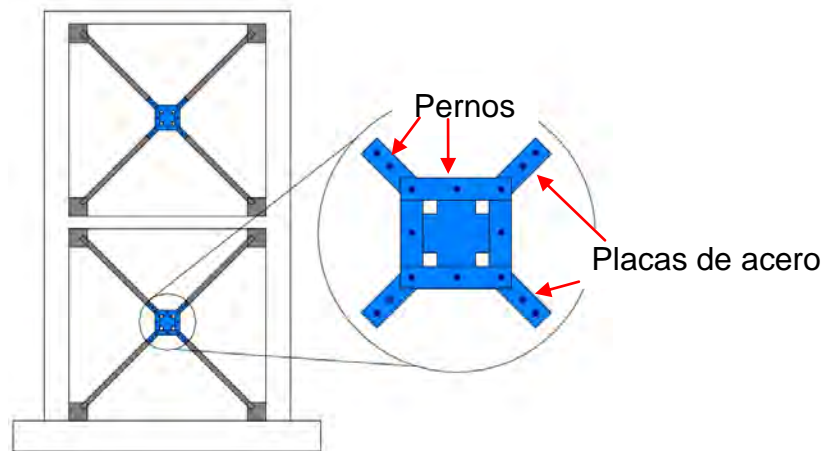


Figura 0.16. Ejemplo de disipador PALL (adaptado de http://www.ideers.bris.ac.uk/resistant/damping_friction.html)

El dispositivo friccionante japonés fue desarrollado en Japón en los años 80's por Oiles Company, con un principio muy similar al desarrollado por Pall, pero en este caso se utilizan placas de acero y de hule para proporcionar el amortiguamiento extra por fricción. Su gran desventaja era el costo (Tena 2011).

Las conexiones atornilladas friccionantes, también conocidos como "Slotted Bolted Connection" (SBC) se desarrollaron a partir de 1989 por Fitzgerald y colaboradores, y después lo estudiaron Popov y Grigorian en UC Berkeley (Tena 2011). El concepto: disipar energía en conexiones atornilladas de marcos contraventeados concéntricos dejándole espacio en agujeros de sección oblonga, para que así los tornillos se puedan deslizar sobre la placa de conexión y, por fricción, disipen energía (figura 1.17).

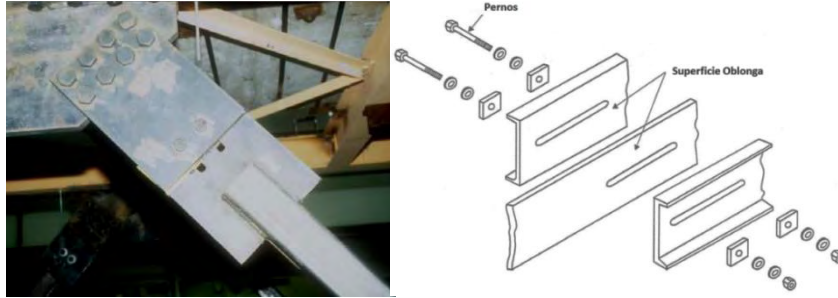


Figura 0.17. Ejemplo de conexiones atornilladas friccionantes (Aiken 2006)

Los dispositivos **disipadores por histéresis** del material, fueron de los primeros en desarrollarse, basándose en el principio de emplear materiales capaces de disipar energía por deformación inelástica cíclica y a su vez que fueran capaces de mantener esta gran capacidad de deformación cíclica para un número importante de incursiones inelásticas, antes de fallar por fatiga o fracturarse. Obviamente la elección inicial fue el de utilizar elementos metálicos, especialmente aleaciones de acero, debido a su disponibilidad y costo (Tena 2011).

Los primeros trabajos se desarrollaron en Nueva Zelanda y datan de 1972 por los profesores James Kelly e Iván Skinner y consiste en dos placas en forma de U que disipan energía al desplazarse una cara con respecto a la otra. La parte central del dispositivo se une a un nivel de la estructura y las partes extremas al nivel inmediato superior mediante barras (figura 1.18). Los desplazamientos relativos entre los niveles ocasionan el movimiento conocido como rolado por flexión mediante el cual disipa energía.

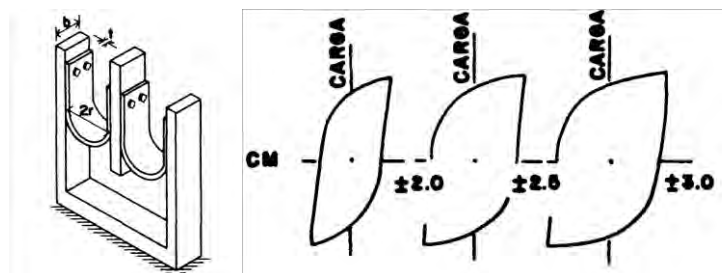


Figura 0.18. Disipador en U (Jara 1994)

Posteriormente en 1986-87 se iniciaron trabajos en los Estados Unidos por Roger Scholl con base en un programa experimental y analítico importante llevado a cabo en las universidades de California en Berkeley por Whittaker y colaboradores en 1989 y de Michigan por Bergman y Goel en 1987. Estos disipadores llamaron la atención de los ingenieros de la práctica y de los investigadores, sobre todo a raíz de su utilización en la reparación del edificio Izazaga según reporta Martínez-

Romero en 1993, un edificio de concreto reforzado de mediana altura que fue severamente dañado durante los sismos de septiembre de 1985 (Tena 2003).

Fue así como nació uno de los dispositivos más conocidos en el mundo, los dispositivos ADAS (Added Damping and Stiffness), cuyos principios fundamentales tienen sus antecedentes en los trabajos de Kelly y de Skinner (Tena 2011). En la figura 1.19 se presenta la geometría típica de un dispositivo ADAS. Los ADAS están formados por placas de acero estructural de sección variable cuya forma se asemeja al perfil de un reloj de arena. Estos dispositivos trabajan básicamente a cortante, plastificándose casi en su totalidad en doble curvatura para disipar energía por histéresis.

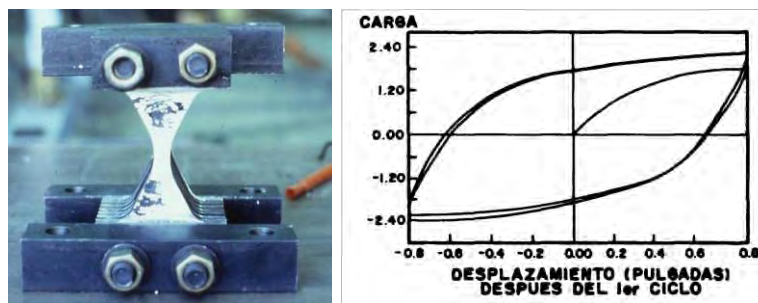


Figura 0.19. Dispositivo ADAS (foto cortesía de Javier Alonso, Tena 2003)

La variante más conocida del dispositivo ADAS es la denominada como dispositivos TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness), fue desarrollado en Taiwan por Tsai y colaboradores (Tena 2011). Los dispositivos TADAS también trabajan básicamente a cortante, con la diferencia, que la plastificación para disipar energía por histéresis se produce en curvatura simple, ya que se encuentran articulados en su vértice. En la figura 1.20 se presenta un esquema del comportamiento básico de las placas de acero de forma triangular que componen a un dispositivo TADAS (Tsai *et al.* 1993).

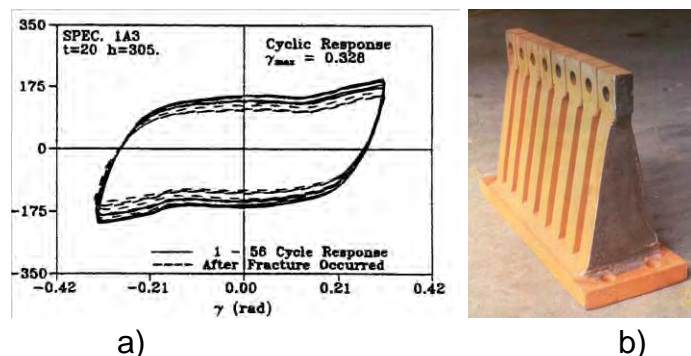


Figura 0.20. Dispositivo TADAS (a) Comportamiento (Tsai *et al.* 1993) , b) Placas de acero (Tena 2003)

A mediados de los años setenta se inició en el Instituto de Ingeniería de la UNAM un proyecto enfocado a desarrollar dispositivos controladores de hundimientos en edificios, con el fin de ofrecer una alternativa ventajosa en comparación con el sistema de pilotes de control tradicionales. Los dispositivos desarrollados tienen como componentes básicos elementos disipadores en forma de U, elaborados con solera de acero estructural. Este tipo de configuración opera bajo el concepto denominado "rolado por flexión" y disipa energía al desplazarse a la manera de las orugas de un tractor (González 1990).

El primer dispositivo disipador de energía probado en México, formados por elementos de acero en forma de "U". Se condujo a una prueba experimental de compresión en estos dispositivos para definir las características de fatiga cíclica y obtener sus deformaciones, mientras que en el Cenapred se realizaron pruebas cíclicas pseudo-estáticas de estos dispositivos montados en marcos tipo "chevron" (Tena-Colunga 2007).

Los dispositivos disipadores de energía también se pueden dividir en tres categorías: dependientes del desplazamiento, dependientes de la velocidad, y otros. Los ejemplos de los sistemas dependientes del desplazamiento incluyen los dispositivos basados en la fluencia de algún metal, o aleación, y de la fricción. En la figura 1.21 se presentan los lazos de histéresis de fuerza-desplazamiento de este tipo de disipador. Los ejemplos de los sistemas dependientes de la velocidad incluyen disipadores que consisten en materiales sólidos viscoelásticos, disipadores que funcionan por la deformación de los líquidos viscoelásticos, y disipadores que funcionan forzando el líquido a través de un orificio.

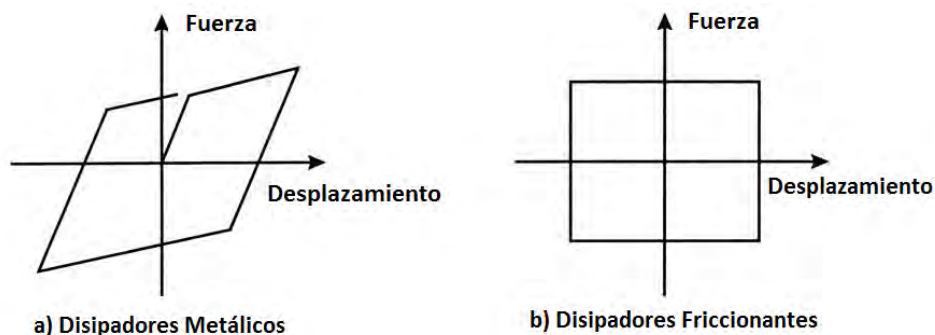


Figura 0.21. Relación Fuerza- Desplazamiento para disipadores dependientes del desplazamiento (Adaptado de Whittaker *et al.* 1999)

La figura 1.22 ilustra el comportamiento de estos sistemas dependientes de la velocidad. Otros sistemas tienen características que no se puedan clasificar por uno de los tipos básicos mencionados anteriormente. Los ejemplos son

disipadores hechos de aleaciones, montajes friccionantes, y dispositivos a base de fluidos de restauración fuerza/amortiguamiento (Whittaker *et al.* 1999)

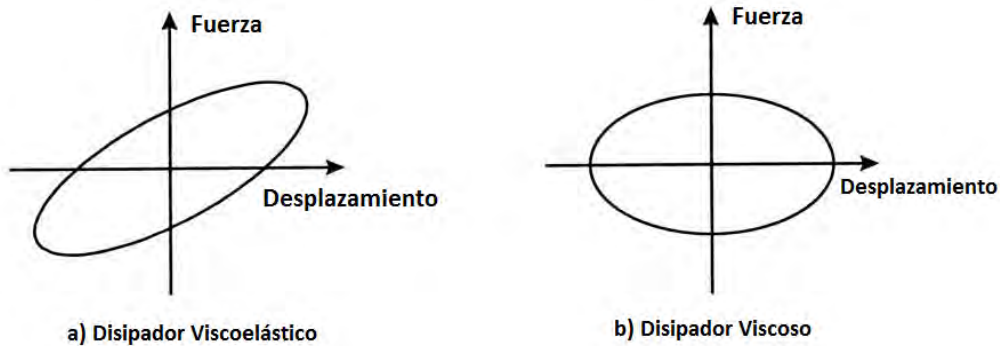


Figura 0.22. Relación Fuerza- Desplazamiento para disipadores dependientes de la velocidad (Adaptado de Whittaker *et al.* 1999)

1.5 Conclusiones

Como se ha detallado en este capítulo, existen varios métodos novedosos de diseño sismorresistente que se han ido desarrollando a lo largo de los últimos años, con un objetivo en común, el mitigar el daño estructural asociado con la disipación de energía inducida por excitaciones sísmicas o por viento. Las investigaciones hechas en control de la respuesta sísmica alrededor del mundo son tan extensas y variadas, que han expuesto lo mejor de cada dispositivo pero también las limitantes que presentan cada uno de ellos, ya sea por motivos de costos de producción, patente, diseño, implantación, etcétera.

El presente trabajo se enfoca en los dispositivos disipadores de energía por histéresis del material, por lo que en los siguientes capítulos se detalla el estado del arte a nivel mundial y nacional, en los diversos trabajos experimentales y analíticos existentes, para tener un enfoque más preciso del sistema pasivo de control en cuestión.

ESTADO DEL ARTE EN INVESTIGACIÓN DE DISIPADORES POR HISTÉRESIS DEL MATERIAL

2.1 Introducción

Después de los sismos ocurridos en el año de 1985 en México y de los diversos daños estructurales que se presentaron como consecuencia de ellos, los ingenieros mexicanos se interesaron en técnicas alternativas para salvaguardar la integridad de los habitantes de dichas estructuras. La técnica que más llamó la atención de los ingenieros fue la del control de la respuesta sísmica, en particular la disipación pasiva de energía, como una solución viable para la rehabilitación de estructuras de mediana altura dañadas por sismo, así también como una alternativa para el diseño de estructuras nuevas. Los primeros estudios en este tema en México datan de 1986, las primeras aplicaciones de disipadores de energía en la reparación de estructuras dañadas por sismo son de 1990 y la primera estructura nueva que se diseñó con disipadores de energía como parte del sistema estructural ante sismo data de 1995 (Tena 2003).

En este capítulo se reportan las investigaciones más significativas realizadas, que se han presentado desde la década de los 80's hasta nuestros días. Este capítulo se ha dividido en dos partes para ampliar el panorama de lo hecho a nivel mundial y compararlas con las investigaciones realizadas en México; y a su vez se subdividió en las investigaciones hechas experimentalmente y las efectuadas de manera analítica. Se han ordenado cronológicamente las diversas investigaciones aquí reportadas, para comprender la evolución de los dispositivos disipadores de energía por histéresis del material.

2.2 Ámbito Mundial

2.2.1 Investigación Experimental

Durante el período de 1986 a 1991, siete sistemas diferentes de dispositivos pasivos de energía se estudiaron en programas de investigación experimentales en el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica (EERC por sus siglas en inglés) de la Universidad de California en Berkeley. Cuatro de los sistemas estudiados son dispositivos de fricción. Los otros tres sistemas que se probaron tienen diversos mecanismos de disipación de energía y son: elementos ADAS; disipadores viscoelásticos y dispositivos de aleación especial de Níquel-Titanio.

Se valoró la efectividad de los sistemas comparando la respuesta estructural de la prueba con y sin los disipadores (Aiken *et al.* 1993).

Como es de nuestro interés el estudio de los disipadores de energía por histéresis del material, a continuación se detalla la investigación experimental efectuada a los elementos tipo ADAS con pruebas dinámicas individuales. Se impuso un desplazamiento sinusoidal en los elementos y se documentó las respuestas de fuerza y deformación.

Las pruebas demostraron que los elementos ADAS son capaces de sostener más de 100 ciclos de carga con una amplitud de deformación de $3\Delta_y$ con respuesta estable y sin muestras de degradación. A partir de esta información se propuso diseñar a los elementos ADAS con un nivel de seguridad para intervalos de desplazamiento hasta de $10\Delta_y$; y la falla de los ADAS fue inducida por 15 ciclos de carga en una amplitud de $14\Delta_y$. Las pruebas también indicaron la importancia de las conexiones rígidas para el funcionamiento adecuado de este dispositivo. Las pruebas experimentales hechas por Bergman en 1987 indicaron resultados similares (Aiken *et al.* 1993).

Para la prueba de simulación sísmica, se utilizó un marco de acero de tres niveles reforzando a la estructura con dispositivos tipo ADAS (figura 2.1). El modelo tenía una altura en el primer nivel de 6 pies y 8 pulgadas, y los dos niveles superiores eran de 5 pies y 4 pulgadas. El modelo fue construido a escala real, y se cumplieron los requisitos de resistencia y rigidez del UBC-1988 para marco dúctiles resistente a momentos desplantado en roca. Los elementos ADAS fueron instalados en la parte superior del contraventeo tipo y los tamaños de los ADAS variaron en cada nivel, con siete placas en el piso inferior, seis placas en el segundo nivel, y cuatro placas en el último (Aiken *et al.* 1993).

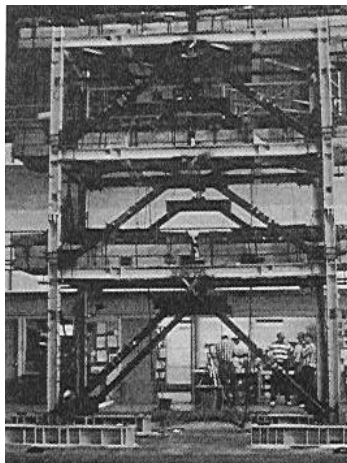


Figura 0.1. Marco de acero rehabilitado con ADAS (Aiken *et al.* 1993).

El modelo experimental fue sujeto a diversos registros de aceleraciones sísmicas incluido el del Centro, 1940 N00E; Chile, 1985 N10E, y un registro sintético para terreno blando (THSSR). Aunque el registro del terremoto de “El Centro” haya sido utilizado tradicionalmente para los propósitos del análisis y diseño, tiene simplemente un pequeño contenido en energía. El registro del terremoto de Chile tiene un contenido rico de frecuencias (especialmente entre 1.5Hz y 5Hz), una duración larga de movimiento con intensidad fuerte y un contenido en energía extremadamente alta.

El registro THSSR fue generado modificando un registro previo para producir un espectro de respuesta de aceleración consistente con el UBC-1988. Este registro contenía bajas frecuencias y se desarrollaron desplazamientos que excedieron los límites del simulador para aceleraciones máximas superiores a 0.15g (Whittaker *et al.* 1989).

En 1988, Watabe y colaboradores presentaron los resultados de las pruebas experimentales de cinco miembros estructurales resistentes al pandeo, que consisten en un núcleo de acero rodeado por un tubo de acero cuadrado relleno de concreto. En la figura 2.2 se muestra la configuración de los especímenes utilizados en dicha prueba; los núcleos de acero de los miembros resistentes a pandeo usados como especímenes son de 19 x 90 milímetros. Se utilizó acero SS41 (estándar industrial japonés), para los miembros del núcleo y el esfuerzo de fluencia del material fue de 2 880 kg/cm². Se usó acero TSK50 como el material para los tubos de acero y el esfuerzo de fluencia del material fue de 3 700 kg/cm². Además, debido a la relación de Poisson, se usó cinta de vinilo en ambos lados entre el núcleo y el concreto. En el experimento, las fuerzas horizontales fueron aplicadas al marco usando un actuador de 110 ton. El núcleo del espécimen se probó ante cargas repetidas en ambas direcciones para ocho ciclos hasta alcanzar las cargas de diseño permisibles (Watabe *et al.* 1988).

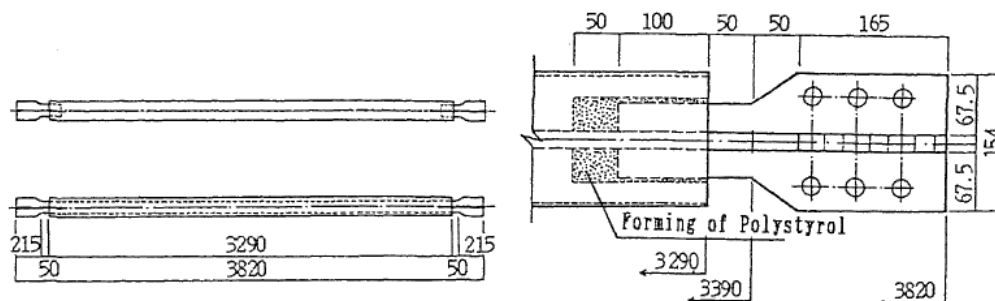


Figura 0.2. Configuración del espécimen de prueba (Watabe *et al.* 1988)

Watabe y colaboradores demostraron que cuando este dispositivo se incorpora realmente en un marco, y los extremos del miembro estructural se sujetan a momentos flexionantes, no ocurre pandeo en el miembro estructural si la carga de Euler del tubo de acero es mayor que la resistencia a la fluencia del miembro del núcleo hasta cierto punto. Para diseños reales, es necesario que el miembro del núcleo se encierre dentro de un tubo de acero cuya carga de Euler sea de 1.5 veces la resistencia a fluencia del miembro del núcleo (Watabe *et al.* 1988).

En 1992, en la universidad nacional de Taiwán, Tsai y colaboradores realizaron pruebas experimentales, ante cargas cíclicas, de once dispositivos TADAS. Los resultados de la prueba indican que el acero del dispositivo TADAS, usando los detalles de soldadura propuestos, pueden mantener una gran cantidad de cambios de fluencia sin ninguna muestra de degradación de rigidez o de resistencia por parte del dispositivo.

Para la prueba experimental se llevó a cabo mediante una prueba pseudodinámica en un marco de acero de dos niveles en escala real (figura 2.3). De estas pruebas, se demuestra que las características mecánicas del dispositivo propuesto son altamente predecibles. De acuerdo con estos estudios experimentales y analíticos, se propuso una metodología de diseño y se desarrolló un ejemplo para el diseño de vigas, columnas y de apoyos en estructuras usando el dispositivo de TADAS como el sistema de la disipación de energía primaria (Tsai *et al.* 1993).

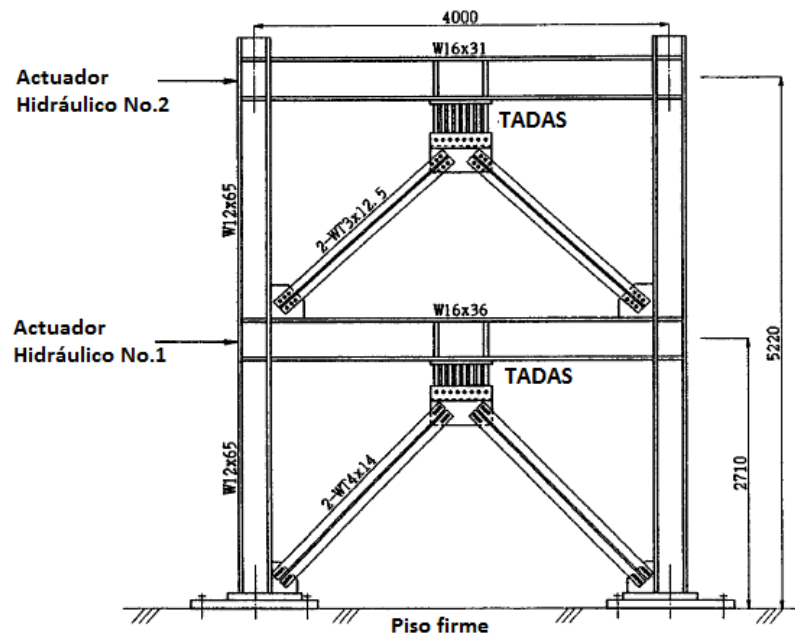


Figura 0.3. Dispositivo experimental de prueba pseudodinámica (adaptado de Tsai *et al.* 1993)

En Taiwán a mediados de los años 90's se desarrollaron dispositivos de panel de cortante conocidos como LYSSP (Low Yield Steel Shear Panel) y después denominados en México como paneles de cortante. Existe al menos una aplicación en la capital de ese país asiático, en el Hotel Hsin-Chu Ambassador, por Chang y Hwang en el año 2005 (figura 2.4).

En el año 2000 Tanaka y Sasaki hicieron cuatro series de prueba bajo carga estática, con un total de dieciséis especímenes de panel de cortante. Todos los especímenes fueron sometidos a carga cíclica para obtener modelos de histéresis para estos dispositivos con el propósito de diseño. El resultado al que llegaron fue que, en caso de una relación ancho-espesor de menos de 40, los dispositivos tipo panel mostraron desempeños histeréticos excelentes. Propusieron ecuaciones empíricas para estimar la fuerza máxima y la deformación permisible de los dispositivos panel de cortante con el propósito del control de la respuesta en el diseño sísmico (Tanaka y Sasaki 2000).



Figura 0.4. Hotel Hsin-Chu Ambassador, Taiwan

(http://hotel.priceline.com.sg/en/taiwan/hsinchu/ambassador-hotel-_hsinchu.html)

2.2.2 Investigación Analítica

En el 2009, Ramiro Vargas y Michel Bruneau realizaron una investigación en la cual estudiaron dispositivos pasivos de energía a los cuáles llamaron “fusibles”, que no eran más que disipadores histeréticos metálicos. Diseñaron a estos disipadores para que fluyeran antes que el sistema del marco. El procedimiento de diseño que ellos proponen para los disipadores de energía, para modelos de múltiples grados de libertad, tienen sus bases en los resultados que presentan en su estudio paramétrico donde consideran el comportamiento de sistemas de un grado de libertad sujetos a registros sintéticos de aceleraciones (Vargas y Bruneau 2009).

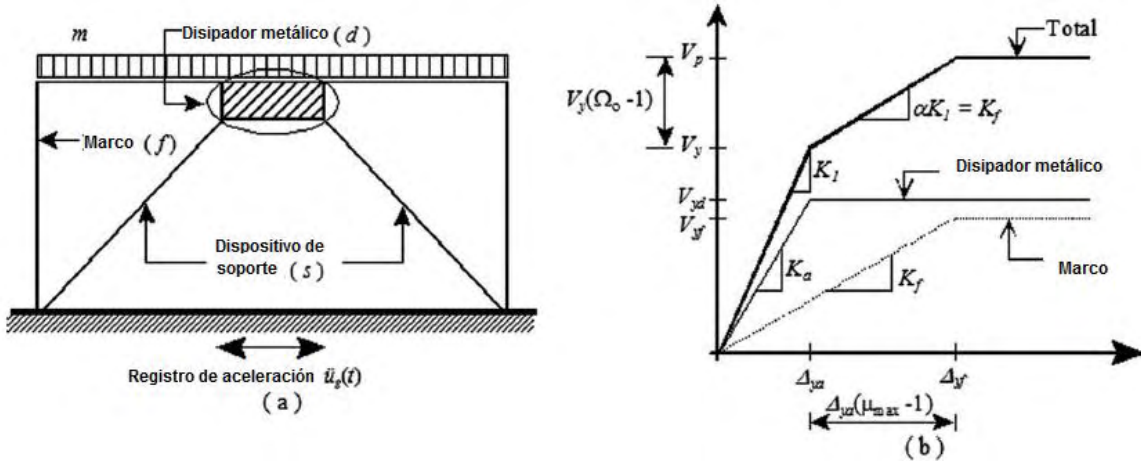


Figura 0.5. a) Modelo para sistemas de un grado de libertad con disipadores metálicos, b) curva global cortante-distorsión (Adaptado de Vargas y Bruneau 2009)

La figura 2.5b se muestra una curva general cortante-distorsión, en la cual el marco y los fusibles (disipadores metálicos) están representados por un comportamiento elastoplástico que actúan paralelamente. La curva global es trilineal con la rigidez inicial, K_1 , calculada sumando la rigidez del marco y la de los disipadores, K_f y K_a , respectivamente. Una vez que los “fusibles estructurales” alcanzan su deformación de fluencia, Δ_{ya} , el incremento en la fuerza lateral es resistido solamente por el marco, representada por la segunda pendiente de la curva global que es igual a la rigidez del marco, K_f (Vargas y Bruneau 2009).

Vargas y Bruneau definieron, a partir de la figura anterior, dos parámetros que utilizaron en este estudio: la relación de rigideces, α , y la ductilidad máxima de fluencia μ_{max} . La relación de rigideces α , es la relación entre la rigidez del marco y la rigidez total inicial, la cual puede ser calculada como:

$$\alpha = \frac{1}{1 + (K_a / K_f)} \quad (2.1)$$

La ductilidad máxima μ_{max} , es la relación del desplazamiento de fluencia del marco Δ_{yf} , con respecto al desplazamiento de fluencia de los disipadores Δ_{ya} . En otras palabras, μ_{max} es el máximo desplazamiento que los disipadores experimentan antes que el sistema del marco incurra en el intervalo inelástico. Este parámetro puede ser escrito como:

$$\mu_{max} = \frac{\Delta_{yf}}{\Delta_{ya}} \quad (2.2)$$

En este estudio se utilizó un modelo de edificio SAC, que consistía en un marco a base de acero con tres niveles de entrepiso localizado en un suelo tipo B. El modelo usado consistía de siete crujeías en la dirección Norte-Sur (NS) y cinco crujeías en la dirección Este-Oeste (EO) como se muestra en la figura 2.6. El espectro de diseño fue construido en base al Programa Nacional de Reducción Riesgos Sísmicos (NEHRP, por sus siglas en inglés), presentado en FEMA 2003 para la costa oeste y para el tipo de suelo antes mencionado (Vargas y Bruneau 2009).

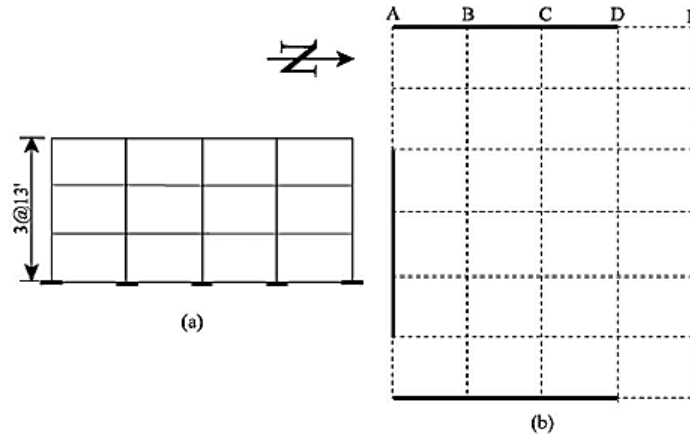


Figura 0.6. Prototipo a) Vista frontal, b) Vista en planta

Vargas y Bruneau encontraron que el intervalo de soluciones admisibles que satisfacen el concepto de los disipadores de energía puede ser paramétricamente definido, incluyendo un límite de distorsión de entrepiso, como un límite del periodo elástico. Se observó que los sistemas que presentaban $\mu_{max} > 5$ ofrecían más opciones de diseños aceptables.

Se concluyó que los sistemas que presentaban $\alpha < 0.25$, necesitaban “fusibles” de mayor tamaño para cumplir con la filosofía de diseño de los disipadores de energía. Además, los sistemas que presentaban $\mu_{max} < 5$, también requerían disipadores de gran tamaño y resistir cortantes de gran magnitud lo cual dificulta su implementación. Ellos recomiendan, para un desempeño óptimo ante el sismo de diseño, usar valores de $\alpha > 0.25$ y $\mu_{max} > 5$ como parámetros ideales

2.3 Ámbito Nacional

2.3.1 Investigación Experimental

La primeras investigaciones en México sobre disipación pasiva de energía corresponden a los estudios experimentales conducidos por Aguirre y Sánchez en el Instituto de Ingeniería de la UNAM para el desarrollo de los Dispositivos Solera

que reportan en 1989. Estos dispositivos se habían estudiado inicialmente en 1974 para controlar el hundimiento de edificios al colocarse en la cimentación, pero no fue sino hasta 1987 que se condujeron estudios específicos para disipar energía al planear su ubicación en la estructura (Tena 2003).

Hasta antes de este estudio la forma del elemento deformable eran definidas en base a la experiencia, es por ello que la primera parte del programa experimental se centró en determinar las dimensiones óptimas para un elemento deformable, se pensó en que dichas dimensiones fuera múltiplos del dispositivo de control. Los elementos en U fueron probados usando el dispositivo de carga presentado esquemáticamente en la figura 2.7, que consiste básicamente en un miembro de centro unido a la célula de carga en la parte superior, y una estructura limitante asegurada al dispositivo hidráulico de la máquina de prueba en la parte inferior. Un lado de cada uno de los dos especímenes de la prueba se atornilla al miembro del centro; el otro lado se sujeta a la estructura de confinamiento (Aguirre y Sánchez 1992).

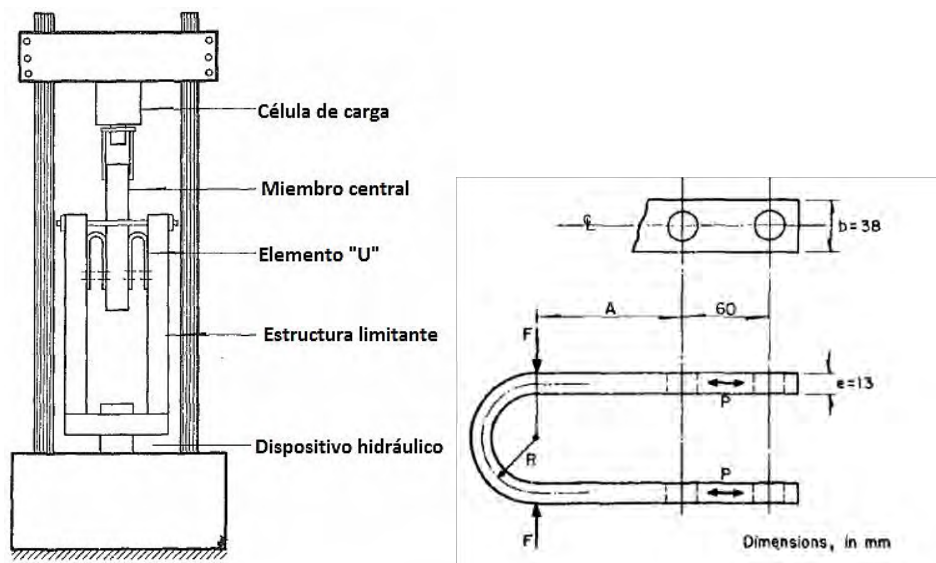


Figura 0.7. Dispositivo de carga cíclica para el dispositivo "U"
(Aguirre y Sánchez 1992).

Los estudios experimentales de Aguirre y Sánchez permitieron definir características muy importantes de los dispositivos con fines de diseño, incluyendo números de ciclos a la fatiga a distintos niveles de deformación y de incremento de temperatura, expresiones simples para su diseño, así como modelos histeréticos para su empleo en análisis (Tena 2003).

Posteriormente, entre 1990 y 1993 Ricardo González Alcorta realiza pruebas en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM de una estructura metálica de dos niveles sujeta a cargas armónicas, provista de un sistema de disipación de energía a base de soleras de acero colocadas en diagonales de refuerzo (figura 2.8). González comprobó la eficiencia de los disipadores tipo solera, pero encontró que la interacción suelo-estructura y el incremento del periodo fundamental de la estructura debido a la fluencia de las soleras provoca que se presenten grandes cortantes de entrepiso (González 1990).

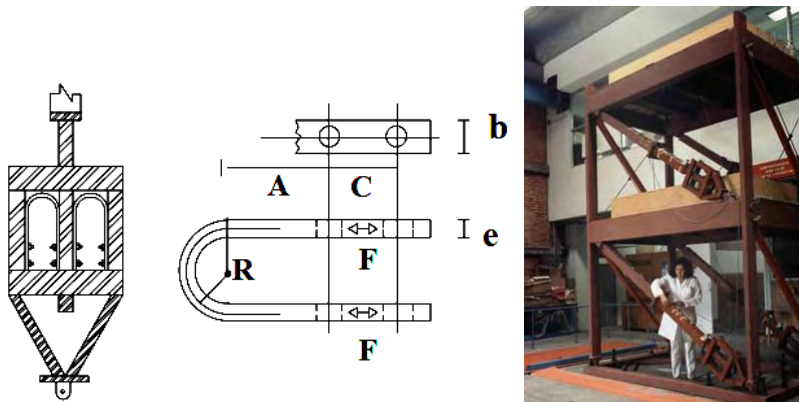


Figura 0.8. Dispositivo Solera (foto cortesía de Ricardo González Alcorta, Tena 2003)

En el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) se ensayaron los dispositivos solera montados sobre un contraventeo chevrón, un arreglo diferente al concebido originalmente. Además, el Dr. Óscar López Bátiz y Fernando Aparicio ensayaron una serie de dispositivos que se basan en una placa de acero de forma rectangular montada sobre el mismo contraventeo chevrón, a las que nombró panel de cortante (fig 2.9).



Figura 0.9. Dispositivo placa atiesada ensayado en Cenapred (foto cortesía del Cenapred, Tena 2003)

Los ensayos se realizaron ante carga cíclica aplicada pseudo-estáticamente a distintas amplitudes de deformación, y de los mismos se concluye que estas opciones se pueden utilizar para disipar energía inducida por sismo de forma eficiente (Tena 2003).

El Ing. Jorge Ortega Beltrán propuso un disipador tipo viga el cual disipa energía mediante placas rectangulares trabajando como vigas simplemente apoyadas sujetas a cargas concentradas aplicadas simétricamente (figura 2.10). Las pruebas experimentales, ante desplazamientos armónicos, se realizaron en el instituto de ingeniería de la UNAM y según lo reportado por Escobar y colaboradores en 2002, demostraron la eficiencia del disipador propuesto por Ortega, el cual posteriormente se empleó en la rehabilitación de un edificio de 22 pisos en la ciudad de México (Tena 2011).



Figura 0.10. Dispositivo tipo viga propuesto por Ortega
(foto cortesía de Gustavo Ayala, Tena 2003)

En la UAM-Azcapotzalco se desarrolló un proyecto a cargo del Dr. Danny Arroyo Espinoza, con el objetivo de sentar las bases para fabricar en México, a escala industrial contravientos restringidos contra pandeo. El estudio experimental se realizó en dos etapas; en la etapa inicial, se estudió el comportamiento de contravientos aislados evaluándose la estabilidad del ciclo histerético y la diferencia entre su resistencia a tensión y a compresión en el comportamiento de contravientos aislados con diferentes arreglos de núcleo y material antiadherente (figura 2.11). En total se realizaron ensayos en 14 contravientos. Para la segunda etapa, se estudió el comportamiento de ensamblajes contraviento-marco.

Los resultados de los ensayos en elementos aislados mostraron que el contraviento desarrollado exhibió un comportamiento histerético estable y una resistencia a compresión y a tensión similar, principalmente el elemento formado por un núcleo de doble ángulo con placas de refuerzo en el extremo. Dicho

elemento desarrollo un modo de pandeo superior lo que indica la efectividad del material confinante (Arroyo *et al* 2009).



Figura 0.11. Dispositivo de carga para contravientos desadheridos UAM-A

2.3.2 Investigación Analítica

La investigación analítica que se ha llevado a cabo en México de dispositivos disipadores de energía se podía clasificar en los estudios paramétricos realizados como se enumeran a continuación (Tena-Colunga 2007):

- a) Estudios paramétricos de modelos de un grado de libertad.
- b) Investigación usando modelos de varios grados de libertad.
- c) Propuestas de modelados analítico para dispositivos disipadores de energía específicos.
- d) Evaluación y validación de modelos usados para análisis no lineales.
- e) Rehabilitación y optimización de estructuras con dispositivos disipadores de energía.
- f) Procedimientos y normas de diseño.
- g) Estudios para puentes.

Se han realizado diversos estudios paramétricos usando **sistemas de un grado de libertad**, la mayor parte de ellos se han centrado en estudiar el impacto de utilizar dispositivos pasivos de disipación de energía en estructuras situadas en condiciones terreno blando de la Ciudad de México (Tena-Colunga 2007). Entre estos estudios extensos, se pueden distinguir los siguientes:

- El trabajo presentado por Gómez-Soberón y otros en 1993, donde el uso de los disipadores pasivos histeréticos de energía se compara con sistemas de marcos contraventeados, una solución estructural para edificios de mediana y gran altura en la Ciudad de México. El estudio consideraba los movimientos de tierra para los suelos blandos y firmes en Ciudad de México.

- El estudio presentado por Arista y Gómez en 1993, para estudiar la respuesta torsional de estructuras con disipadores pasivos de energía con los registros de movimiento de terreno con las condiciones de suelo blando y firme en la Ciudad de México.
- El trabajo presentado por Arroyo y Terán (2002), donde presentan los factores de $R_{\mu\xi}$ obtenidos para estructuras con amortiguadores viscosos para los registros de terreno de suelo blando y firme (figura 2.12), para el siguiente factor de amortiguamiento ξ : 0.05, 0.10, 0.20 y 0.3 y las siguientes demandas de ductilidad para el sistema estructural principal μ : 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 y 4.0.

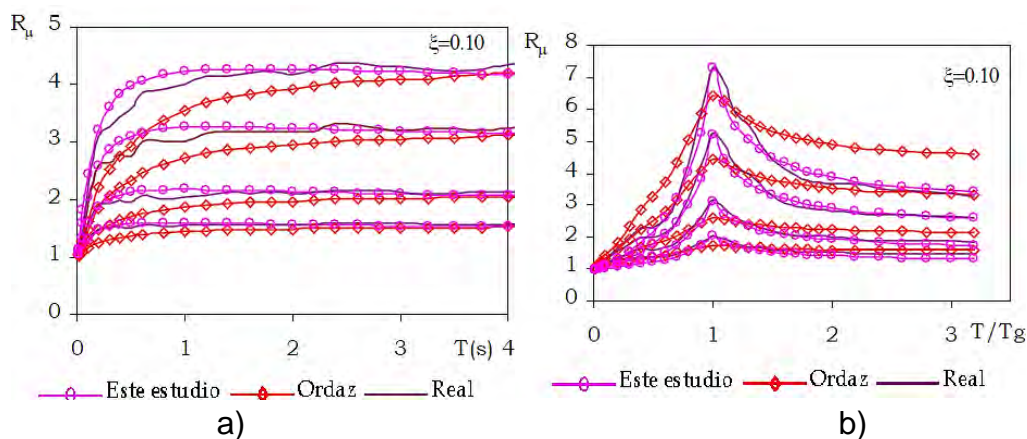


Figura 0.12. Propuestas para estimar $R_{\mu\xi}$ y ξ 10%, a) Suelo firme b) Suelo blando (tomado de Arroyo y Terán 2002)

- El estudio de Cabrera y de Martínez-Rueda en 2001, donde se modeló la respuesta no lineal del sistema de contraventeo-amortiguador histerético con un sistema elastoplástico perfecto y la respuesta no lineal de las estructuras de concreto reforzado fue modelada con modelos histeréticos propuestos por Clough. El estudio fue dedicado a definir el balance de rigidez/fuerza entre la estructura y el sistema contraviento-disipador para un grupo de 20 registros de movimiento del terreno típicos de suelos firmes alrededor del mundo.
- El estudio de Rivera y colaboradores en 2006, donde se presentó un cálculo para la determinación de espectros de la respuesta sísmica con índices uniformes anuales de falla previstos para los sistemas de un grado de libertad con los dispositivos disipadores de energía. El daño se midió con el índice de daño Park-Ang. Los espectros obtenidos fueron comparados con aquéllos donde el daño se mide en términos de la relación entre la ductilidad exigida y la disponible. Los espectros propuestos son

potencialmente útiles para los procedimientos de diseño basados en confiabilidad y aquellos basados en el desempeño.

Por otra parte, también se han realizado estudios paramétricos usando **sistemas de múltiples grado de libertad**, por ejemplo, se han trabajado con la distribución espacial de los dispositivos histeréticos montados en diversas configuraciones de contraventeo para modelos de marcos cuando se sujetan a movimientos típicos de suelos blandos en la Ciudad de México como se menciona en Ruiz y colaboradores en 1995 (Tena-Colunga 2007).

Se han realizado estudios donde se compara el uso de disipadores pasivos histeréticos de energía con sistemas de marcos contraventeados como solución de rehabilitación y/o como diseño original para edificios de mediana altura para sitios con suelo blando de la Ciudad de México usando modelos de marco, como por ejemplo, los reportados por Jara y colaboradores en 1993, Vargas y colaboradores en 1995, Ruiz y colaboradores en 1996, Limón y Ruiz en 1997 y Montiel y Ruiz en 2006.

Se ha demostrado en estos estudios la ventaja del uso de dispositivos disipadores de energía en comparación con un sistema de marcos convencionalmente diseñado que no los usa. Por ejemplo, llegaron a la conclusión de que los momentos de volteo para edificios con disipadores de energía son más bajos que los asociados con los marcos convencionales, esto nos da una clara idea que los marcos con disipadores da lugar a menores costos en cimentación.

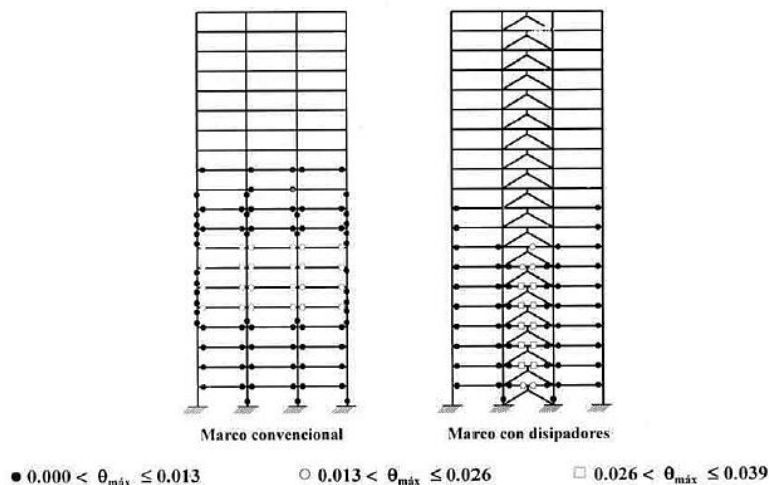


Figura 0.13. Comparación de la plastificación de los elementos en marcos estudiados (Ruiz *et al.* 1996)

Además, los sistemas con disipadores tienen una mejor respuesta inelástica en comparación con aquéllos que no lo tienen, en este último, hubo mayor cantidad de elementos plastificados (figura 2.13). En términos de costos, el sistema disipador representa aproximadamente el 25% del costo total de construcción de edificios con disipadores, mientras que los costos de construcción de un edificio con disipadores son aproximadamente 10% más grandes que los del edificio convencional (Ruiz *et al.* 1996)

En 2004, Hernández y colaboradores presentaron un estudio para un edificio relativamente alto (23 niveles), donde las curvas de la demanda de peligro y las probabilidades anuales de falla eran consideradas en los análisis. Encontraron que para este edificio, una respuesta estructural mejorada se obtiene usando los dispositivos pasivos de disipación de energía (TADAS) en vez de sistemas de contraventeo tradicionales.

Se han hecho además otros estudios para edificios existentes específicos en la Ciudad de México, donde se plantea una rehabilitación alterna usando dispositivos pasivos de disipación de energía y se compara con la solución real utilizada para adaptar a dicho edificio, como se reporta en González-Alcorta y Córdova en 1992, Tena-Colunga y colaboradores en 1996 y Tena-Colunga y Vergara en 1997 (Tena-Colunga 2007).

Otros estudios paramétricos se han enfocado en propuestas para el modelado analítico de dispositivos disipadores específicos, para ello se tomó muy en cuenta que es necesario proporcionar pautas simples a los ingenieros en cómo obtener el tamaño de un dispositivo pasivo de disipación de energía a partir de los resultados del análisis. A este respecto, los trabajos presentados por Aguirre y Sánchez en 1989 y 1992, Tena-Colunga en 1998 y 2000 y Terrones y colaboradores en 2002 han sido muy valiosos para el modelado de los dispositivos solera (Tena-Colunga 2007).

Por otro lado, también se propusieron modelos para los dispositivos ADAS como los presentados por Tena-Colunga (1997) usando los resultados experimentales de la prueba en la mesa vibradora hecha en la Universidad de California en Berkeley (es decir, Whittaker *et al.* 1989), el trabajo presentado por Fernández y colaboradores en 1999, Escobar y colaboradores en 2002 para ayudar al modelo del dispositivo tipo viga y el trabajo de Vera y colaboradores en 2006 para el dispositivo de panel de cortante (Tena-Colunga 2007).

Tena-Colunga (2000, 2002) presentó estudios con respecto a la evaluación y validación de los modelos usados para los análisis no lineales donde los aspectos siguientes fueron determinados:

- Modelos analíticos comunes usados para estudiar sistemas estructurales con dispositivos metálicos pasivos de disipación de energía,
- La validez de algunas simplificaciones analíticas para el análisis no lineal de estructuras con disipadores metálicos pasivos de energía y,
- Aspectos que se deben considerar para el diseño de estructuras con disipadores metálicos de energía desde el punto de vista del análisis estructural.

Amateco, Escobar y Dyer presentaron en 2004 un modelo histerético de “Ramberg-Osgood” modificado para representar la respuesta sísmica de sistemas estructurales con un amortiguador de energía que considera la degradación en rigidez y fuerza así como la deformación por endurecimiento. El modelo propuesto modificado fue comparado con uno anterior presentado por Ozdemir en 1976, obteniendo resultados parecidos.

Luis Esteva y Sonia Ruiz han hecho diversos trabajos de investigación en confiabilidad y optimización de estructuras con los dispositivos pasivos de disipación de energía, desde estudios iniciales como el presentado por Ruiz en 1998 donde los modelos matemáticos fueron desarrollados para describir la acumulación del daño y la evolución de la confiabilidad del sistema con respecto a su historia sísmica, a estudios donde los criterios de diseño y de mantenimiento se han fijado para los sistemas con disipación de energía basada en la minimización del costo inicial, del costo de mantenimiento y del daño, por ejemplo, los presentados por Esteva y colaboradores en 1998 ó Campos y Esteva en 2002 (Tena-Colunga 2007).

En 2005, Esteva resumió y describió los esfuerzos de su equipo de investigación, revisando los criterios y métodos para evaluar medidas eventos únicos y medidas del ciclo vital de la confiabilidad del sistema y del daño esperado. Se hizo especial énfasis en el desarrollo de algoritmos de diseño prácticos que hacen uso de sistemas de un grado de libertad y de la simplificación de sistemas de referencia para obtener funciones probabilísticas transformadas de la respuesta usadas para estimar valores máximos de las respuestas críticas en los sistemas de interés que fueron calculados con el sistema de referencia simplificado.

En 2006, García-Pérez y colaboradores presentaron un estudio donde el proceso de optimización indicado está dentro de los parámetros de la reducción al mínimo costo total de una estructura, incluyendo el costo inicial así como los costos de rehabilitación debido a sismos. Las funciones de costo inicial fueron descritas en términos del coeficiente sísmico de diseño. Las funciones de vulnerabilidad fueron obtenidas analizando cuatro tipos de estructuras de concreto reforzado con dispositivos histeréticos de disipación de energía instalados en contraventeos situados en condiciones de suelo blando de la Ciudad de México. Las funciones de vulnerabilidad junto con los análisis de costo realizados fueron utilizadas para encontrar el costo de las relaciones de intensidad del daño sísmico. Los análisis de sus resultados sugieren que el uso de sistemas con dispositivos de disipación de energía llevan a un mejor resultado de costos y beneficios cuando las intensidades sísmicas esperadas son altas (Tena-Colunga 2007).

Las metodologías generales para el diseño de estructuras con dispositivos de disipación de energía que se han propuesto formalmente, según indica Tena-Colunga (2007), son:

- 1) Procedimientos iterativos basados en el uso del análisis dinámico no lineal por ejemplo, el presentado por Silva y Ruiz en 1993.
- 2) Procedimientos adaptados a la filosofía general de las pautas sísmicas mexicanas que realizaban de forma estática y/o con análisis de espectro de respuesta (Tena 1998),
- 3) Estrategias generales de diseño por desempeño, presentadas por Esteva y Veras en 1998 Ruiz y Badillo en 2001 y Torres y Ruiz en 2004,
- 4) Procedimientos basados en confiabilidad y objetivos de diseño por desempeño (por ejemplo, Ruiz en 2002, Esteva y colaboradores en 2005, Montiel y Ruiz en 2006) y,
- 5) Procedimientos de diseño por desplazamiento, por ejemplo, el presentado por Terán-Gilmore y Virto en 2006.

Torres y Ruiz propusieron en 2004 un algoritmo de diseño para la rehabilitación de edificios con dispositivos histeréticos de disipación de energía basados en un análisis probabilístico de la demanda sísmica. Las condiciones de aceptación impuestas fueron referidas a la distorsión de entrepiso máxima desarrollada por el edificio rehabilitado, y a la ductilidad máxima exigida por el disipador. El algoritmo, una modificación de la presentada previamente por Ruiz y Badillo en 2001, fueron aplicados con éxito a un edificio de concreto reforzado rehabilitado con dispositivos solera.

El método de diseño basado en la confiabilidad para la rehabilitación de edificios con dispositivos disipadores de energía propuestos por Montiel y Ruiz en 2006 se formula dentro del formato del diseño del factor de la demanda y de la capacidad. El método propuesto se basa verificando que los niveles de confianza (asociados a la utilidad y a los estados de seguridad) que corresponden a la estructura rehabilitada sean iguales o más grandes que los niveles de confianza que se asociaron a una estructura convencional similar que se diseña de acuerdo con un código sísmico de diseño. El criterio fue ilustrado con un edificio de cinco niveles rehabilitado hipotéticamente con los dispositivos de disipación de energía TADAS.

La metodología basada en el desplazamiento presentada por Terán-Gilmore y Virto en 2006 está basada en el diseño por desempeño orientado para los sistemas estructurales con tendones desadheridos. La metodología propuesta fue formulada para estructuras de bajo riesgo, cuyo comportamiento no se ve influenciada perceptiblemente por el comportamiento flexionante global. La metodología fue calibrada con el diseño sísmico teórico de un edificio de cinco niveles situado en la zona del lago de Ciudad de México (condiciones de terreno blando). De la evaluación de las características mecánicas globales del edificio y de su funcionamiento sísmico cuando estaba sujeto a los movimientos del terreno generados en esa zona, se concluyó que la metodología simplificada propuesta es adecuada.

DESCRIPCIÓN DE LOS DISIPADORES HISTERÉTICOS

3.1 Introducción

Cuando se iniciaron los primeros trabajos de reparación con elementos disipadores de energía, los diseñadores estructuristas asumieron el desafío de desarrollar modelos que fueran congruentes con la estructura en cuestión para su análisis y diseño. En México, el interés se ha centrado principalmente en disipadores de energía que trabajan por histéresis del acero, entre los cuales resaltan los estudios sobre los denominados dispositivos solera, los dispositivos ADAS, y los dispositivos TADAS (Tena 2000).

Se han realizado diversos estudios paramétricos destinados a evaluar a los dispositivos disipadores de energía como una solución eficiente en la reducción de la respuesta sísmica de las estructuras. Sin embargo, en algunos de estos estudios no se demostró la validez de las simplificaciones analíticas supuestas, particularmente en el modelado no lineal de los elementos disipadores de energía, ni se han comparado éstas con resultados obtenidos en pruebas experimentales (Tena 2000).

A continuación se presentan y discuten algunos de los procedimientos que más se han empleado en el modelado elástico de estructuras con disipadores de energía por histéresis del material.

3.2 Modelado elástico

Es común incluir a los dispositivos disipadores de energía, por histéresis del material, en estructuras con marcos contraventeados, usando contravientos concéntricos o contravientos chevrón (figura 3.1). Generalmente se prefiere al contraventeo chevron en edificios de varios niveles por las siguientes razones:

- a) La conexión al sistema estructural es más fácil para la mayoría de los disipadores metálicos, excepto para los soleras.
- b) El acceso con propósitos de mantenimiento es más sencillo.
- c) Esta disposición geométrica permite que se utilice a estos dispositivos incluso para edificios altos.

El uso de montado concéntrico se limita a edificios de baja y mediana altura, debido a la pequeña capacidad relativa de los dispositivos metálicos para resistir grandes cargas axiales (Tena-Colunga 2002).

La manera más fácil de modelar a los dispositivos disipadores consiste en modelar, en el intervalo de comportamiento elástico, al sistema contraviento-disipador por medio de elementos denominados diagonales equivalentes, donde la rigidez axial de cada una de las diagonales es función de la geometría del sistema y de las rigideces relativas de los elementos disipadores y de los contravientos usados, considerando que el sistema contraviento-disipador funciona esencialmente como un sistema de resortes en serie en el intervalo de comportamiento elástico (Tena 2000).

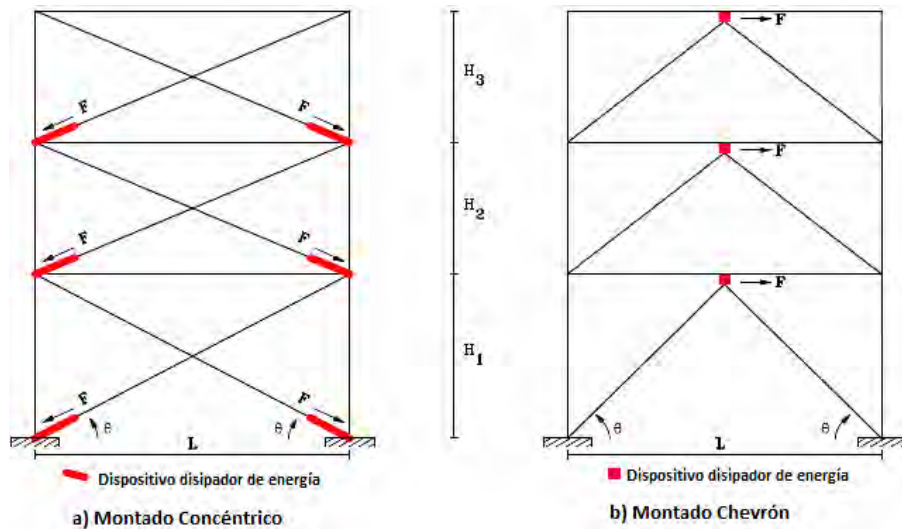


Figura 0.1. Montado de disipadores de energía en marcos contraventeados (Adaptado de Tena 2000)

Por ejemplo, para disipadores de energía colocados en montado concéntrico y que trabajan axialmente, como pudiera ser el caso de los dispositivos solera (figura 3.1.a), la rigidez axial de cada diagonal equivalente (K_{eq}) con respecto a su eje longitudinal principal estaría dada por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{1}{K_{DDE}} \quad (3.1)$$

donde K_{diag} es la rigidez axial elástica del elemento diagonal concéntrico con respecto a su eje longitudinal principal, mientras que K_{DDE} es la rigidez elástica del dispositivo disipador de energía con respecto a las coordenadas locales del

elemento diagonal equivalente que, para este arreglo, es generalmente la rigidez elástica del disipador.

En el caso que los disipadores se monten en contravientos tipo chevrón (figura 3.1.b), éstos estarían trabajando en el mismo sentido lateral que la estructura, pero en una dirección oblicua con respecto al eje longitudinal de las diagonales que forman parte del contraventeo chevrón. Se puede demostrar que, para este caso, la rigidez axial de cada diagonal equivalente (K_{eq}) con respecto a su eje longitudinal principal estaría dada por la siguiente expresión, siempre y cuando el contraventeo chevrón cuente con diagonales con la misma longitud y el mismo ángulo de inclinación medido con respecto al eje horizontal (θ):

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{2\cos^2\theta}{K_{DDE}} \quad (3.2)$$

donde K_{diag} es la rigidez axial elástica de cada una de las diagonales que forman parte del contraventeo chevrón con respecto a su eje longitudinal principal, mientras que K_{DDE} es la rigidez elástica del dispositivo disipador de energía.

3.2.1 Dispositivos Solera

La geometría de los dispositivos solera y su arreglo típico se presenta en la figura 3.2. En los dispositivos solera, la disipación de energía se produce por la histéresis asociada al rolado por flexión de las soleras. Cuando los dispositivos se disponen en un arreglo con diagonales concéntricas, estos dispositivos trabajan en la misma dirección que las diagonales (figura 3.1.a), mientras que en un arreglo con contraventeo chevrón, trabajan en la dirección horizontal, oblicua a las diagonales (figura 3.1.b). Por lo tanto, para fines del cálculo de las diagonales equivalentes definidas por las ecuaciones 1 y 2, K_{DDE} es simplemente la rigidez elástica inicial del dispositivo solera (K_{DS}).

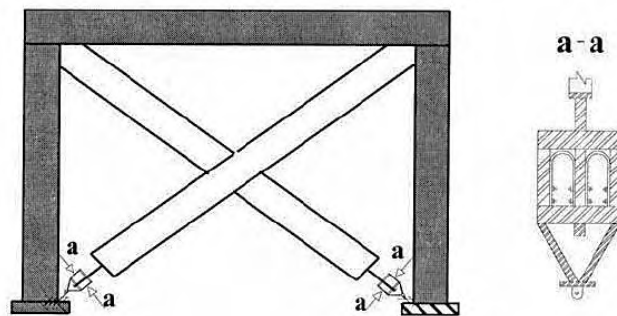


Figura 0.2. Colocación y geometría de los dispositivos solera (Tena 2000)

De acuerdo con el modelo histerético general propuesto por Aguirre y Sánchez en 1992 con base en sus investigaciones experimentales, la curva primaria de cualquier dispositivo solera estaría dada por las siguientes expresiones:

$$K_{DDE} = K_{DS} = 4.24 \frac{F_u}{e} \quad (3.3)$$

$$K_2 = 0.134 \frac{F_u}{e} = 0.032 K_{DS} \quad (3.4)$$

$$F_u = F_{uDS} = \frac{M_p}{R} = \frac{\sigma_u b e^2}{4R} \quad (3.5)$$

$$A = 8e \quad (3.6)$$

$$\Delta_y = 0.1782e \quad (3.7)$$

$$\Delta_u = 2e \quad (3.8)$$

$$F_y = 0.756 F_{uDS} \quad (3.9)$$

donde:

σ_u es el esfuerzo último del acero con que se hace la solera

b es el ancho de cada solera (figura 3.3)

R es el radio medio de la curvatura de la solera (figura 3.3)

e es el espesor de la solera (figura 3.3)

K_2 es la rigidez posterior a la fluencia del dispositivo solera

F_y es la fuerza de fluencia del dispositivo solera

F_u es la capacidad última del dispositivo solera

Δ_y el desplazamiento de fluencia del dispositivo solera

Δ_u es el desplazamiento último del dispositivo solera

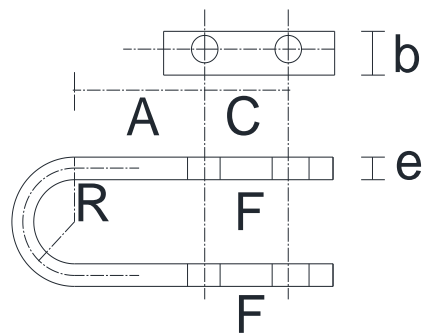


Figura 0.3. Elemento Solera (Tena 2000)

De acuerdo con el estudio presentado por Aguirre y Sánchez en 1992, una de las propiedades requeridas para que los dispositivos solera sean capaces de resistir 100 ciclos con un desplazamiento máximo de ± 2.5 cm. De acuerdo al experimento que ellos realizaron, esta condición se satisface aceptablemente cuando el esfuerzo nominal σ_n es igual a 0.14 y la dimensión de A tiene un valor de 10 cm. De este modo, para un dispositivo solera que soporta 100 ciclos de carga con un desplazamiento máximo de $\pm 2e$, se debe cumplir que

$$R = 3.57e \quad (3.10)$$

por lo que en este caso la rigidez elástica inicial y la capacidad última del dispositivo solera se puede estimar como:

$$K_{DDE} = K_{DS} = n(0.297\sigma_u b) \quad (3.11)$$

$$F_u = F_{uDS} = n(0.07\sigma_u b e) \quad (3.12)$$

donde n es el número de soleras en forma de "U" que forman 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 $\sigma_u=4200$ kg/cm².

3.2.2 Dispositivos ADAS

En la figura 3.4 se presenta la geometría típica de un dispositivo ADAS. Los ADAS están formados por placas de acero estructural de sección variable cuya forma se asemeja al perfil de un reloj de arena. Estos dispositivos trabajan básicamente a cortante, plastificándose casi en su totalidad en doble curvatura para disipar energía por histéresis (Tena 2000).

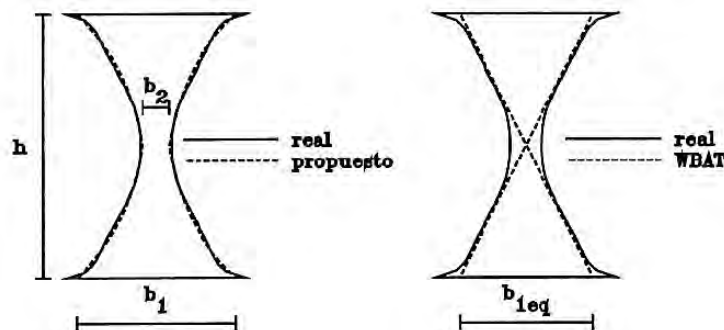


Figura 0.4. Comparación de las geometrías idealizadas con la real para las placas de los dispositivos ADAS (Tena 2000)

En el arreglo de diagonales concéntricas o en "X" (figura 3.1.a), resultaría muy difícil hacer trabajar a los ADAS, pues se requerirían detalles de conexión muy complicados entre las diagonales y los elementos estructurales originales para garantizar el adecuado trabajo de los dispositivos. El mejor arreglo para utilizar los dispositivos ADAS es montarlos en contraventeos chevrón, donde trabajan en la dirección horizontal, oblicua a las diagonales (fig 3.1.b).

La matriz de rigidez de un elemento elástico no prismático, tal como las placas que componen al dispositivo ADAS, se puede definir usando el método de la flexibilidad. Para ello, se debe aproximar la forma de las placas de los ADAS usando funciones exponenciales (Tena-Colunga 1997), como se muestra a continuación:

$$b(z) = b_1 e^{-\alpha z} \quad 0 \leq z \leq h/2 \quad (3.13)$$

$$b(z) = b_2 e^{-\alpha(z-h/2)} \quad h/2 \leq z \leq h \quad (3.14)$$

$$\alpha = \frac{2}{h} \ln \left(\frac{b_1}{b_2} \right) \quad (3.15)$$

De acuerdo con un análisis de regresión realizado con datos de la geometría real de los ADAS, el mejor ajuste se obtiene cuando las dimensiones b_1 y b_2 para las funciones exponenciales definidas arriba están dadas por:

$$b_1 = 0.60 h \quad (3.16)$$

$$b_2 = 0.10 h \quad (3.17)$$

La matriz de flexibilidad está definida de la manera siguiente:

$$[f] = \begin{bmatrix} f_{11} & 0 & 0 \\ 0 & f_{22} & f_{26} \\ 0 & f_{62} & f_{66} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Con los parámetros geométricos definidos y con una serie de deducciones matemáticas hechas por Tena-Colunga (1997), K_{DDE} , la rigidez elástica inicial del dispositivo ADAS (K_{ADAS}), estaría dada por:

$$K_{DDE} = K_{ADAS} = n \frac{f_{66}}{f_{22}f_{66} - f_{26}^2} \quad (3.19)$$

$$f_{22} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{h^3}{2b_1 \ln(b_1/b_2)} \left[\frac{b_1}{b_2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{[\ln(b_1/b_2)]^2} \right) - 1 - \frac{1}{\ln(b_1/b_2)} - \frac{1}{[\ln(b_1/b_2)]^2} \right] \right\} + \frac{78h}{25Et b_1 \ln(b_1/b_2)} (b_1 - 1) \quad (3.20)$$

$$f_{26} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{h^2}{2b_1 \ln(b_1/b_2)} (b_1 - 1) \right\} \quad (3.21)$$

$$f_{66} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{h}{b_1 \ln(b_1/b_2)} (b_1 - 1) \right\} \quad (3.22)$$

donde n es el número de placas en forma de reloj de arena que forman parte del dispositivo ADAS, b_1 es el ancho de las placas en sus extremos (figura 3.4), b_2 es el ancho de la garganta de las placas, t es el espesor de cada placa, h es la altura de las placas, y E es el módulo de elasticidad del acero con que se fabrican las placas de los dispositivos ADAS (acero A-36).

La capacidad última a cortante de un dispositivo ADAS estaría dada, de acuerdo con la modelación propuesta por Tena-Colunga (1997):

$$F_u = V_{ADAS} = n \left(\frac{\sigma_y (b_1 - b_2) t^2}{2h} \right) \quad (3.23)$$

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

$$\Delta_y = \frac{V_{ADAS}}{K_{ADAS}} \quad (3.24)$$

En estudios previos por Whittaker y colaboradores en 1989, Tena 1995, Tena-Colunga 1997, se ha reportado que los desplazamientos de fluencia calculados con los procedimientos analíticos aquí presentados son subestimados con respecto a los obtenidos en pruebas experimentales, porque en éstas últimas 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 llegan a experimentar deslizamientos y rotaciones en sus extremos (Tena 2000).

Para fines de diseño y de análisis no lineal, se puede considerar de manera simplista que los dispositivos ADAS tienen un comportamiento elastoplástico perfecto ($K_2=0$). Sin embargo, de acuerdo con el comportamiento observado en pruebas experimentales, estos dispositivos tienen un comportamiento bilineal. La pendiente posterior a la fluencia de los dispositivos ADAS ha mostrado mucha variación en ensayos de dispositivos montados sobre una estructura en mesa vibradora, y en ensayos individuales de los dispositivos ante carga cíclica varían

entre 2% y 10% según reporta Whittaker y colaboradores en 1989; sin embargo, para fines prácticos y razonablemente conservadores, se puede considerar que esta pendiente es aproximadamente del 5% la pendiente elástica (Tena 2000), es decir, $K_2=0.05K_{ADAS}$.

En ensayos experimentales se ha observado que los dispositivos ADAS son capaces de desarrollar demandas de ductilidad locales del orden de 10 ($\Delta_u=10 \Delta_y$) sin sufrir degradación en su resistencia, por lo que este valor debe ser tomado como un indicador del nivel de deformación que debe tolerarse para fines de diseño. De hecho, en Whittaker y colaboradores (1989) se reporta la prueba de un dispositivo ADAS que fue sujeto a 160 ciclos de carga, de los cuales 124 ciclos correspondieron a amplitudes asociadas a demandas de ductilidad locales entre 10 y 14. Los lazos histeréticos muestran un comportamiento estable, como lo muestran también los trabajos experimentales presentados por Bergman y Goel en 1987 y por Scholl en 1988, según lo reporta Tena (2000).

3.2.3 Dispositivos TADAS

Los dispositivos TADAS son en realidad una variante del dispositivo ADAS, por lo que también trabajan básicamente a cortante, pero con la diferencia que la plastificación para disipar energía por histéresis se produce en curvatura simple, ya que se encuentran articulados en su vértice (Tena 2000).

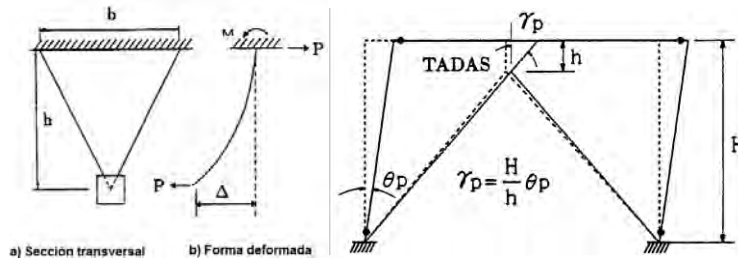


Figura 0.5. Geometría y comportamiento de un dispositivo TADAS
(Tsai *et al.* 1993)

Como se muestra en la figura 3.5, cuando un desplazamiento impuesto es perpendicular al plano de una placa triangular fija, la curvatura de momento es uniformemente distribuida. Por lo tanto, la fluencia puede ocurrir simultáneamente sobre toda la altura de la placa. Si se supone que la base de la placa triangular está completamente restringida y omitiendo la deformación por cortante, la rigidez teórica lateral elástico de un dispositivo TADAS propuesta por Tsai y colaboradores (1993) es:

$$K_{DDE} = K_{TADAS} = n \left[\frac{1}{6} E b \left(\frac{t}{h} \right)^3 \right] \quad (3.25)$$

donde n es el número de placas triangulares que forman parte del dispositivo TADAS, b es el ancho de las placas en sus extremos (figura 3.5), h es la altura de las placas, y E es el módulo de elasticidad del acero con que se fabrican las placas de los dispositivos TADAS (acero A-36). El cortante de fluencia y el cortante último de un dispositivo TADAS están dados por:

$$V_y^{TADAS} = n \left(\frac{\sigma_y b t^2}{6h} \right) \quad (3.26)$$

$$F_u = V_{TADAS} = n \left(\frac{\sigma_y b t^2}{4h} \right) \quad (3.27)$$

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

$$\Delta_y = \frac{\sigma_y h^2}{Et} \quad (3.28)$$

Si el ángulo rotacional γ del dispositivo se define como el cociente entre el desplazamiento lateral y la altura de la placa triangular, entonces el ángulo rotacional de fluencia, γ_y , es:

$$\gamma_y = \frac{\sigma_y h}{Et} \quad (3.29)$$

Se puede deducir que de las ecuaciones anteriores que el cociente h/t de la placa es un parámetro importante para las características mecánicas del dispositivo TADAS. Está claro que la rigidez del dispositivo aumenta rápidamente mientras que la altura de la placa disminuye o el ancho de la placa aumenta. Además, es posible elegir un cociente pequeño de h/t para que la placa logre una gran rigidez mientras que se cambia la altura y el ancho de la placa simultáneamente para alcanzar un desplazamiento específico de fluencia según reportan Tsai y Chen en 1992 (Tsai *et al.* 1993).

Para fines de diseño y de análisis no lineal, se puede considerar que los dispositivos TADAS tienen un comportamiento bilineal, donde la pendiente posterior a la fluencia de los dispositivos TADAS puede estimarse entre 3% y 5% de la pendiente elástica, si no se toma en cuenta el intervalo en que estos dispositivos presentan endurecimiento por deformación. Los resultados de los

ensayos experimentales presentados por Tsai *et al.* (1993) muestran que los dispositivos TADAS 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 ($\Delta_u = 10\Delta_y$) cuando se presenta el endurecimiento por deformación, por lo que este intervalo puede ser tomado como un indicador del nivel de deformación que debe tolerarse para fines de diseño, aunque en este caso debe también revisarse con mayor detalle la información correspondiente a cuántos ciclos de carga se puede sostener esta deformación (Tena 2000).

3.3 Modelado para análisis no lineales

Algunas recomendaciones generales para el análisis y el diseño de estructuras con dispositivos disipadores de energía se han hecho basado en estudios paramétricos de análisis dinámicos no lineales basados en modelos simples. Los análisis dinámicos no lineales de estructuras con dispositivos disipadores de energía son muy importantes desde el punto de vista de investigación pues uno puede modelar el comportamiento previsto de estructuras complejas con varias condiciones de carga dinámicas que no pueden ser posibles estudiar experimentalmente, proporcionando información adicional para mejorar procedimientos de diseño y las pautas de sistemas estructurales con tales sistemas (Tena-Colunga 2002).

3.3.1 Rigidez efectiva de un disipador

En el diseño de estructuras con disipadores de energía debe revisarse que los disipadores y los elementos estructurales convencionales sean capaces de soportar las fuerzas sísmicas de diseño si se supone que los disipadores pueden desarrollar una cierta ductilidad local μ . Para ello, se debe definir la rigidez efectiva del disipador, K_{DDE} , suponiendo que su comportamiento es bilineal y que puede desarrollar esa ductilidad local μ .

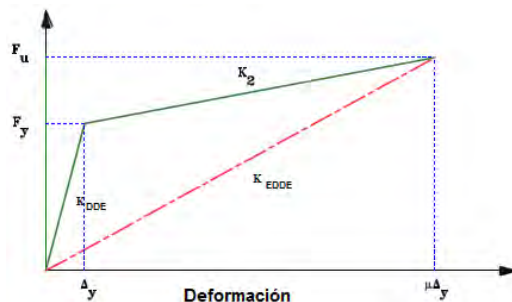


Figura 0.6. Curva típica bilineal fuerza-deformación de un dispositivo disipador de energía (Tena 2002)

De acuerdo con la figura 3.6 la rigidez efectiva del disipador se calcula como:

$$K_{EDDE} = \frac{K_{DDE} + K_2(\mu - 1)}{\mu} \quad (3.30)$$

3.3.2 Método de la diagonal equivalente

Un modelado analítico que ha sido muy utilizado en estudios paramétricos de estructuras con dispositivos disipadores de energía es el modelo de la diagonal equivalente. El cual consiste en agrupar y sustituir a los contravientos y a los disipadores por elementos diagonales que se suponen equivalentes en el intervalo no lineal (figura 3.7). En este modelado, la curva primaria (figura 3.6) se define como sigue a continuación. La fuerza de fluencia (F_y), la fuerza última (F_u) y la rigidez posterior a la fluencia (K_2) son exactamente las del disipador de energía, mientras que la rigidez elástica inicial (K_{eq}) se calcula como sigue.

Para el montaje concéntrico de los disipadores de la energía:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{1}{K_{EDDE}} \quad (3.31)$$

y para un montaje chevrón:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{2\cos^2\theta}{K_{EDDE}} \quad (3.32)$$

Se observa que aunque con estas ecuaciones se obtiene la rigidez axial correcta de una diagonal equivalente en sus coordenadas locales en el intervalo elástico, este modelo no es válido para ser equivalentes en el intervalo no lineal, pues no está sustentada con los principios de la mecánica estructural, de análisis no lineal o con la teoría de la plasticidad (Tena-Colunga 2002).

Además otro punto desfavorable de este modelado es que no permite monitorear individualmente el comportamiento específico de disipadores y de los contravientos, por lo tanto, es difícil determinar independientemente si hay una deficiencia en su diseño, un punto particularmente importante para proyectos de reparación y rehabilitación de edificios, donde el criterio para la sustitución de contravientos es muy importante (Tena-Colunga 2002).

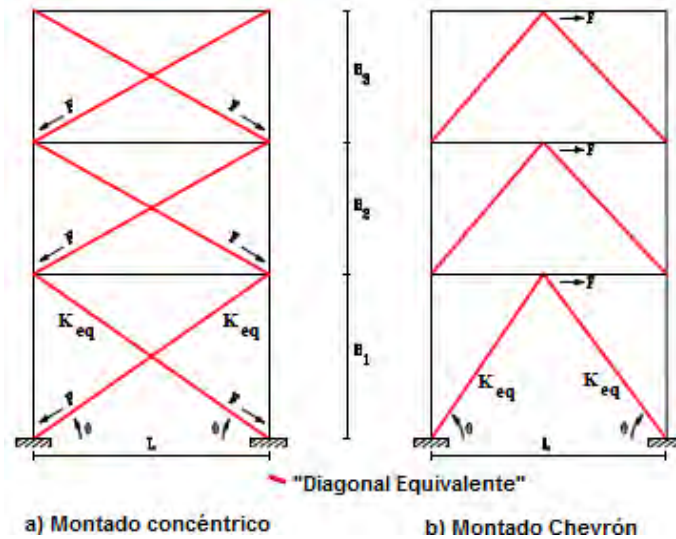


Figura 0.7. Modelo de la diagonal equivalente (Adaptado de Tena-Colunga 2002)

Tena (2000) demostró la imprecisión que el modelado de la diagonal no lineal "equivalente" depende de los siguientes factores:

- a) El contraste entre las rigideces elásticas de los disipadores y las diagonales de los contravientos (K_{DDE}/K_{diag}).
- b) La pendiente posterior a la fluencia de los disipadores (K_2).
- c) El nivel de ductilidad por desplazamiento que desarrollen los disipadores (μ)
- d) En el caso de disipadores montados en un arreglo chevrón, el ángulo de inclinación de las diagonales (θ).

Por lo tanto, el modelo de la diagonal equivalente debe utilizarse exclusivamente en análisis elásticos, y para fines de prediseño. Este modelo no debe utilizarse en el intervalo de comportamiento no lineal, pues como demostró Tena, la modelación de este tipo no es equivalente, sino que también es erróneo.

3.3.3 Método del elemento axial equivalente

Otro procedimiento que también ha sido utilizado en análisis no lineales es modelar a las diagonales por separado de los elementos disipadores, los cuales se incluyen utilizando elementos axiales equivalentes como se ilustra en la figura 3.8, tanto para un contraventeo chevrón como para un contraventeo concéntrico. Las propiedades de rigidez, resistencia e histéresis del elemento axial equivalente corresponden a las del disipador, de acuerdo con el arreglo utilizado (Tena 2000). Para contraventeos concéntricos, la rigidez y la resistencia de cada elemento axial equivalente está dada por:

$$K_{eaeq} = 2K_{DDE}\cos^2\theta \quad (3.33)$$

$$F_{uaeq} = 2F_u\cos\theta \quad (3.34)$$

Mientras que un arreglo chevrón, estas propiedades están definidas por:

$$K_{eaeq} = 0.5K_{DDE} \quad (3.35)$$

$$F_{uaeq} = 0.5F_u \quad (3.36)$$

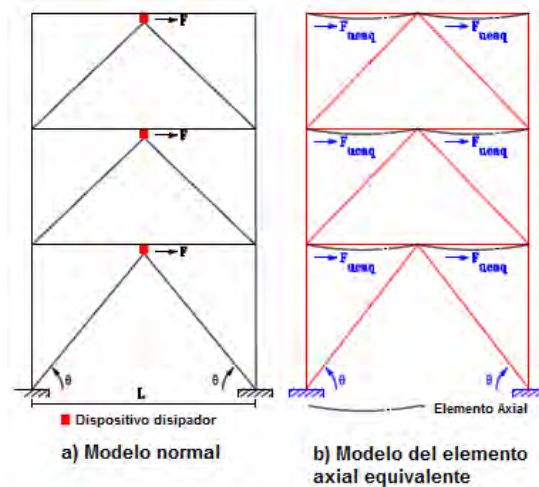


Figura 0.8. Modelo del elemento axial equivalente
(Adaptado de Tena-Colunga 2002).

Aunque este modelado no es totalmente idóneo, resulta mucho más apropiado que el de la diagonal no lineal "equivalente". En el caso de un contraventeo chevrón la aproximación es, en teoría, bastante buena, ya que los elementos equivalentes trabajan en la misma dirección que lo hacen los dispositivos, aunque aquí las imprecisiones se deberían a la interacción artificial que se establece entre los nudos superiores de los marcos de cada entrepiso con los disipadores, lo que en realidad no sucede al estar los disipadores conectados exclusivamente en la parte intermedia de las vigas (Tena 2000).

Sin embargo, esta influencia debe ser despreciable para marcos con vigas axialmente rígidas y con una rigidez intermedia a flexión, que es el caso más general en edificios de concreto reforzado. La aproximación debe disminuir cuando se presentan giros importantes en los nudos de los marcos, ya que este modelado depende de éstos no sean considerables. Además, este procedimiento no permite tomar en cuenta las rotaciones locales que pueden presentarse en los

elementos disipadores, ya sea en la unión con la viga superior y/o con los contravientos.

Para el caso de disipadores colocados en contravientos concéntricos, se incurren en imprecisiones adicionales, resultado de tener que proyectar, desde un principio, las rigideces y fuerzas de los disipadores en un eje horizontal, despreciando la componente vertical que debiera, con cierto rigor, también modelarse. Además, en caso que la estructura se idealice empotrada en su base, se tendrían problemas adicionales para modelar la disipación de energía en el primer entrepiso, ya que si se colocan los disipadores en la base, los elementos axiales equivalentes no podrían representarlos, debido a las condiciones de apoyo. Por lo tanto, no se recomienda el uso del método de los elementos axiales equivalentes para disipadores de energía montados en diagonales concéntricas (Tena 2000).

ESTADO DEL ARTE EN APLICACIONES DE DISIPADORES POR HISTÉRESIS DEL MATERIAL

4.1 Introducción

Cuando se construyeron los primeros edificios altos, seguramente las fuerzas sísmicas se incluyeron sin tomar en cuenta las características dinámicas de la estructura y la magnitud real del sismo. La historia demuestra que primero se construyeron las grandes ciudades, posteriormente, al menos ocurrió un sismo catastrófico y después se reglamentó en materia sísmica (Granados *et al.* 2006)

Como se ha explicado en capítulos anteriores, actualmente existen métodos para el diseño sismorresistente de edificios empleando técnicas de control de la respuesta sísmica. Estos métodos, además de emplearse en el diseño de una estructura original, también se utilizan en la reparación y rehabilitación de estructuras dañadas por sismos intensos. En este capítulo se presenta una síntesis lo más completa posible de los edificios, reparados o concebidos originalmente desde el diseño, con disipadores histeréticos que existen en la actualidad. Al igual que en el capítulo dos se ha dividido en dos partes; aquéllos que se encuentran en México y los que se encuentran fuera del país.

4.2 Ámbito Nacional

4.2.1 Reparación

El primer edificio que se reestructuró con disipadores de energía ADAS en México fue el Edificio que se encuentra en Izazaga 38-40 en el año de 1989. Este edificio consta de 12 niveles por encima del nivel del terreno, un sótano y un cuarto de máquinas de dos niveles situado por encima del nivel del techo del edificio (figura 4.1). El edificio fue construido en la década de los setentas, con un sistema estructural a base de marcos de concreto reforzado, con algunos muros estructurales (Martínez-Romero 1993).

El edificio experimentó daño estructural moderado durante los sismos de 1985, debido a la alta flexibilidad a causa de los marcos de concreto con losas planas reticulares. Una primera reparación se llevó a cabo agregando muros a cortante y agregando pequeñas columnas de concreto para incrementar la rigidez lateral del edificio en conjunto. Los sismos de 1986 y 1989 demostraron la ineficiencia de esta técnica de reparación para este edificio. Por lo tanto, tomando en cuenta que

la rehabilitación inicial no funcionó satisfactoriamente, se decidió reestructurar nuevamente implantando disipadores tipo ADAS de manera que el edificio rehabilitado cumpliera con los requisitos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento del Distrito Federal de 1987 (Tena 2003).



Figura 0.1. Edificio Izazaga 38- 40 (<http://maps.google.com.mx/>)

El segundo edificio con disipadores de energía en México fue el Hospital de Cardiología del Centro Médico Siglo XXI del IMSS, formalmente identificado como “Centro Médico” y tristemente recordado por las numerosas muertes provocadas por el daño estructural intenso debido al sismo de 1985. El edificio de cinco niveles de marcos de concreto reforzado construido en los años setenta y ubicado en la zona de lago de la ciudad de México (colonia Roma) se rehabilitó colocando externamente a la estructura original disipadores ADAS montados sobre contrafuertes (figura 4.2). Este arreglo en contrafuertes se diseñó para que durante la obra no se interfiriera con la operación del hospital, lo que fue requerido por el IMSS (Tena 2003).

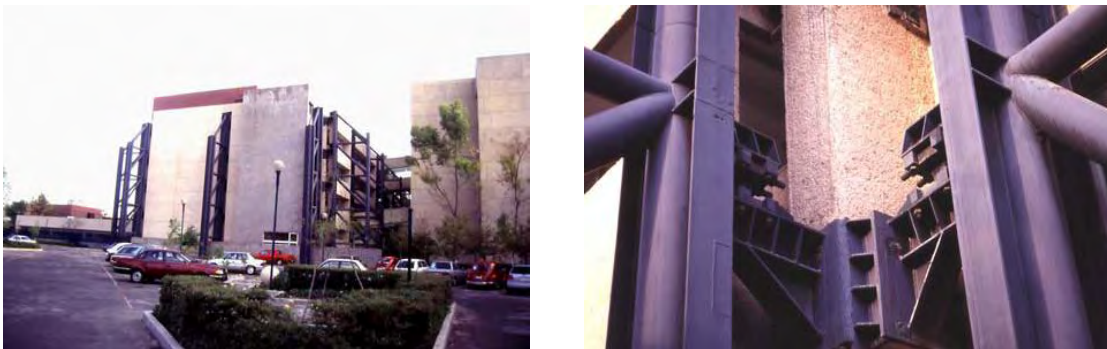


Figura 0.2. Reestructuración del Hospital de Cardiología del Centro Médico Siglo XXI (Tena 2003)

El tercer proyecto de reestructuración con dispositivos ADAS corresponde al complejo de oficinas centrales del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) que data de los años cuarenta, formado por tres edificios de doce pisos, estructurados originalmente con base en marcos de concreto reforzado. Los edificios se encuentran ubicados en Avenida Paseo de la Reforma No. 476 (figura 4.3), dentro de la frontera de la zona del lago de la ciudad de México y la transición de depósitos blandos (Tena 2003).

Con más de 50 años de servicio, el edificio ha sobrevivido por lo menos once terremotos importantes de magnitudes mayores a $M_s=7.0$; el 28 de julio de 1957, se presentó uno de $M_s=7.5$, produjo daño estructural moderado y no estructural significativo. El 19 de septiembre de 1985, el terremoto de $M_s=8.1$, no produjo la misma cantidad de daño que el terremoto 1957. Según el punto de vista de Martínez-Romero (1993), se debió a dos razones principales:

- 1) la dirección más fuerte de las ondas sísmicas del terremoto 1957 fue sur-norte, tomando el edificio en su dirección más débil, con respecto a los terremotos de 1985, cuya dirección más fuerte de sus ondas sísmicas fue en la dirección oeste-este (que coincide con ser la dirección más fuerte del edificio), y
- 2) Los terremotos de 1985 encontraron una estructura y una cimentación más fuertes que la original.



Figura 0.3. Complejo de oficinas centrales del Instituto Mexicano del Seguro Social (<http://maps.google.com.mx/>)

El edificio Monterrey, destinado para oficinas, fue construido a principio de los años 80's y se ubica en la Av. Monterrey esquina Av. Oaxaca en la Ciudad de México (figura 4.4). Consta de un nivel de sótano y 13 niveles arriba de la banqueta, y su estructura sufrió daños durante los sismos intensos ocurridos desde la década de los ochentas. Su estructuración es con base en marcos continuos en ambas direcciones de concreto reforzado, con un sistema de losa

maciza de 10 cm de espesor; la cimentación consta de un cajón de cimentación con pilotes de fricción.



Figura 0.4. Reestructuración del edificio Torre Monterrey (fotos cortesía de EMRSA, Tena 2003)

El edificio no cumplía con los estados límite reglamentarios de falla y de servicio, por lo que se decidió implantar dispositivos disipadores de energía del tipo ADAS, mismo sistema que agregó al edificio rigidez y amortiguamiento, logrando disminuir las ordenadas espectrales, las fuerzas en la superestructura y las descargas a la cimentación (Martínez y Méndez 2004).

Otro edificio reparado con esta técnica es el edificio SAGAR que se ubica en la avenida Insurgentes Sur, en la zona de suelo de transición de la ciudad de México. El edificio de concreto reforzado y de planta trapezoidal tiene un sótano, 22 pisos y un helipuerto, y su estructura original ante cargas laterales era mixta, con base en marcos con columnas y losa plana aligerada en la dirección paralela a Av. Insurgentes Sur y este tipo de marcos y muros de cortante perimetrales en la dirección perpendicular según reporta Ayala y colaboradores en el 2000 (Tena 2003).



Figura 0.5. Edificio SAGAR (fotos cortesía Gustavo Ayala y Raúl Jean, Tena 2003)

Debido a que su desempeño no fue satisfactorio ante varios sismos que se han presentado en la ciudad de México, entre ellos los de septiembre de 1985, sus actuales dueños tomaron la decisión de reestructurar el edificio. El proyecto de la empresa IOISSA contempló la adición de contravientos metálicos en V conectados a los disipadores tipo viga propuestos por el Ing. Ortega Beltrán (figura 4.5).

El edificio se reestructuró de esta manera entre 1998 y 1999. Para contar con información confiable sobre su comportamiento, se instrumentó temporalmente al edificio instalando cinco acelerómetros distribuidos en la altura del edificio, que registraron cinco sismos relativamente importantes entre junio de 1999 y agosto de 2000, lo que permitió interpretar esta información. Durante estos eventos, la respuesta ha sido elástica, pero las mediciones han permitido validar modelos analíticos del edificio que pueden ser utilizados para estudiar con más detalle el trabajo de los disipadores ante sismos más intensos según reporta Ayala y sus colaboradores en el 2000 (Tena 2003).

4.2.2 Diseño Original

En 1998, la empresa EMRSA tuvo a cargo el primer proyecto diseñado originalmente con disipadores de energía tipo ADAS en el país y se trata de un conjunto de edificios de almacén de autos nuevos en Acapulco, Guerrero. El complejo lo componen tres edificios de cinco niveles para el almacenaje temporal de autos nuevos y su inspección fiscal previa a su embarque de exportación, propiedad de la empresa Transportación Marítima Mexicana (TMM). Los edificios se ubican sobre un predio adyacente a los muelles de cabotaje fiscal y de barcos de turismo en Acapulco (Tena 2003).

Para el diseño se consideró información específica del sitio (estudios de geología, mecánica de suelos, espectros de sitio, etc), estudios de riesgo sísmico y el Reglamento de las Construcciones de esa ciudad, además de modelos tridimensionales y análisis no lineales paso a paso que permitieron al diseñador obtener una solución razonable usando una estructura de acero a base de marcos donde en algunas crujías se montaron dispositivos ADAS en contravientos tipo chevrón (Tena 2003).

El diseño estructural fue tal que en teoría se logra que todo el comportamiento inelástico de los edificios ante sismos intensos se concentre en los dispositivos ADAS, por lo cual la energía la disipan estos dispositivos y no los demás elementos estructurales (vigas, columnas y contravientos). Martínez Romero

reporta que la construcción de los edificios fue muy rápida (84 días), lo cual se logró a un costo reducido para una estructura de este tipo ubicada en una zona de muy alta sismicidad en México, ya que resultó ser muy ligera, con aproximadamente 52 kg/m^2 (Tena 2003).

En la misma ciudad de Acapulco, EMRSA tuvo a su cargo otro diseño estructural con base a los dispositivos disipadores de energía, esta vez se trató de un conjunto de condominios de lujo compuesto por tres torres esbeltas de 28 niveles ubicadas en la zona costera de la Bahía de Acapulco (figura 4.6). La construcción del complejo se terminó en 2002.



Figura 0.6. Conjunto la Jolla (Cortesía de EMRSA, Tena 2003)

El diseño estructural se hizo de manera que los dispositivos ADAS funcionan como línea de defensa y respuesta inelástica ante sismos, dejando al resto de elementos estructurales como una segunda línea de defensa. Se consideró un factor de comportamiento sísmico $Q=2$ para el diseño de los elementos estructurales convencionales, detallando las conexiones viga-columna conforme a esta hipótesis según lo recomendado por los reglamentos mexicanos y el AISC (Tena 2003).

METODOLOGÍA Y ALCANCES

En el presente trabajo se plantea el estudio de marcos planos de concreto reforzado, con un sistema de contraventeo de acero del tipo chevrón que servirá de soporte a dispositivos disipadores de energía por histéresis del material (figura 5.1). Se partió de las siguientes hipótesis: el sistema de marcos es competente para resistir cargas verticales, además de las fuerzas sísmicas de diseño, para que interactúe exclusivamente en el intervalo elástico. El sistema de contraventeo, que servirá de soporte a los disipadores de energía, se comportará elásticamente. Los disipadores de energía por histéresis serán los únicos que deberán trabajar inelásticamente para soportar las cargas laterales.

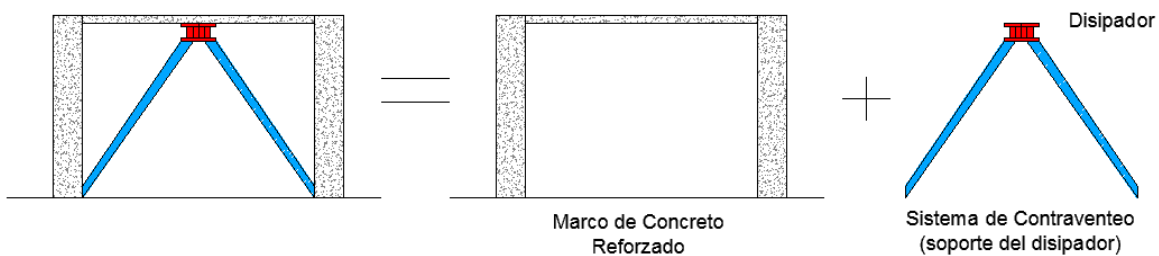


Figura 0.1. Sistema de marcos con contraventeo y disipador

5.1 Primera etapa de la investigación

Durante la primera etapa de la investigación se procedió a realizar el prediseño del sistema de marco por separado del sistema contraviento-disipador con base en una serie de parámetros propuestos y siguiendo el procedimiento que a continuación se describe:

- Selección de la configuración estructural y número de los niveles de los marcos en estudio.
- Selección de los parámetros α y β que se definen adelante, basados en un balance de rigideces propuestos.
- Planteamiento de la metodología de prediseño por rigideces de los marcos con disipadores.
- Diseño de cada uno de los elementos estructurales para los modelos seleccionados (columnas, vigas, contravientos, disipadores).

5.1.1 Configuración estructural

La configuración de los marcos en estudio corresponden a edificios regulares, formados por crujías de 800 cm de claro, cuatro crujías en la dirección X y tres en la dirección Y (figura 5.2), de los cuales, los marcos exteriores (en ambas direcciones) cuentan con el sistema contraviento-disipador en las crujías de la periferia. En la dirección "x" cuenta con vigas secundarias diseñadas para cumplir con los estados límites de deformación, además, se diseñó el sistema de piso que consta de una losa maciza de concreto.

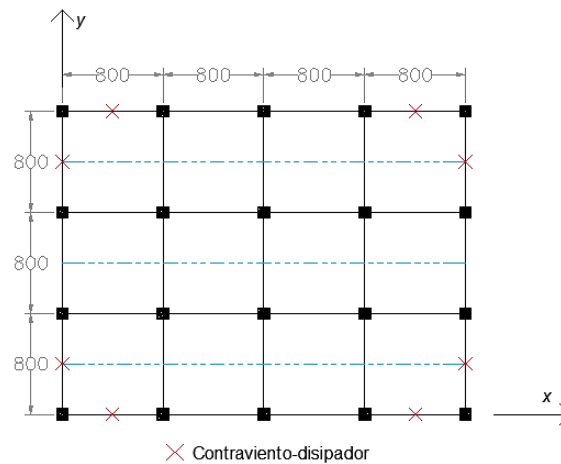


Figura 0.2. Configuración en planta de los marcos analizados

La primera variable a considerar en este estudio paramétrico fue el grado de inclinación del contraviento con respecto al nivel de piso, empleándose alturas típicas de entrepiso de los edificios construidos en la ciudad de México. Se usaron dos modelos distintos de marcos planos; el primero de ellos, con un ángulo de $\theta=45^\circ$ ($H=4\text{m}$), y el segundo con una inclinación $\theta=40^\circ$ ($H=3.36\text{m}$). Ambos modelos se varían en altura con distintos números de niveles (figura 5.3).

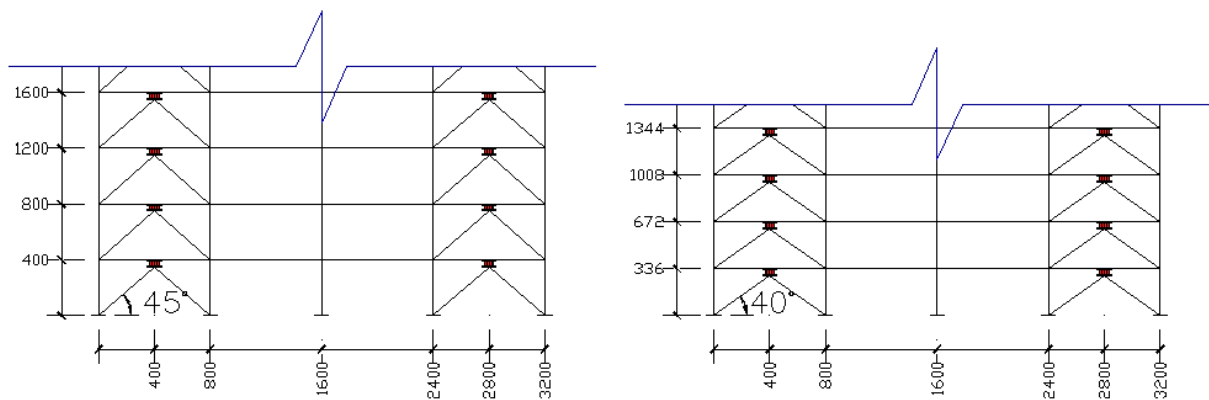


Figura 0.3. Configuración de los marcos planos analizados

El tener diversos modelos con diferentes alturas y distintas relaciones de esbeltez (tabla 5.1) permite una mejor comprensión del comportamiento de las estructuras con disipadores histeréticos, además de establecer la relación de estas variables con la ductilidad global de los marcos, las distorsiones de entrepiso, el comportamiento individual de los disipadores, entre otros parámetros representativos, dado que en un estudio paramétrico previo sobre modelos simplificados que incluyen sólo al contraviento y al disipador se observó que si existe diferencia en la eficiencia de disipadores montados en contravientos chevrón en función del ángulo de inclinación θ de las diagonales (Tena 2000).

Niveles	Altura (m)	H/L
5	20	0.625
10	40	1.25
15	60	1.875
20	80	2.5
25	100	3.125

a) $\theta = 45^\circ$

Niveles	Altura (m)	H/L
5	16.8	0.525
10	33.6	1.05
15	50.4	1.575
20	67.2	2.1
25	84	2.625

b) $\theta = 40^\circ$

Tabla 5.1. Relaciones de esbeltez de los modelos analizados

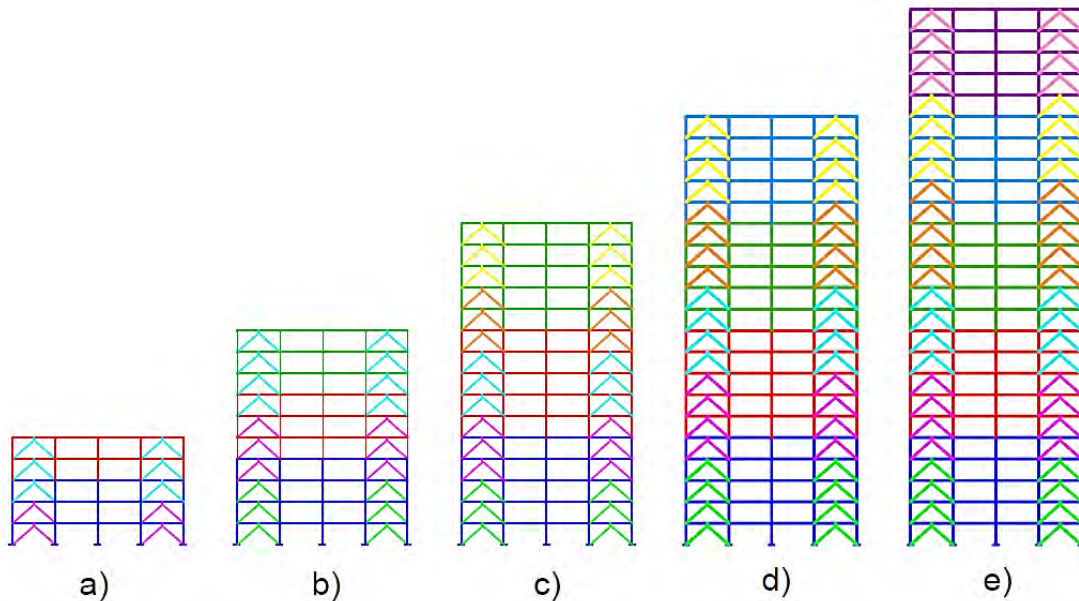


Figura 0.4. Representación de los cambios de sección para los modelos estudiados. Los colores ilustran esquemáticamente los cambios de sección

Además se discutió los intervalos de niveles en que deberían presentarse los cambios de secciones en vigas y columnas en combinación con los del sistema de contraventeo, y así evitar la posible formación de pisos débiles debido a los contrastes de rigideces y de resistencias. Por ello, se aprecia en la tabla 5.2 que se decidió que en ningún nivel, para todos los modelos estudiados, debería presentarse un cambio de vigas y columnas junto con uno de contraventeo (figura 5.4).

NIVELES	COL-VIGAS	CV-DISP
5	1 - 3	1 - 2
	4 - 5	3 - 5
10	1 - 4	1 - 3
	5 - 7	4 - 6
	8 - 10	7 - 10
15		1 - 3
	1 - 5	4 - 6
	6 - 10	7 - 9
	11 - 15	10 - 12
		13 - 15
20	1 - 5	1 - 4
	6 - 10	5 - 8
	11 - 15	9 - 12
	16 - 20	13 - 16
		17 - 20
25	1 - 5	1 - 4
	6 - 10	5 - 8
	11 - 15	9 - 12
	16 - 20	13 - 17
	21 - 25	18 - 21
		22 - 25

Tabla 5.2. Intervalos de niveles para los cambios de sección en los modelos utilizados.

Como se aprecia en la tabla 5.2 para los niveles de cinco y diez niveles, la cantidad de cambios de sección para columnas y vigas son del mismo orden que para los de contraventeo. Para los modelos de 15 a 25 niveles, se hicieron cambios de sección en intervalos de cinco niveles para cada uno de estos modelos. Como se observa en la tabla, se necesitaron más intervalos de cambio de sección de contraventeo que para los de columnas y vigas, esto con el fin de no hacer coincidir un nivel donde se presentará el cambio de todos los elementos estructurales a la vez.

5.1.2 Casos de estudio

Además de los parámetros mencionados en la sección anterior, útiles en la configuración estructural, se estudiaron otras variables que se consideran interesantes para monitorear el aporte que tiene cada uno de los elementos de manera individual al aporte en el sistema global estructural. La finalidad de delimitar estas variables es la de recomendar balances óptimos que garanticen que el marco permanezca elástico y el disipador de energía sea aquél que reciba el mayor daño posible.

Una de estas variables es el balance de rigidez lateral que deberán de aportar los marcos (K_{marco}) con respecto a la rigidez lateral total del sistema marco-contraviento disipador (K_{total}), y se expresa con la letra griega “ α ”, es decir, $\alpha=K_{\text{marco}}/K_{\text{total}}$. Con este objetivo en mente, se propusieron tres casos diferentes.

CASO I. Cuando el sistema del marco de concreto reforzado es lateralmente menos rígido que el sistema contraviento-disipador ($\alpha=25\%$), en el cuál se pretende que el disipador de energía sea quien resista la mayor parte de la demanda de fuerza que le induce el sismo a la estructura completa.

CASO II. Cuando el sistema del marco de concreto reforzado es igual de rígido que el sistema contraviento-disipador ($\alpha=50\%$), con este balance se espera que el dispositivo histerético disipe la mayor cantidad de energía posible y los elementos estructurales del marco no reciban daño estructural considerable.

CASO III. Cuando el sistema del marco de concreto reforzado es lateralmente más rígido que el sistema contraviento-disipador ($\alpha=75\%$), en este balance el aporte del marco será mucho mayor que el del contraviento-disipador.

Además de los balances arriba mencionados, se proponen los balances de rigidez que debe tener los contravientos de soporte (K_{diag}) con respecto a la rigidez elástica del disipador de energía (K_{DDE}), para que estos alcancen la máxima capacidad de deformación que se le permita desarrollar, y se expresa con la letra griega “ β ”, es decir, $\beta=K_{\text{DDE}}/K_{\text{diag}}$.

Por lo tanto, se consideraron los siguientes balances: $\beta=1.0$, $\beta=0.75$, $\beta=0.50$, $\beta=0.25$, donde $\beta=1.0$ indica que la rigidez del contraviento es la misma que la del disipador, y los valores inferiores a este valor de beta indica que el disipador es menos rígido que el contraviento de soporte. La empresa EMRSA utilizó en sus proyectos con disipadores de energía ADAS valores de beta que varían entre el

0.25 y 0.50. Cabe aclarar que en esta investigación no se proponen valores de beta mayores a 1.0, porque se supone que si el disipador es más rígido que el contraviento.

La última variable a considerar, y no por ello la menos importante, es la pendiente posterior a la fluencia que presentan los disipadores de energía, denotado por la variable K_2 . En la actualidad muchos de los investigadores e ingenieros en la práctica idealizan su comportamiento histerético como elastoplástico perfecto ($K_2=0$). Pero en este estudio se valorará, además de este caso, un comportamiento bilineal por parte de los disipadores de energía, por lo cual se utilizaron los siguientes valores: $K_2=0.00$, $K_2=0.03$ y $K_2=0.05$, que cubre de manera práctica el intervalo de valores reportados en investigaciones experimentales (por ejemplo, Whittaker *et al.* 1989, Aguirre y Sánchez 1992, Tsai *et al.* 1993)

En la figura 5.5 se resume en forma de cuadro sinóptico todas las variables consideradas para todos los modelos en esta investigación, para tener un panorama amplio del total de marcos planos evaluados (360 en total, 180 para cada ángulo θ) y las distintas configuraciones que se estudiaron.

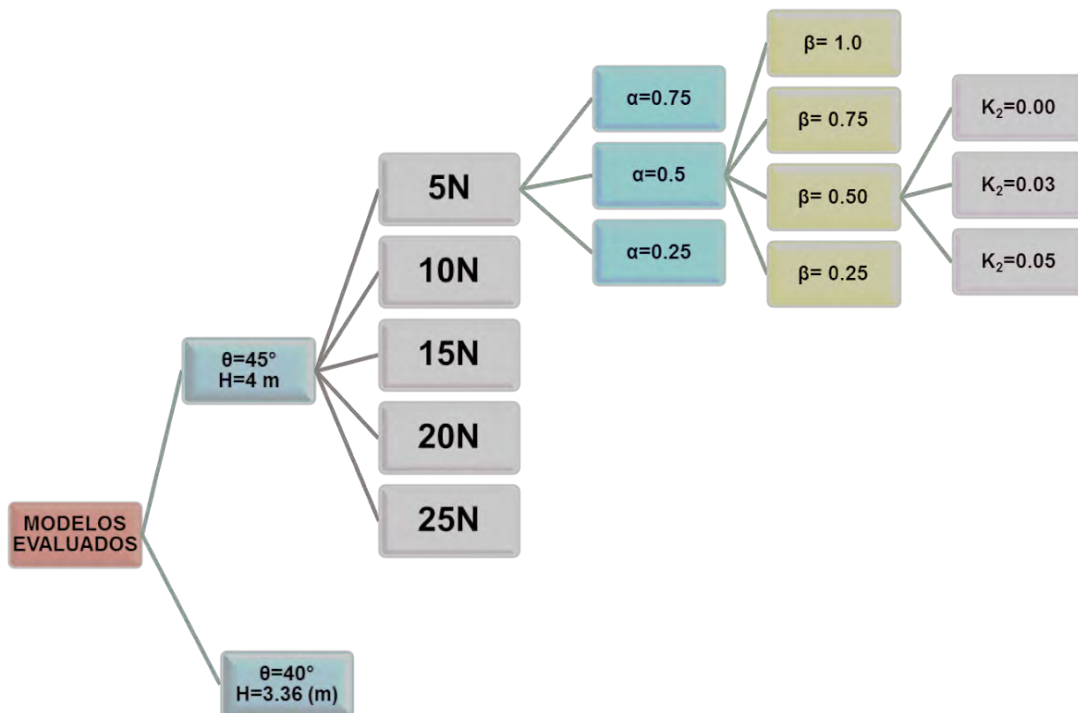


Figura 0.5. Modelos evaluados de marcos planos con los diversos parámetros tomados en cuenta

5.1.3 Descripción de la metodología de diseño

Conforme a lo establecido por Tena (2010), se realizó un procedimiento de prediseño por rigidez para los marcos con disipadores, que se describe a continuación:

1. Se definió un cortante sísmico de diseño V , que para este caso se supuso del 10% del peso total de la estructura ($V=0.1W$). Esta decisión fue tomada pensando que la presente investigación podría adaptarse a los coeficientes sísmicos de diseño ya reducidos por concepto de ductilidad y sobrerresistencia conocidos actualmente dentro de las normas técnicas complementarias para la zona del lago del Distrito Federal o bien para algunas zonas costeras del país de acuerdo al Manual de Obras Civiles emitidas por CFE (MOC-08).

2. Se determinó la proporción de la rigidez lateral que aportan los marcos y el sistema contraviento-disipador:

$$K_{total} = K_{marco} + K_{contraviento-disipador} \quad (5.1)$$

$$K_{marco} = \alpha K_{total} \quad (5.2)$$

$$K_{contraviento-disipador} = (1 - \alpha) K_{total} \quad (5.3)$$

3. Se determinó el cortante basal de diseño que resistirán los marcos en ausencia del sistema de contraviento, para que se comporten de manera elástica calculándose simplemente como:

$$V_{marco} = \alpha V_{total} \quad (5.4)$$

En función de ello, se calculan las fuerzas laterales por sismo que se aplicarían en cada uno de los niveles en función de una distribución triangular invertida conforme al método estático.

4. Se prediseñan columnas y vigas del marco sin contraviento para soportar la combinación de cargas laterales y verticales (calculadas en el punto 3) de diseño, multiplicadas por los factores de carga correspondientes. Se debe revisar también que las vigas cumplan con los estados límites de deformación de servicio.

5. Una vez prediseñados los elementos estructurales del marco, se procede a calcular su rigidez lateral de entrepiso con la fórmula de Wilbur (Bazán y Meli 1999), que consideran la flexibilidad de las vigas en marcos regulares.

$$K_{marco} = \frac{48E}{h_1 \left(\frac{4h_1}{\sum_{i=1}^{ncol} \frac{I_{ci}}{h_{ci}}} + \frac{h_1+h_2}{\sum_{i=1}^{ntrabe} \frac{I_{tj}}{l_{tj}} + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{ncol} \frac{I_{ci}}{h_{ci}}} \right)} \quad (5.5)$$

donde h_1 y h_2 son las alturas del primero y segundo entrepiso, $ntrabe$ es el número total de trabes del marco en el primer entrepiso, I_{tj} y l_{tj} son respectivamente el momento de inercia con respecto al eje principal de flexión y la longitud de la trabe “j” de interés.

6. A partir de conocer la rigidez y la resistencia lateral que le toca resistir al sistema contraviento-disipador, éstos se pueden prediseñar con la siguiente ecuación:

$$K_{contraviento-disipador} = (1 - \alpha)K_{total} = nK_{eq} \quad (5.6)$$

donde “n” es el número de contravientos que se utilizan para montar los disipadores de energía y K_{eq} es la rigidez de un elemento axial equivalente, que toma en cuenta la rigidez elástica del contraviento (K_{diag}) y la rigidez efectiva del disipador (K_{EDDE}) a la ductilidad μ que se le permite desarrollar. En el caso de un contraviento chevrón con un ángulo de inclinación θ , la rigidez equivalente se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{2\cos^2\theta}{K_{EDDE}} \quad (5.7)$$

$$K_{diag} = \frac{E_{diag}A_{diag}}{L_{diag}} \cos^2\theta \quad (5.8)$$

$$K_{EDDE} = \frac{K_{DDE} + K_2(\mu - 1)}{\mu} \quad (5.9)$$

donde K_{DDE} y K_2 son respectivamente la rigidez elástica y la rigidez posterior a la fluencia del elemento disipador de energía, idealizando su comportamiento histerético como bilineal (figura 5.6).

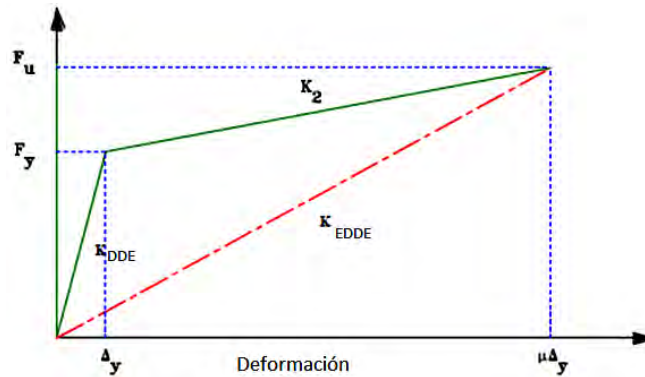


Figura 0.6. Curva típica fuerza-deformación de un dispositivo con comportamiento bilineal (Tena 2000)

7. Se debe tomar una decisión sobre el balance entre la rigidez elástica del disipador de energía (K_{DDE}) y la de los contravientos de soporte (K_{diag}), para la capacidad de deformación que se le permita desarrollar, μ .

$$\beta = \frac{K_{DDE}}{K_{diag}} \quad (5.10)$$

En función de ello, se determinan las rigideces elásticas requeridas tanto de los disipadores como de los contravientos. Por otra parte, se desea que el sistema contraviento-disipador aporte la siguiente resistencia:

$$V_{contraviento-disipador} = (1 - \alpha)V_{total} = nV_{u_{C-D}} \quad (5.11)$$

donde $V_{u_{C-D}}$ es el cortante que aportaría cada diagonal equivalente contraviento-disipador; esta resistencia estará controlada por la fluencia de los disipadores a la capacidad de deformación μ . Por lo tanto, en un montado chevrón, se tiene que el cortante último de diseño de cada disipador, V_{uDDE} , se calcula como:

$$V_{uDDE} = 2V_{u_{C-D}} \quad (5.12)$$

5.1.4 Criterio para el diseño de los contravientos

Es importante resaltar que en el diseño de contravientos no basta con definir su rigidez, sino también revisar que éstos se mantengan elásticos cuando los disipadores desarrollen su cortante último a una ductilidad μ . Por lo tanto, la carga axial máxima que resistiría cada contraviento en montado chevrón sería:

$$P_{diag} \geq \frac{V_{uDDE}}{2\cos\theta} \quad (5.13)$$

Con esta carga se debe revisar que en el diseño de los contravientos tenga un factor de seguridad contra pandeo razonable. Para ello, se debe diseñar conforme a las NTCEM-2004 (Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras Metálicas) utilizando la expresión por resistencia última, pero usando un factor adicional de al menos de 1.5, siguiendo recomendaciones del Ing. Martínez Romero (Tena 2011). Por ello, los contravientos deben ser sección tipo I con una relación de esbeltez efectiva que cumpla (NTCEM-2004, Ap. 6.2.3.2):

$$\frac{Kl}{r} < 5.88 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (5.14)$$

y la resistencia se calcula como:

$$R_c = \frac{F_y}{(1+\lambda^{2n}-0.15^{2n})^{1/n}} A_t \leq F_y A_t \quad (5.15)$$

$$\lambda = \frac{kL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} \quad (5.16)$$

donde:

F_y es el esfuerzo de fluencia del material

E es el módulo de elasticidad del acero estructural

A_t el área neta

r el radio de giro mínimo

L la longitud efectiva

k el factor de restricción de la diagonal

$n=1.4$ es el coeficiente adimensional que toma este valor para elementos cajón

λ es un parámetro de esbeltez

La carga axial de diseño se calcula entonces como:

$$P_{diag} = \frac{R_c}{F.S} = \frac{R_c}{1.5} \quad (5.17)$$

Además, se valoró la diferencia entre aplicar las NTCEM-2004 y el criterio de esfuerzos permisibles del AISC para calibrar el factor de seguridad de 1.5 que se aplica a la fórmula de resistencia última de la norma mexicana.

$$P_{diag} = F_a A = \frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3}} \quad (5.18)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (5.19)$$

5.1.5 Criterio para el diseño de vigas y columnas

Toda vez que se estableció la metodología presentada anteriormente, se procedió a prediseñar, empleando por simplicidad análisis estáticos para cada uno de los marcos planos en evaluación, sin considerar la aportación del sistema contraviento-disipador, con las respectivas combinaciones de carga del diseño sismorresistente:

- a) 1.1(CM+CV±Fuerzas Laterales)
- b) 1.4(CM+CV)

Se modelaron los marcos con el programa comercial SAP 2000 (CSI-2005 2005), y a partir de los elementos mecánicos obtenidos se buscaron los valores mayores para cada intervalo propuesto de cambio de sección y se prediseñaron a las columnas y vigas dentro de los estados límites de servicio marcadas en las normas mexicanas.

Las vigas se diseñaron doblemente armadas (figura 5.7) utilizando el procedimiento por tanteos descrito en González y Robles (2005). Las cuantías máximas y mínimas de refuerzo se respetaron conforme a las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento del Distrito Federal. Como era de esperarse para un refuerzo sísmico, los mayores armados se obtuvieron para los momentos negativos en todos los casos. Además, conforme a las mismas normas, se respetó la separación entre los estribos para el desempeño óptimo del elemento ante el refuerzo por cortante.

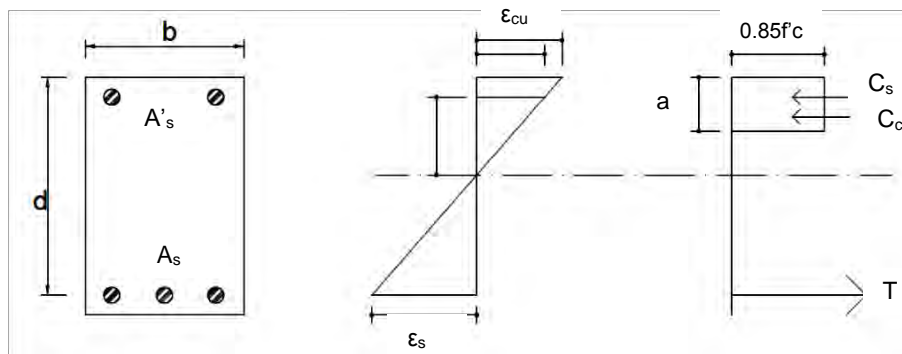


Figura 0.7. Secciones rectangulares doblemente armadas (adaptado de González y Robles 2005)

Para el diseño de las columnas se siguieron las recomendaciones que se disponen en las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras de Concreto Reforzado del Reglamento del Distrito Federal (NTCC-2004 2004). Además, se efectuó un procedimiento para el cálculo aproximado de la carga axial que aportaban los contravientos a las columnas del marco; es decir, aparte de tener en cuenta la carga axial calculada del análisis estructural para las combinaciones de carga descritas anteriormente, se sumó la contribución de la componente vertical que los contravientos transmitían a las columnas (Figura 5.8).

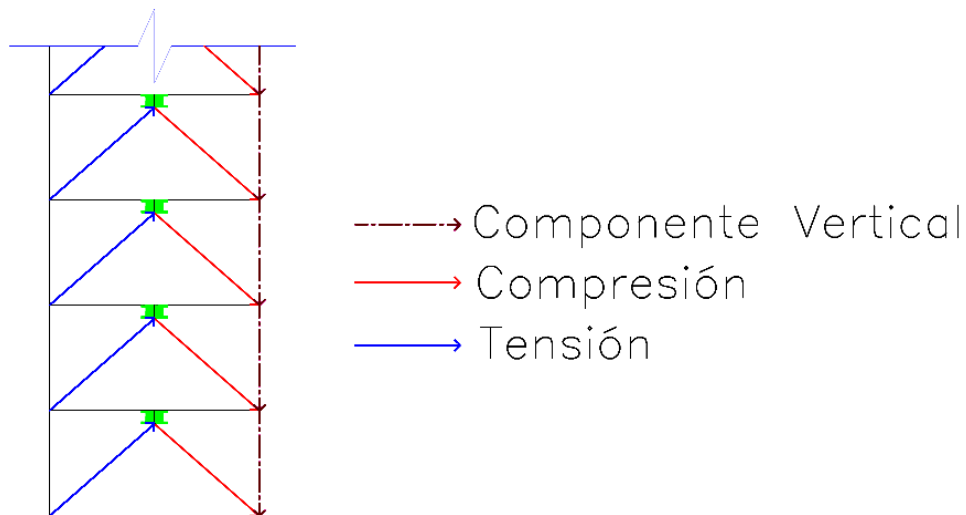


Figura 0.8. Representación del aporte de los contravientos a las columnas

Esta componente de fuerza se calculó a partir de la ecuación 5.13; una vez calculada la fuerza en la diagonal, se proyectó en su componente vertical mediante despejes trigonométricos. Dicha componente vertical era mucho más significativa conforme el balance de rigideces en el contraviento era mayor que en la del marco ($\alpha=25\%$), en conjunto con el incremento en el número de niveles de

los marcos estudiados. Es importante mencionar que por lo general, para los últimos niveles en la mayoría de los casos de estudio, esta componente axial lo único que hacía era sobreestimar la capacidad de las columnas y, por ende, la capacidad del marco en sí.

Para asegurar el mecanismo de columna fuerte y viga débil, el momento de diseño para las columnas se determinaron con base en el equilibrio del nodo en el cual concurre el elemento a diseñar (figura 5.9). Por lo tanto, se consideró que para los diversos casos de estudio se cumpliera la siguiente ecuación:

$$\sum M_{columnas} = 1.5 \sum M_{vigas} \quad (5.20)$$

En el caso de la revisión de los nudos, estos no se revisaron, debido a que no existen lineamientos *específicos* dentro de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento del Distrito Federal para diseñar nudos de marcos dúctiles a los que concurren contravientos y/o dispositivos disipadores de energía.

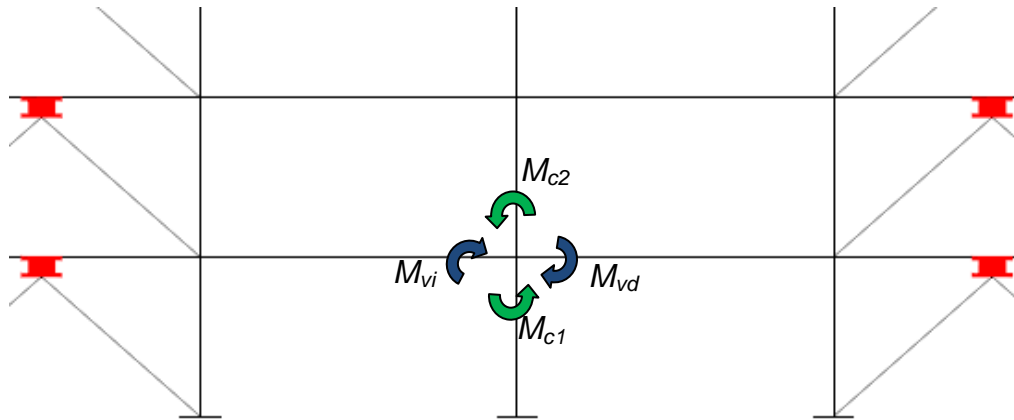


Figura 0.9. Momento de diseño en columnas

5.2 Segunda etapa de la investigación

En la segunda etapa de la investigación se procedió a realizar análisis no lineales ante cargas monótonas crecientes (“pushover”) de los diseños de los marcos de 5, 10, 15, 20 y 25 niveles, con todas las variables que se presentaron y consideraron en la primera etapa de esta investigación. Para llevar a cabo este procedimiento se empleó el software DRAIN-2DX, desarrollado en la universidad de California en Berkeley (Prakash *et al.* 1992).

La estructura se modela en el plano como un ensamblaje de elementos no lineales a través de sus nodos. Cada nodo consta de tres grados de libertad, dos de traslación y uno de rotación, al menos que se restrinja uno o más de ellos. Los elementos se dividen en grupos, y todos los elementos de cada grupo deben ser del mismo tipo. Dichos elementos deben ser numerados de manera secuencial dentro de cada grupo, de esta manera cada elemento puede ser identificado por el número de grupo y el número de elemento.

Para todos los casos se incluyeron efectos $P-\Delta$ en columnas y contravientos, para tomar en cuenta las deflexiones horizontales y las fuerzas internas generadas por los momentos asociados a tal efecto. En esta investigación se ignoró el efecto de la interacción suelo-estructura, ya que se consideró que el número de variables que se manejaban en el actual trabajo eran suficientes para obtener datos fehacientes vinculados al desempeño de los marcos con disipadores de energía por histéresis del material, aunque cabe aclarar que este tema en particular, indiscutiblemente no debería descartarse para investigaciones futuras y de este modo enriquecer los resultados obtenidos y discutidos más adelante.

Dentro de la información procesada de los análisis no lineales se encuentran:

- a) Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía (μ_d)
- b) Balances de rigidez óptimos entre el disipador y el sistema de soporte (contravientos)
- c) Factor de comportamiento sísmico, Q
- d) Factor de reducción por sobrerresistencia, R
- e) Mapeo de rotaciones plásticas normalizadas
- f) Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio
- g) Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de colapso

5.2.1 Criterio para la modelación de contravientos

El contraviento es tal vez el elemento más simple de modelar en el programa DRAIN-2DX; este se modeló como un elemento tipo barra que únicamente puede transmitir carga axial; se consideró que éstos desarrollan su esfuerzo nominal de fluencia a tensión F_y y su capacidad nominal a compresión en función de la carga de pandeo R_c (ecuaciones 5.15 y 5.16) sin utilizar factores de reducción de resistencia, conforme a lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias de las Estructuras de Acero (NTCM-2004 2004). Su comportamiento inelástico se especificó de tal manera que fluyera a tensión y se mantuviera elástico durante el

pandeo a compresión (figura 5.10). Además, se incluye también efectos de endurecimiento por deformación y su comportamiento se considera como elastoplástico perfecto.

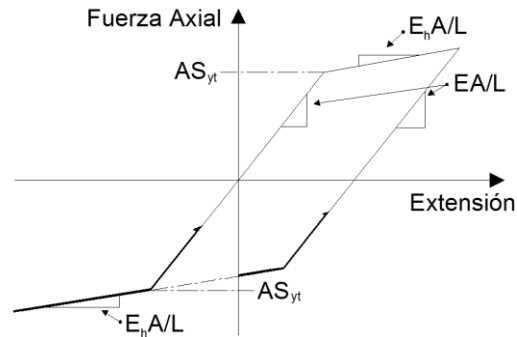


Figura 0.10. Comportamiento inelástico de los contravientos (Prakash *et al.* 1992)

5.2.2 Criterio para la modelación de vigas

Con el fin de calcular las propiedades geométricas de la sección transversal de los elementos viga, se consideraron como elementos rectangulares, es decir, no se incluye el aporte de la losa. El elemento consta con dos articulaciones plásticas en sus extremos, con opción de especificar longitudes de zonas rígidas.

Se empleó el modelo de Kent y Park modificado para concreto confinado para el modelado en función del refuerzo y el detallado utilizado en el diseño. La estimación de las capacidades se llevó a cabo empleando el software BIAx (Wallace y Moehle 1989). Se modeló a este elemento con el código número uno, el cual corresponde a una viga a flexión pura, es decir, sin interacción momento-carga axial (figura 5.11).

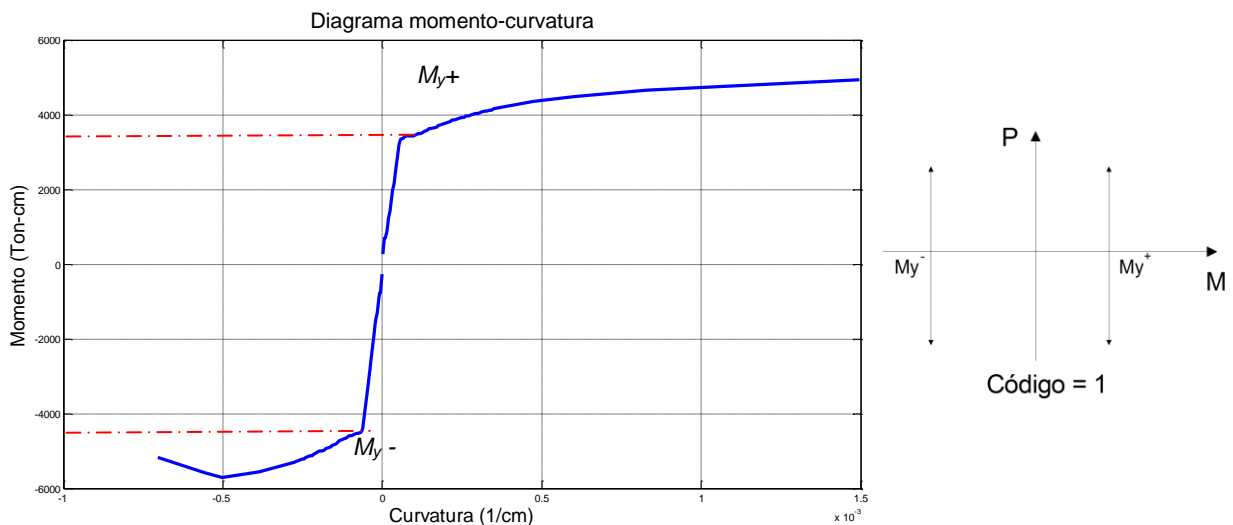


Figura 0.11. Diagrama momento-curvatura de una viga

5.2.3 Criterio para la modelación de las columnas

El modelado de las columnas es muy similar al de las vigas, con la única diferencia de que este elemento se modela con el código número tres, el cual corresponde a columnas de concreto reforzado. Este tipo de elemento necesita de un diagrama de interacción momento-carga axial, del cual, a partir de esta gráfica se obtienen cuatro puntos importantes los cuales servirán para discretizar el diagrama y colocarlos en el archivo de entrada y posteriormente procesarlos con el DRAIN-2DX. Estos puntos son P_{yc} y P_{yt} , que corresponden a las fuerzas de compresión y tensión respectivamente; M_y , que pertenece al momento ante ausencia de carga axial y A, que es el punto de la falla balanceada (figura 5.12).

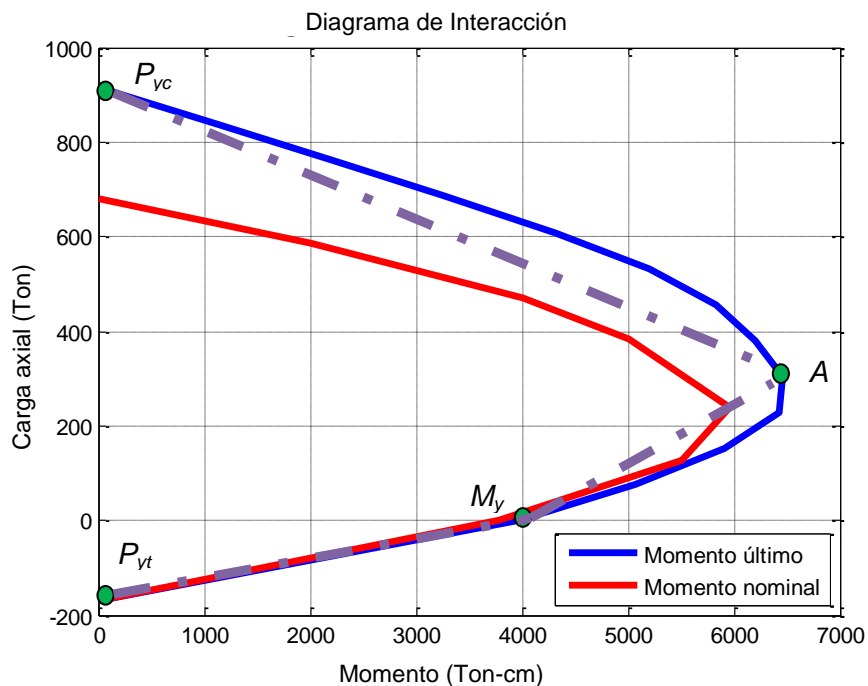


Figura 0.12. Diagrama de Interacción Momento-Carga Axial

5.2.4 Criterio para la modelación de los disipadores

Para el modelado de los disipadores de energía se utilizó el mismo código que se usó para las vigas (elemento tipo 02 librería DRAIN-2DX). Se tomó una altura típica para los disipadores en este estudio paramétrico de $h=50\text{ cm}$, y a partir de este dato y de conocer la rigidez elástica para cada disipador, se pudieron calcular los parámetros geométricos para estos elementos.

$$I_{req} = \frac{K_{DDE} * h^3}{12E} \quad (5.21)$$

Cabe aclarar que para este estudio paramétrico no se usó un dispositivo disipador de energía por histéresis del material en particular, sino que con los datos anteriores se empleó uno de tipo “genérico”, dado que la finalidad de este estudio es evaluar para qué balances de rigideces se desarrollan los intervalos de ductilidades objetivo (μ_{do}), y así poder recomendar cuándo es más efectivo emplear disipadores de energía por histéresis con base en que estos resultados. Otro parámetro importante que se valoró e incluyó en el modelado de los disipadores fue su pendiente posterior a la fluencia, considerándose tres casos: $K_2=0.00$ (modelo elasto-plástico perfecto), $K_2=0.03$ y $K_2=0.05$, estos últimos valores tomando en cuenta las pendientes posteriores a la fluencia determinadas experimentalmente para los disipadores solera, TADAS y ADAS (por ejemplo, Tena 2000, 2003).

Los momentos resistentes en los disipadores se calcularon de forma sencilla, a partir de conocer el cortante resistente en ellos con la siguiente fórmula:

$$M_y = \frac{V_{DISP} * h}{2} \quad (5.22)$$

Con todos los datos reunidos, el último paso para crear los archivos de entrada para el DRAIN-2DX era generar los elementos definiendo el nodo de inicio y el nodo final; este paso se llevaba a cabo del mismo modo para todos los elementos anteriores (contravientos, vigas y columnas).

Se agregó una restricción especial a los disipadores, de tal manera que el nodo inferior de todos éstos no estuviera restringido al giro (rota) y así poder modelar con una condición más realista a estos disipadores, con base en los resultados del estudio presentado por Tena-Colunga (1997) reproduciendo los ensayos en mesa vibradora de los disipadores ADAS montados en contraventeo chevrón ensayados en la mesa vibradora de la Universidad de California en Berkeley.

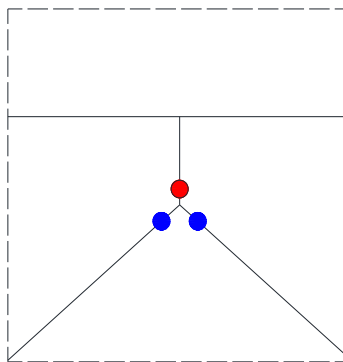


Figura 0.13. Diagrama de cuerpo libre del modelado de los disipadores de energía

De la figura 5.13 se representa en los extremos de los contravientos con círculos de color azul, los nodos que solo pueden tomar carga axial debido a que fueron modelados como elementos barras, y de color rojo el nodo del dissipador el cuál fue restringido al giro escribiendo la restricción "001" dentro de la opción de "restraints" del programa DRAIN 2DX.

5.2.5 Criterio para el mecanismo de colapso

El criterio empleado para el mecanismo de colapso de los marcos estudiados y sometidos a análisis estáticos no lineales, se basa, además de alcanzar la ductilidad objetivo de los dissipadores de energía (μ_d), en la capacidad de rotación plástica teórica de las vigas y de las columnas. Estas rotaciones plásticas se determinaron a partir de diagramas momento-curvatura obtenidas con el programa BIAX (Wallace y Moehle 1989).

El análisis se detuvo cuando la mayoría de los dissipadores alcanzaban la falla, es decir cuando estos desarrollaban ductilidades mayores a la ductilidad objetivo de diez ($\mu_d \geq 10$), Pero a la vez se restringió que este valor no alcanzaran ductilidades mayores a doce ($\mu_d \leq 12$), suponiendo que es a partir de ahí cuando los dissipadores se empiezan a desconectar de su sistema de soporte (contravientos), de no hacer lo anterior los datos teóricos que nos arrojaría el programa serían irreales e inútiles para su postproceso. Por lo tanto, en este estudio consideramos ductilidades objetivo de los dissipadores $10 \leq \mu_{do} \leq 12$.

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS ESTÁTICOS NO LINEALES

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis estáticos no lineales ante carga monótona creciente (“pushover”), de los marcos perimetrales antes mencionados que se usaron para este estudio paramétrico. Para cada modelo se estudiaron los siguientes parámetros:

- Capacidades de deformación inelástica de los disipadores de energía
- Diagramas cortante-distorsión para cada uno de los entrepisos considerados, así como la curva global de cada modelo (Figura 6.1)
- Distorsión de entrepiso asociada a la fluencia (Δ_y) y, por ende, al estado límite de servicio de la estructura (Figura 6.1)
- Distorsión de entrepiso última (Δ_u , Figura 6.1) para alcanzar la ductilidad objetivo de los disipadores (μ_{do}) y, por lo tanto, asociada al desempeño esperado en una estructura con control de la respuesta sísmica para el denominado sismo de diseño.
- Mapeo de rotaciones plásticas acumuladas

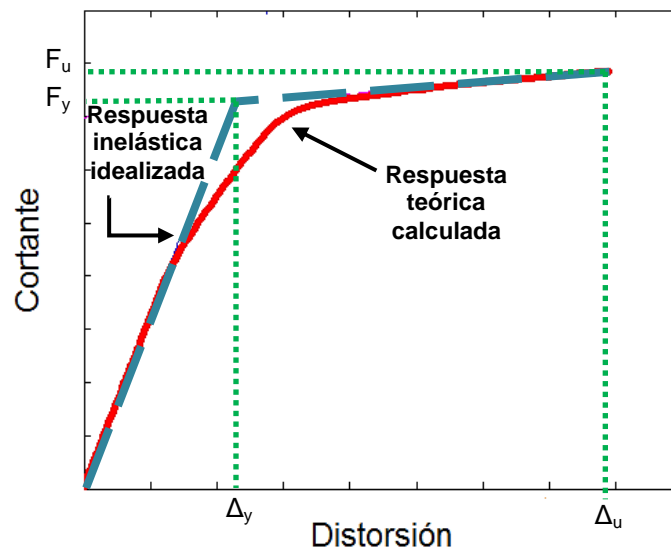


Figura 0.1. Idealización bilineal de los diagramas cortante-distorsión

Como se mencionó en el capítulo anterior, la capacidad de deformación de los disipadores de energía se restringió en función de las ductilidades objetivo (μ_{do}) presentadas en ensayos experimentales, para las cuales no sufren degradación en su resistencia (Whittaker *et al.* 1989), este criterio es de suma importancia, debido a que si se hace caso omiso de lo estipulado, obtendríamos resultados poco realistas de todos los parámetros antes indicados (figura 6.2).

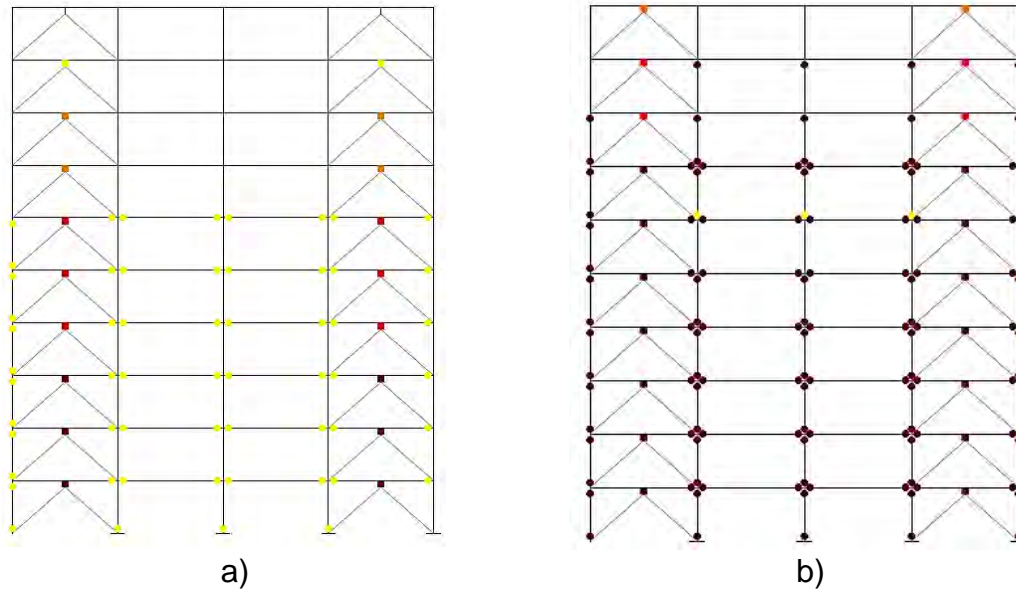


Figura 0.2. Rotaciones plásticas acumuladas a) restringiendo en función de las ductilidades objetivo y b) sin restricciones

6.1 Diagramas de deformación inelástica de los disipadores de energía (μ_d)

En esta sección se presentan los resultados de los niveles de ductilidad teóricos alcanzados por los dispositivos disipadores de energía para el total de los modelos estudiados, con las variables mencionadas en la sección 5.1.2, con el propósito de comparar qué balances de rigidez son los más adecuado para estos sistemas, así como también observar las ductilidades promedio alcanzadas para cada modelo en función de la altura para las configuraciones estudiadas. Como se mencionó anteriormente los modelos varían en altura entre los 16.8 m hasta los 100 m de altura, con el fin de cubrir razonables las alturas de edificios que se observan construidos en Ciudad de México. Para cada una de las cinco variaciones en el número de entrepisos de los marcos estudiados, se obtuvieron dos alturas distintas debido a la inclinación en los contravientos de soporte θ .

En cada una de las gráficas que se muestran a continuación, se presentan las tres pendientes posteriores a la fluencia de los disipadores que se evaluaron en este estudio paramétrico, correspondientes a cada uno de los balances en rigidez entre el sistema del marco y el sistema contraviento-disipador (α), y los balances en rigidez entre el contraviento y el disipador (β). El eje de las abscisas corresponde a las ductilidades locales de los disipadores de energía (μ_d), y el de las ordenadas al número de niveles para los marcos estudiados; las líneas

punteadas representan los límites en los cuales los disipadores presentan un desempeño eficiente ($8 \leq \mu_d \leq 12$).

6.1.1 Modelos de cinco niveles

Para los modelos de cinco niveles se tienen alturas de 16.8 m ($\theta=40^\circ$) y 20 m ($\theta=45^\circ$); el primer parámetro analizado fue el balance de rigidez entre el sistema del contraviento y el del disipador. Como se aprecia en la figura 6.3 mientras el balance β es menor, es decir, que el disipador es más flexible que el contraviento y, por ello, es el fusible del sistema, éstos desarrollan una mayor ductilidad local μ_d , lo que es lo deseable para este sistema. Ésto se aprecia mucho mejor para el primer y último nivel de entrepiso en los modelos analizados.

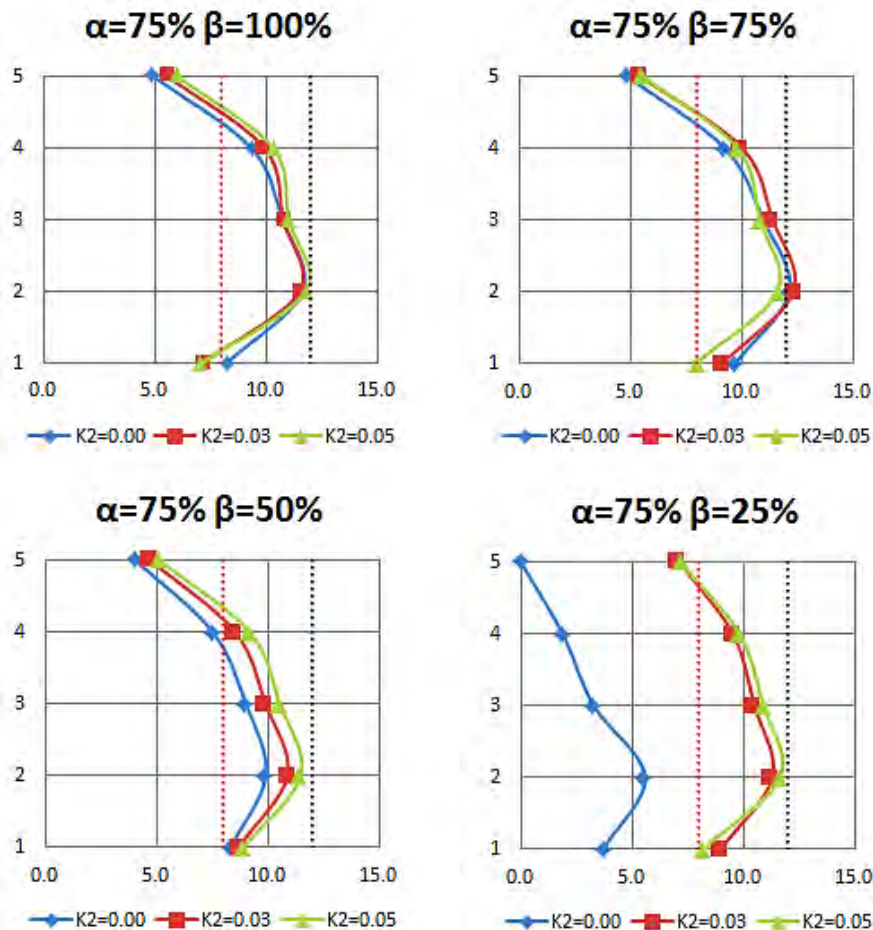


Figura 0.3. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de cinco niveles y $\theta=45^\circ$ para los diversos balances β

Observando las pendientes posteriores a la fluencia K_2 que se evaluaron en esta investigación y de las gráficas comparativas (figura 6.4), se aprecia que este

parámetro marca diferencia en el comportamiento de los disipadores. Se distingue que en general, a medida que la variable K_2 aumenta la ductilidad desarrollada por el disipador también tiende a aumentar, aunque para las curvas correspondientes al 3% y 5%, se observa un comportamiento bastante similar. Sin embargo, cuando se modela al disipador con un comportamiento elastoplástico perfecto ($K_2=0$), los disipadores no alcanzan la ductilidad deseada para su óptimo desempeño, y mientras mayor es la diferencia entre rigideces entre el contraviento y el disipador (β), más notable es esta diferencia.

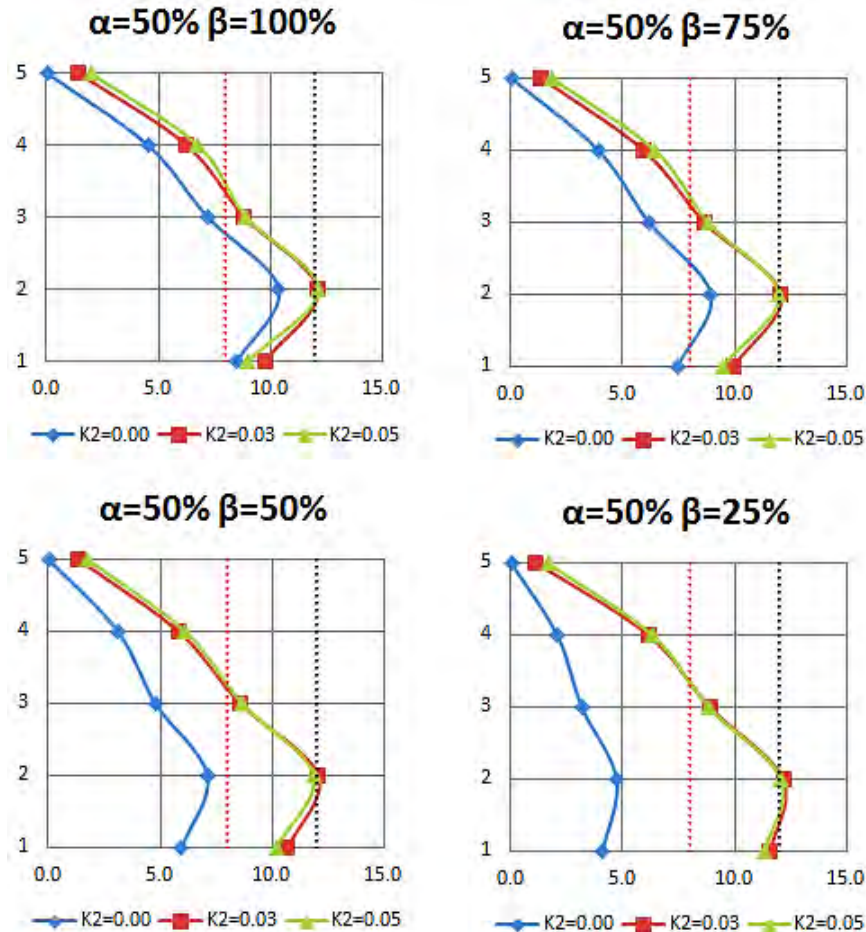


Figura 0.4. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de cinco niveles y $\theta=40^\circ$ para las diversas pendientes posteriores a la fluencia K_2

También se analizó en todos los modelos qué balances de rigidez entre el sistema del marco y el del contraviento-disipador (medidos en términos del parámetro α) presentan resultados favorables en los cuales los disipadores más demandados alcanzaban el intervalo de ductilidad deseado ($8 \leq \mu_d \leq 12$), se observó que para los modelos de 16.8 m y 20 m, el comportamiento es bastante similar, como se aprecia de las figuras 6.5 y 6.6.

Para los modelos donde el sistema del marco le corresponde aportar el 25% ($\alpha=25\%$, figura 6.5a) y el 50% ($\alpha=50\%$, figura 6.5b) de rigidez al sistema global se observan un comportamiento similar, en el cuál en tres de los cinco niveles del modelo presentan ductilidades que van entre ocho y diez, de los cuáles en los dos primeros niveles se presentan las ductilidades mayores.

Para el caso donde el sistema del marco aporta el 75% de la rigidez global de la estructura ($\alpha=75\%$, figura 6.5c), el comportamiento es mucho mejor al de los otros dos estudiados. En este caso se aprecia que son en cuatro niveles de entresijos donde los disipadores trabajan de manera óptima, es decir, un 80% de ellos está trabajando de manera eficiente, por lo cual en edificios de pequeña altura, es éste el balance de rigidez óptimo para que los disipadores desarrollen ductilidades teóricas favorables para su buen desempeño.

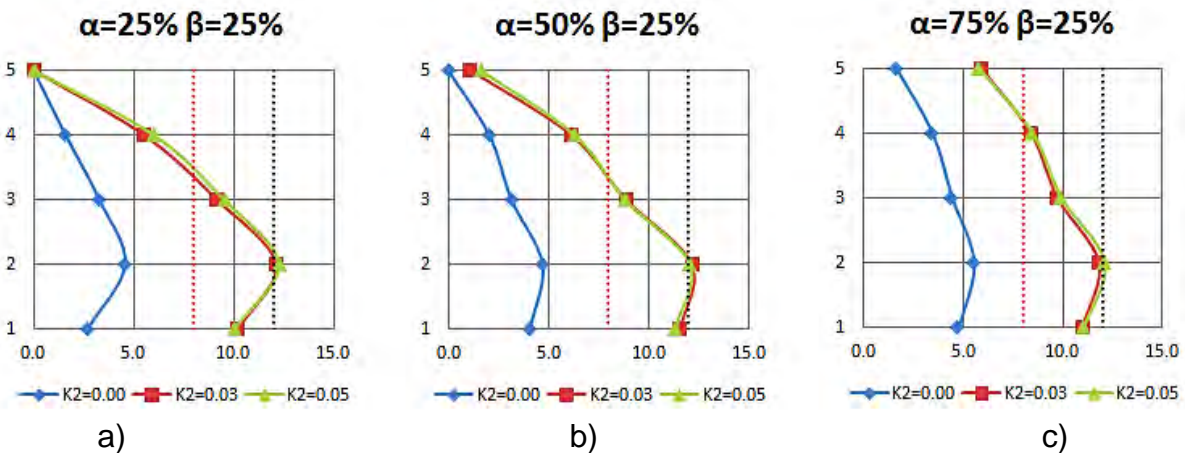


Figura 0.5. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de cinco niveles y $\theta=40^\circ$

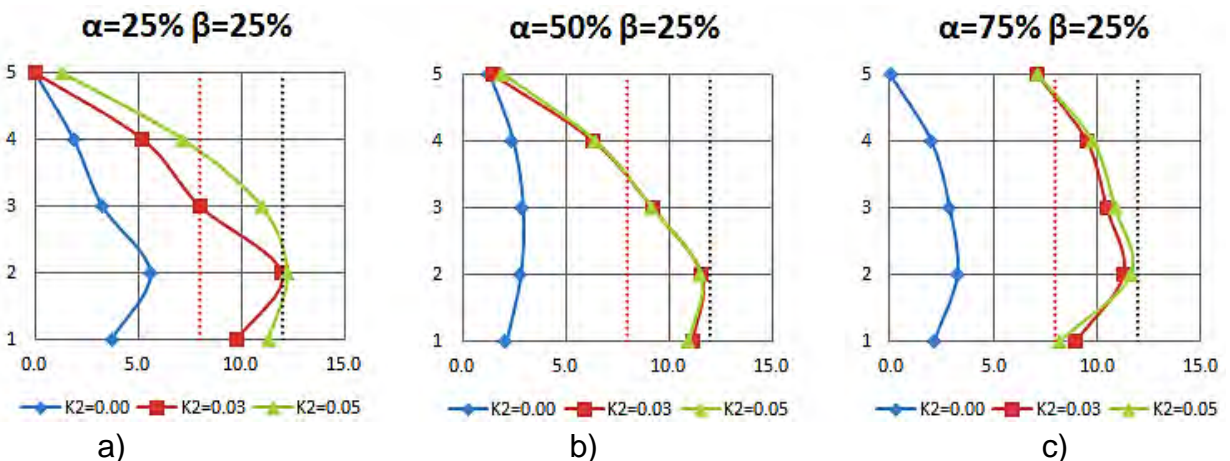


Figura 0.6. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de cinco niveles y $\theta=45^\circ$

6.1.2 Modelos de mediana altura (10 y 15 niveles)

Los modelos de mediana altura van desde los 33.6 m hasta los 60m. El comportamiento que se observa de las pendientes posteriores a la fluencia K_2 de las gráficas comparativas (figura 6.7) es similar al de los modelos de cinco niveles. Se distingue que para los balances donde el el sistema del marco le corresponde aportar el 75% ($\alpha=75\%$) de rigidez al sistema global, la variación de este parámetro estudiado (K_2) no representa gran diferencia para los balances en los cuales el disipador tiene la misma rigidez que el contraviento ($\beta=100\%$), y para aquél donde el disipador le corresponde el 75% de rigidez con respecto al del contraviento ($\beta=75\%$).

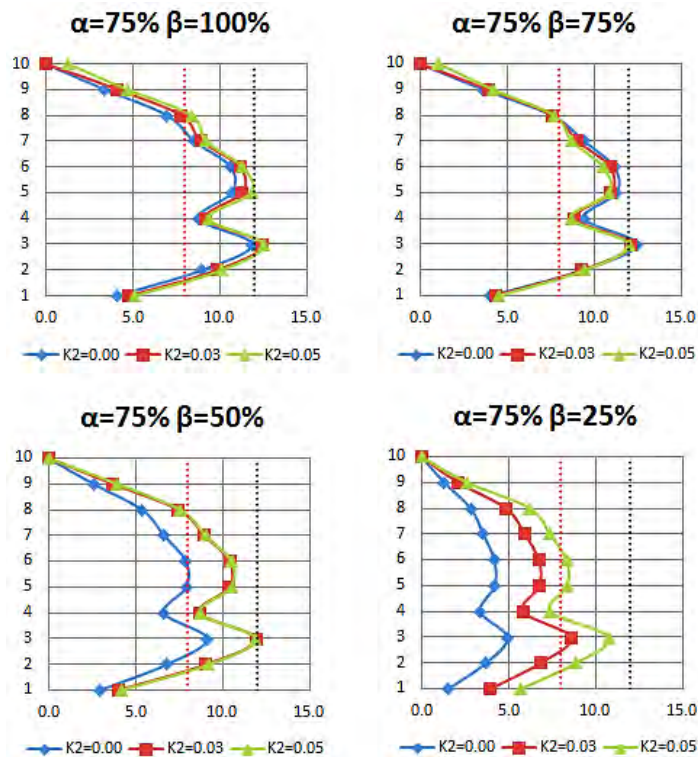


Figura 0.7. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 10 niveles y $\theta=40^\circ$

Para los balances restantes, donde el disipador es más flexible que el contraviento ($\beta=50\%$ y $\beta=25\%$) se aprecia mejor el comportamiento general visto en la gran mayoría de los modelos en el que, a medida que la variable K_2 aumenta, la ductilidad desarrollada por el disipador también tiende a aumentar (figura 6.7). Existe una diferencia notable con respecto al de los modelos de cinco niveles; esta radica en que para valores donde la rigidez del disipador corresponde al 25% con respecto a la rigidez del contraviento ($\beta=25\%$) y la inclinación del contraviento de

soporte es de 40° (figura 6.8 y 6.10), el análisis se detuvo antes de que los disipadores alcanzaran la ductilidad objetivo (μ_{do}), debido a que las columnas de la periferia empezaron a presentar un comportamiento a flexotensión, lo cual generó articulaciones plásticas en estos elementos asociados a daño severo del elemento (figura 6.9).

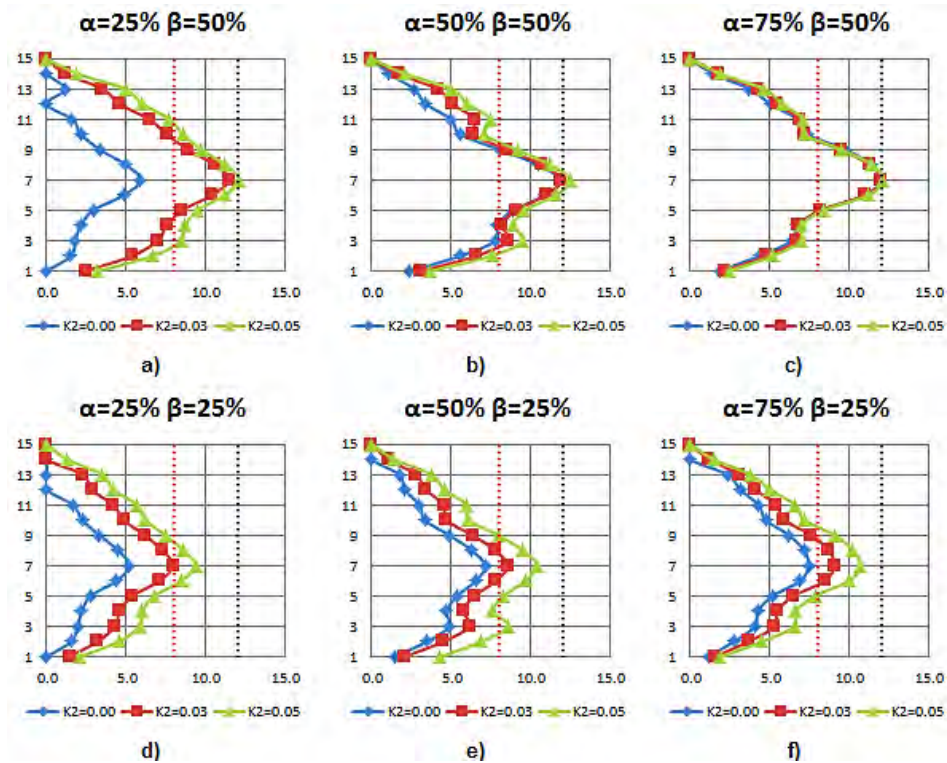


Figura 0.8. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 15 niveles y $\theta=40^\circ$

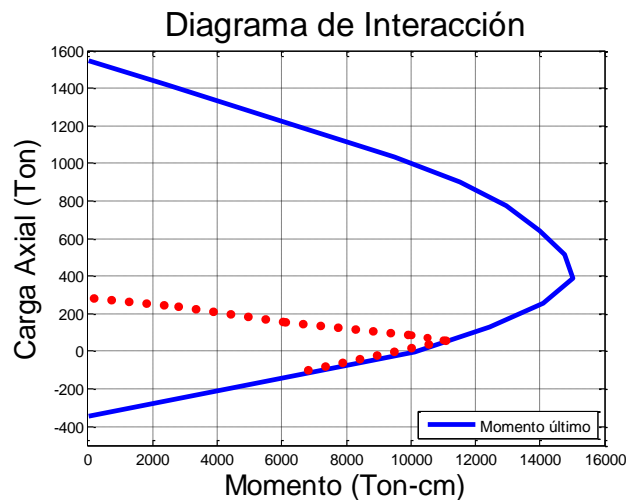


Figura 0.9. Comportamiento de una columna a flexotensión cuando $\alpha=\beta=25\%$ y la inclinación del contraviento de soporte es de $\theta=40^\circ$

Hay que recordar que se pretende que tecnología con disipadores de energía sea superior y constituya un sistema “limpio”, es decir, donde los disipadores son la principal línea de defensa de la estructura ante carga lateral, y por lo tanto, los únicos que deberían dañarse ante un sismo de magnitud considerable. Con este objetivo en mente, el permitir daño en los elementos estructurales de los marcos, sería una forma negligente de analizar los datos obtenidos de los análisis estáticos no lineales, y en consecuencia proponer lineamientos para el diseño y el uso de este tipo de tecnología.

Como se mencionó previamente, para los modelos de cinco niveles la variación de la inclinación de los contravientos no representa gran diferencia en el desempeño de los dispositivos disipadores de energía. En los modelos de 10 y 15 niveles la variable mencionada sí representó variación en la interpretación de los resultados (figuras 6.10 y 6.11). Por ejemplo, cuando la inclinación fue $\theta=40^\circ$ (figura 6.10), los modelos donde el disipador desarrollaba un desempeño favorable eran cuando el disipador tomaba la mitad de rigidez con respecto al de su contraviento de soporte ($\beta=50\%$). De forma distinta, cuando $\theta=45^\circ$, el balance de rigidez donde los disipadores trabajan de manera más eficiente fue cuando $\beta=25\%$ (figura 6.11).

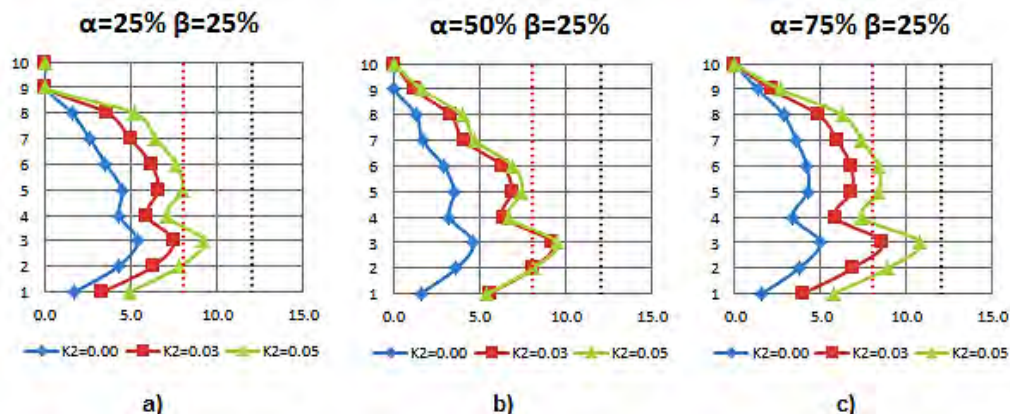


Figura 0.10. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 10 niveles y $\theta=40^\circ$

Cuando el sistema del marco le corresponde aportar el 50% de rigidez al sistema global ($\alpha=50\%$, figura 6.8b), se observa que el comportamiento de los disipadores alcanzan un desempeño óptimo cuando $\theta=40^\circ$, ya que aproximadamente el 45% de los dispositivos usados desarrollan ductilidades deseables ($8 \leq \mu_d \leq 12$).

Para el caso donde el sistema del marco aporta el 75% de la rigidez global de la estructura ($\alpha=75\%$, figura 6.11c), el comportamiento es mucho mejor al del anteriormente mencionado, pero cuando $\theta=45^\circ$. En este caso se aprecia un aumento en el porcentaje en el cual los disipadores desarrollan comportamiento

inelástico, es decir, del 50% de ellos está trabajando de manera eficiente. Para el caso en el cual el marco aporta el 25% de la rigidez global de la estructura ($\alpha=25\%$, figura 6.8a y 6.11a), se observa el mejor comportamiento entre los tres balances α , en el cuál el 60% de ellos sobrepasan el límite inferior de la ductilidad propuesta ($\mu_d > 8$).

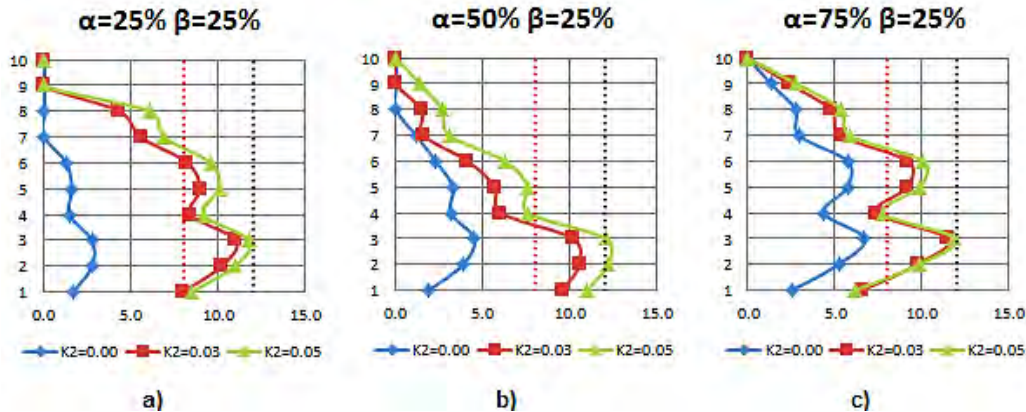


Figura 0.11. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 10 niveles y $\theta=45^\circ$

Con las comparaciones hechas de todas las variables estudiadas, y con base sólo la valoración de las ductilidades objetivo, podemos decir que los balances para los modelos de mediana altura en los cuales los disipadores muestran un desempeño aceptable son los siguientes:

- Modelos donde $\theta=40^\circ$, el sistema del marco toma el 50% de rigidez con respecto al del contraviento-disipador ($\alpha=50\%$), y el balance de rigideces entre el contraviento y el disipador es de 50% ($\beta=50\%$), figura 6.8b.
- Modelos donde $\theta=45^\circ$, el sistema del marco toma el 75% de rigidez con respecto al del contraviento-disipador ($\alpha=25\%$), y el balance de rigideces entre el contraviento y el disipador es de 25% ($\beta=25\%$), figura 6.11c.

6.1.3 Modelos de 20 niveles

Los modelos de 20 niveles varían en altura de 67.2 m ($\theta=40^\circ$) y 80 m ($\theta=45^\circ$). Al igual que para los modelos antes referenciados, el comportamiento de la pendiente posterior a la fluencia presentó el mismo patrón de comportamiento, es decir, que a medida que la variable tiene un valor mayor, la ductilidad desarrollada por el disipador también tiende a ser mayor (figuras 6.12 y 6.13), aunque para las

curvas correspondientes al 3% y 5%, se observa que su comportamiento es muy similar.

Para el caso donde el sistema del marco aporta el 75% de la rigidez global de la estructura ($\alpha=75\%$, figura 6.12c, 6.12f, 6.13c y 6.13f), el comportamiento de los disipadores es muy deficiente, ya que apenas un 35% del total usado sobrepasan el límite inferior establecido, siendo los niveles de entrepiso intermedios donde se presentan las mayores ductilidades μ_d .

Cuando el sistema del marco le corresponde aportar el 50% ($\alpha=50\%$, figura 6.12b, 6.12e, 6.13b y 6.13e) de rigidez al sistema global, se observa que el comportamiento de los disipadores es bastante favorable, en la mayoría de ellos, aproximadamente un 45%, se encuentra dentro del intervalo deseado ($8 \leq \mu_d \leq 12$); y al igual que el balance anterior, los disipadores que se desarrollan las mayores ductilidades se encuentran en los niveles intermedios de los marcos.

En ambos casos ($\alpha=75\%$ y $\alpha=50\%$), se presentó el comportamiento esperado con respecto a la variación entre rigideces del disipador y el contraviento (β), el cual, a medida que el disipador es más flexible que el sistema de soporte de contraviento, los disipadores desarrollan una mayor ductilidad; por lo que, el balance más eficiente para estos casos fue cuando $\beta=25\%$. (figura 6.12). Para el caso en el cual el sistema contraviento-disipador es más flexible que el sistema del marco ($\alpha=25\%$), se observa un mejor comportamiento cuando $\beta=50\%$ (figura 6.12) debido al daño asociado al sistema del marco cuando $\beta=25\%$.

Cuando $\alpha=25\%$ (figura 6.12a y 6.13a), el porcentaje de disipadores que desarrollan una ductilidad entre los límites inferior y superior deseada es del 50%. Si comparamos este porcentaje con el balance de $\alpha=50\%$, la diferencia entre el número de disipadores que alcanzan un desempeño óptimo entre los límites propuestos no es muy notorio, pero si la comparamos contra aquéllos que alcanzan la ductilidad objetivo ($\mu_{do} > 10$), se observa una mayor diferencia entre el desempeño de los disipadores (figuras 6.12a y 6.12e).

En consecuencia, se puede decir que el mejor balance para los modelos de 20 niveles son aquéllos donde el sistema del marco toma el 25% de rigidez con respecto al del contraviento-disipador ($\alpha=25\%$), y el balance de rigideces entre el contraviento y el disipador es del 50% ($\beta=50\%$). Para estos modelos, la variación de la inclinación del contraviento (θ) no presentó cambios notorios para el total de modelos evaluados.

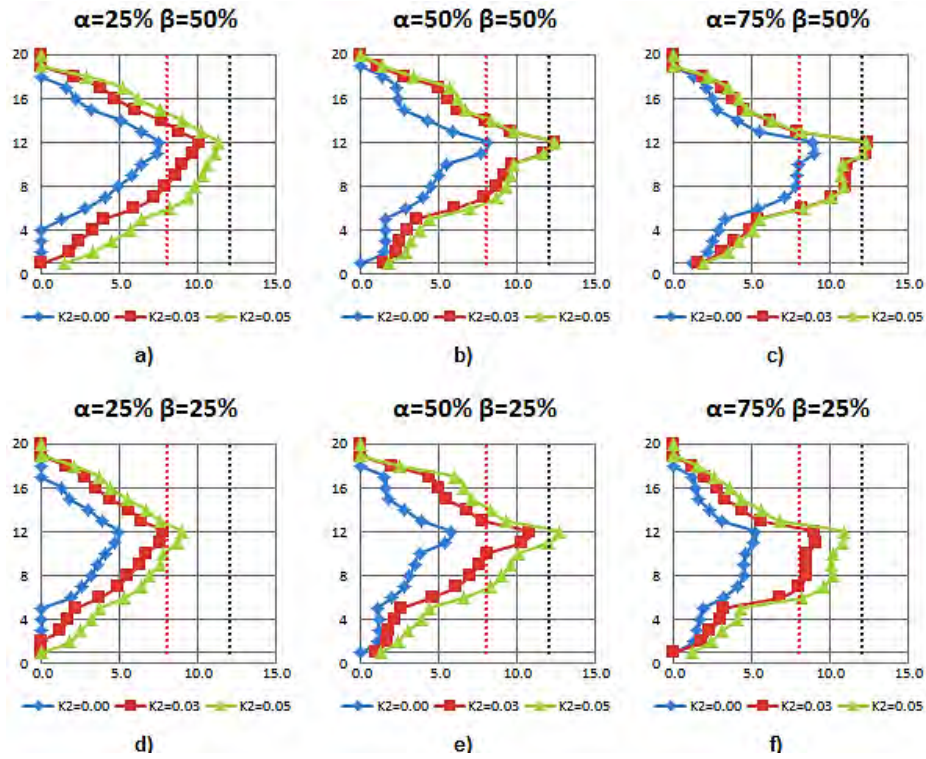


Figura 0.12. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 20 niveles y $\theta=40^\circ$

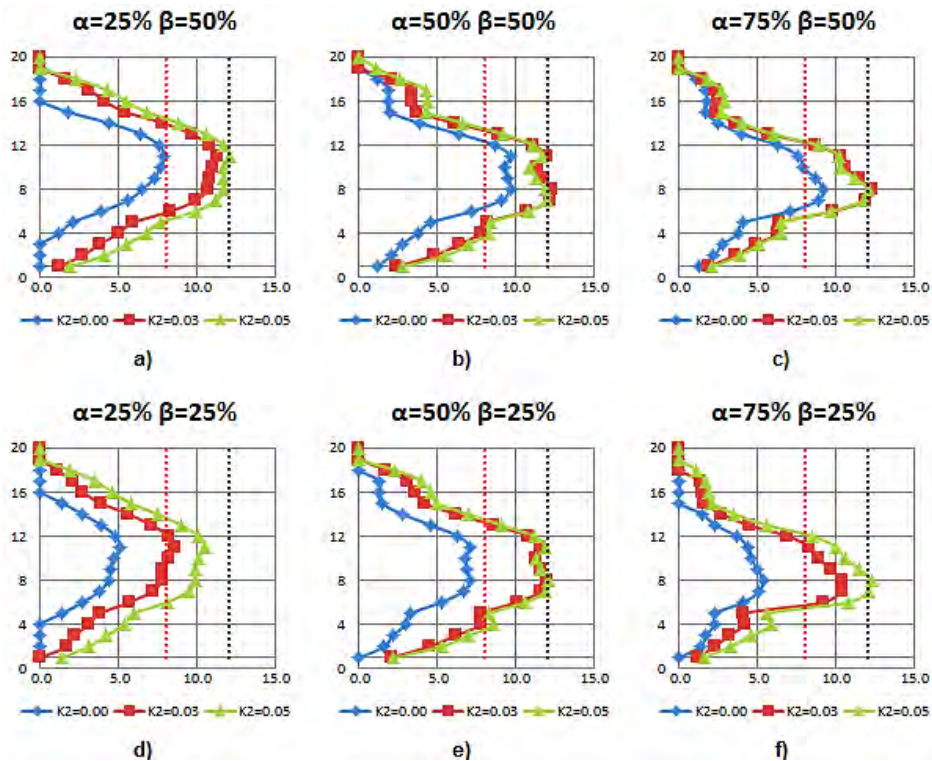


Figura 0.13. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 20 niveles y $\theta=45^\circ$

6.1.4 Modelos de 25 niveles

En estos modelos la variación en inclinación no presentó gran diferencia en los resultados analizados (figuras 6.15 y 6.16), así como también el comportamiento de las pendientes posteriores a la fluencia, observados de los resultados de los análisis estáticos no lineales, continuó con el mismo patrón de los modelos antes explicados. Pero también son en estos modelos donde el considerar un balance de rigidez entre disipador y contraviento muy flexible ($\beta=25\%$), asociaba un daño muy severo al sistema del marco, por lo que se decidió limitar los resultados del análisis no lineal a la ductilidad objetivo (μ_{do}), sino en función de las rotaciones plásticas para aquellos elementos en los cuales el daño no fuera de magnitud considerable. Es por esta razón que cuando el balance de rigidez del disipador con respecto al contraviento es de la mitad ($\beta=50\%$) los disipadores presentaban un mejor desempeño sin que el sistema del marco presentara grandes rotaciones plásticas, tanto en magnitud como en cantidad. Los modelos de 25 niveles varían en altura de 84 m ($\theta=40^\circ$) y 100 m ($\theta=45^\circ$).

En estos marcos analizados ningún disipador alcanza la ductilidad deseada para su buen desempeño (figuras 6.15a, 6.15d, 6.16a y 6.16d), cuidando que el sistema del marco no presente gran cantidad de rotación plástica en sus elementos. Si nos enfocáramos exclusivamente que los disipadores desarrollaran la ductilidad objetivo, el sistema del marco presentaría mucho daño asociado a las rotaciones plásticas de sus elementos (figura 6.14).

Cuando el sistema del marco toma tan solo el 25% de la rigidez total de la estructura en conjunto, para modelos muy esbeltos, no fueron suficientes con las consideraciones de diseño para vigas y columnas que se hicieron en este estudio paramétrico. El daño al sistema del marco está asociado con los desplazamientos de los dispositivos disipadores de energía transmitidos a las vigas y columnas principalmente. Por este motivo, se recomienda consideraciones especiales de diseño para los elementos que integran al sistema de marco exclusivamente si se desea escoger este balance α .

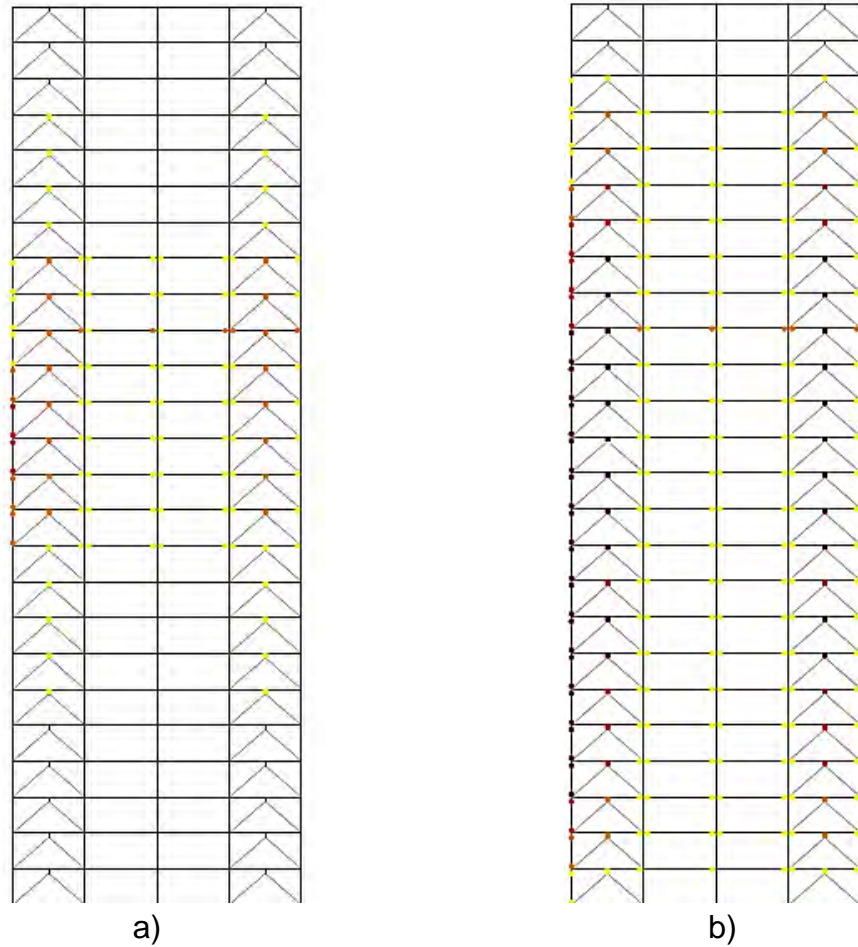


Figura 0.14 Rotaciones plásticas acumuladas para $\alpha=\beta=25\%$: a) restringiendo en función de las rotaciones plásticas y b) restringiendo en función de las ductilidades objetivo

Para el caso donde el sistema del marco aporta el 75% de la rigidez global de la estructura ($\alpha=75\%$, figura 6.15c, 6.15f, 6.16c y 6.16f), el comportamiento de los disipadores de energía sigue siendo deficiente para estructuras esbeltas, ya que tan sólo el 35% de los disipadores utilizados alcanzan ductilidades mayores a ocho, siendo la primera mitad de los niveles de entrepiso donde se presentan las mayores ductilidades μ_d .

Cuando el sistema del marco le corresponde aportar el 50% ($\alpha=50\%$, figura 6.15b y 6.15b) de rigidez al sistema global, el comportamiento de los disipadores es bastante favorable, en comparación de los casos antes mencionados, ya que la mitad de ellos presenta desempeño inelástico considerable, especialmente en los niveles intermedios de los modelos evaluados con este balance.

Para los modelos más esbeltos evaluados en esta investigación, los balances óptimos, indistintamente del grado de inclinación del contraviento de soporte, son aquéllos donde el sistema del marco toma el 50% de rigidez con respecto al del contraviento-disipador ($\alpha=50\%$), y el balance de rigideces entre el contraviento y el disipador es del 50% ($\beta=50\%$), como se puede apreciar de las figuras 6.15b y 6.16b.

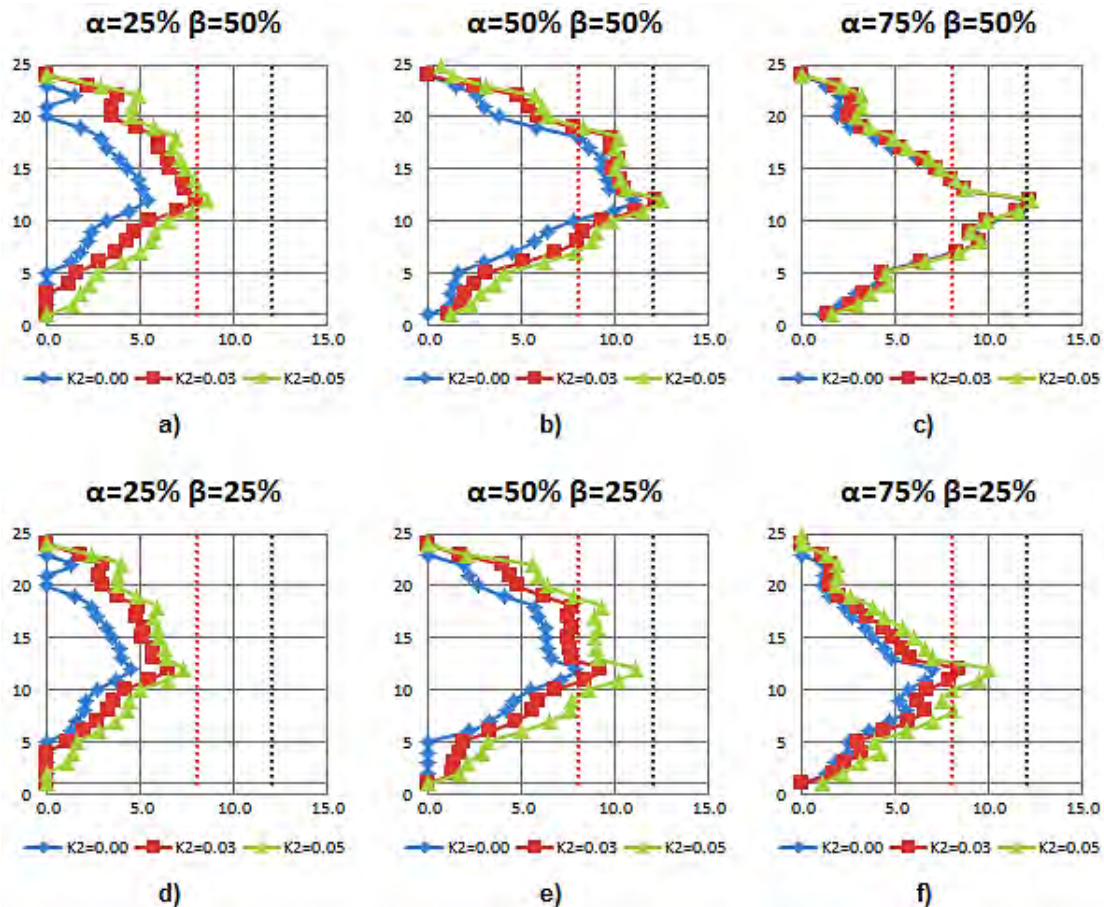


Figura 0.15. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 25 niveles y $\theta=40^\circ$

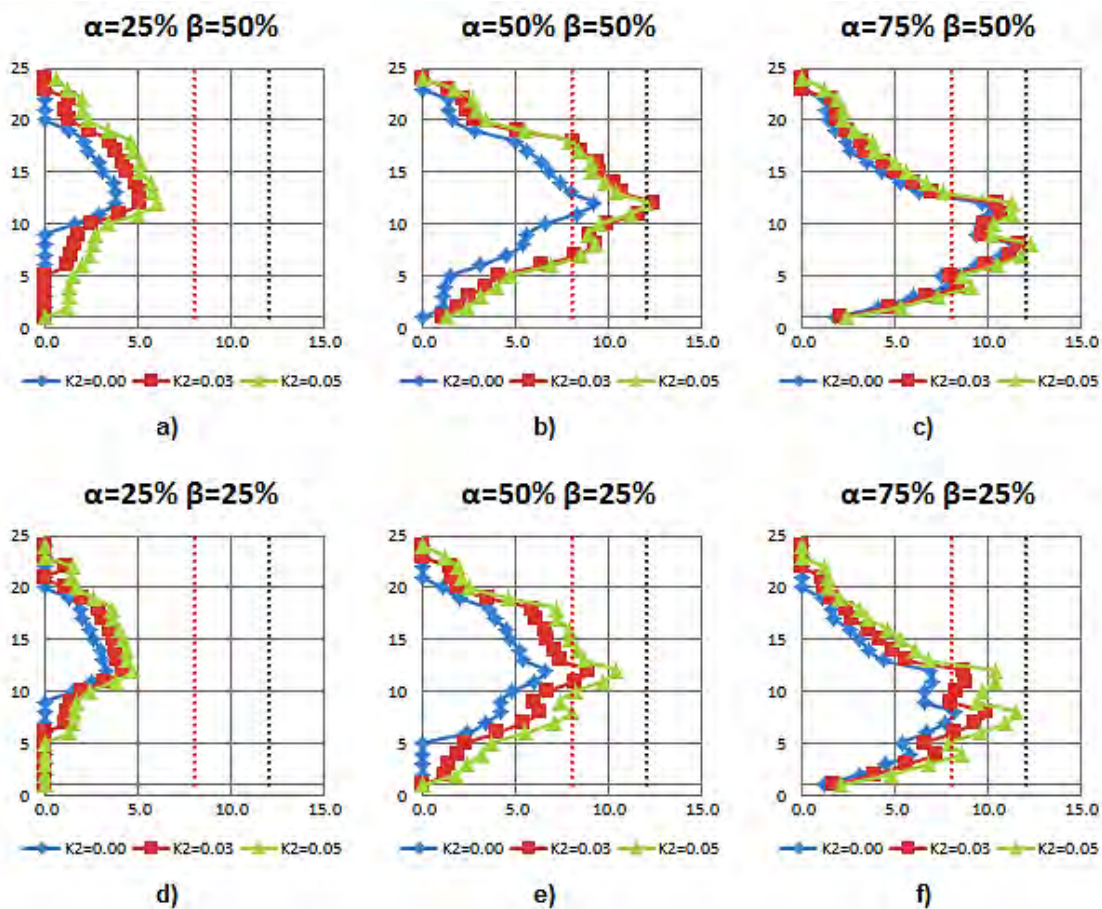


Figura 0.16. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en los modelos de 25 niveles y $\theta=45^\circ$

6.1.5 Comentarios

De las gráficas representativas mostradas a lo largo de esta sección, en las cuales se evaluaron los distintos balances de rigideces entre los sistemas y de las pendientes posteriores a la fluencia, se observaron ciertos patrones que se repetían para ciertos modelos los cuales se resumen a continuación.

Se observó un patrón similar, para la gran mayoría de los modelos evaluados, en el comportamiento de las pendientes posteriores a la fluencia K_2 . Se distingue que en general, a medida que la variable K_2 aumenta, la ductilidad desarrollada por el disipador también tiende a aumentar, aunque para las curvas correspondientes al 3% y 5%, se observa un comportamiento bastante similar.

La variación en el ángulo de inclinación del contraviento de soporte no representó mayor diferencia para escoger un balance óptimo en la mayoría de los modelos; salvo para aquellos que presentan una elevación de mediana altura (10 y 15

niveles), donde escoger los balances en el cual los disipadores de energía por histéresis mostraban mejor desempeño. Se delimitó por medio del parámetro β , que es el indicador entre la rigidez del disipador y la del contraviento (figura 6.17).

Evaluando el balance de rigidez entre el sistema del contraviento y el del disipador de los marcos analizados, se observa que para los modelos de pequeña y mediana altura, el balance β óptimo es aquél cuando le corresponde un valor del 25%, es decir, que el disipador es más flexible que el contraviento y, por ello, es el fusible del sistema. Para los modelos esbeltos, el balance óptimo β es cuando la rigidez del disipador corresponde a la mitad de la rigidez del contraviento ($\beta=50\%$), lo anterior es consecuencia al daño presentado en vigas y columnas asociado a la magnitud de las rotaciones plásticas presentadas, como se explicó anteriormente.

Se observa además que el balance óptimo entre el sistema del marco y el sistema contraviento-disipador (α) para los modelos de baja altura (cinco niveles), es cuando el marco aporta el 75% de la rigidez total del sistema ($\alpha=75\%$). Para los modelos de mediana altura (10 y 15 niveles), la inclinación de los contravientos de soporte marco diferencia en la decisión de los valores óptimos en rigideces. Para los modelos de 20 niveles, el balance óptimo es aquél cuando el marco es más flexible que el contraviento-disipador ($\alpha=25\%$). Por último, para los marcos más esbeltos (25 niveles), el balance óptimo teórico se presenta cuando el sistema del marco y el sistema contraviento-disipador aportan la misma rigidez ($\alpha=50\%$).

Los balances óptimos α se resumen en la tabla 6.1, y se corroboran en la siguiente sección comparándolos con sus respectivos mapeos de fluencia.

NIVELES	H/L	θ	α	β
5	0.53	40°	75%	25%
	0.63	45°	75%	25%
10	1.05	40°	50%	50%
	1.25	45°	25%	25%
15	1.58	40°	50%	50%
	1.88	45°	25%	25%
20	2.10	40°	25%	50%
	2.50	45°	25%	50%
25	2.63	40°	50%	50%
	3.13	45°	50%	50%

Tabla 0.1. Resumen de los balances óptimos para los modelos evaluados

6.2 Mapeos de fluencia

En esta sección se presentan una serie de figuras correspondientes a los mapeos de fluencia de los modelos evaluados en esta investigación. Los mapeos que se presentan en esta sección son representativos de los balances óptimos otorgados a los distintos niveles de entrepiso con base en la comparación de las gráficas μ_d , presentadas en la sección anterior, para tener un panorama amplio de lo que le sucede a la estructura en conjunto con los diversos balances de rigideces y las otras variables en estudio.

La capacidad de rotación de vigas y columnas se determinó mediante el cálculo de los diagramas momento-curvatura usando el programa BIAx (Wallace y Moehle 1989). Una vez obtenidas estas curvas y los resultados del análisis no lineal del DRAIN-2DX (Prakash 1992), se decidió asignar con un círculo y una escala matizada de colores cálidos a los valores obtenidos de las rotaciones plásticas normalizadas (figura 6.17).

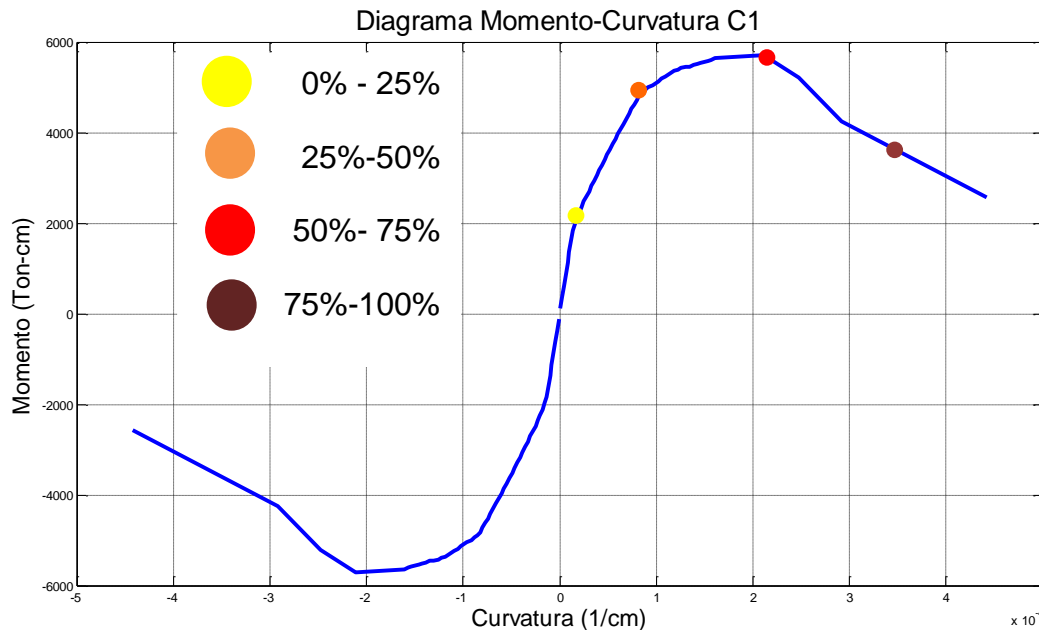


Figura 0.17. Representación de matizados en colores cálidos para las rotaciones plásticas

El matizado de colores para los disipadores de energía se realizó en función de las ductilidades teóricas que desarrollaban, según los resultados de los análisis no lineales obtenidos del DRAIN-2DX. Se caracterizó por medio de un cuadrado, y al igual que los círculos, se asignó una escala de colores cálidos matizado como lo indica la figura 6.18.

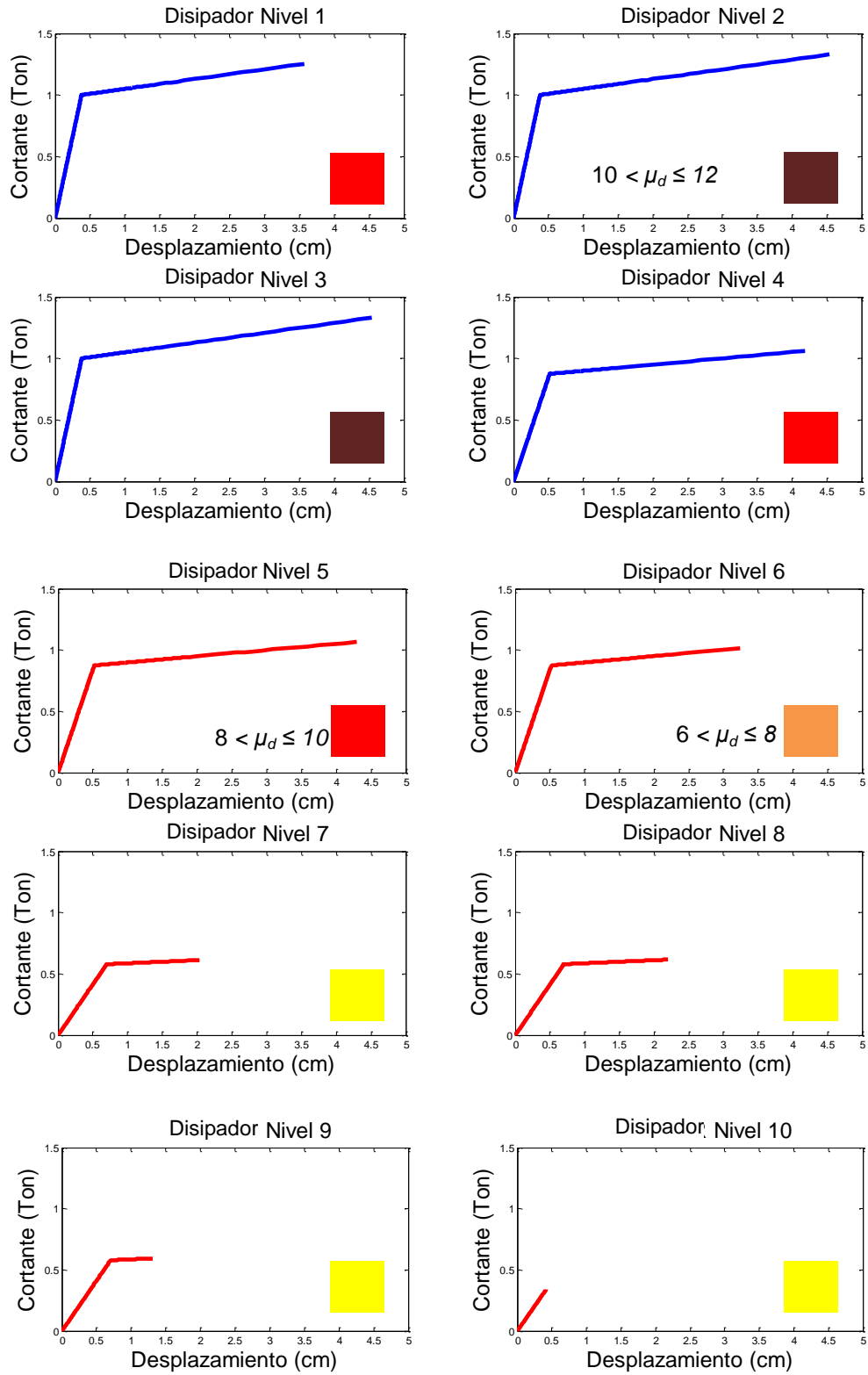


Figura 0.18. Representación de matizados en colores cálidos para las ductilidades μ_d desarrollado por los disipadores

En la figura 6.19 se muestran los mapeos de rotaciones plásticas acumuladas para los modelos de diez niveles con los balances de rigideces óptimos elegidos en la sección anterior. Se observa claramente el comportamiento antes descrito de las pendientes posteriores a la fluencia K_2 . Se distingue que a medida que la variable K_2 aumenta, la ductilidad desarrollada por el dissipador también tiende a aumentar basado en la observación de la escala cálida de colores.

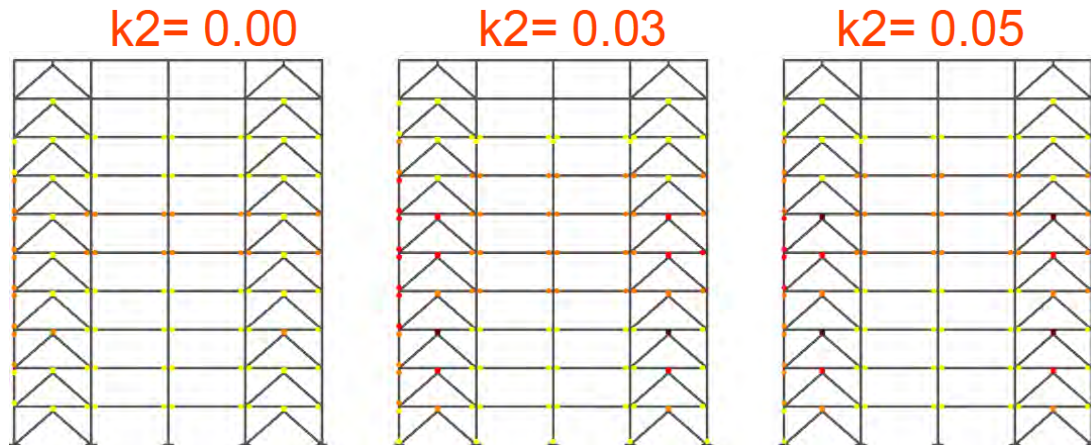


Figura 0.19. Mapeos de fluencia para modelos de 10 niveles
 $\theta=45^\circ$, $\alpha=25\%$, $\beta=25\%$

Se distingue también de estas figuras que el aumento de la pendiente posterior a la fluencia está asociado a cierto daño a las columnas de la periferia del lado izquierdo, como consecuencia de que los contravientos le transmiten cargas axiales mayores. Las mayores magnitudes de las rotaciones se presentan en los niveles de entrepiso intermedio, posiblemente debido al cambio de secciones entre los elementos del marco y el de contraventeo, presentados en esos niveles. Cabe resaltar que aunque la secuencia inicial de fluencias sería consistente con la filosofía de diseño aplicado de columna fuerte viga débil, ya que, la mayoría de los dissipadores y las vigas presentan rotaciones plásticas, el problema consiste en que, a las demandas de ductilidad objetivo de los dissipadores, varias columnas de la periferia comienzan a experimentar rotaciones plásticas en ambos extremos, por lo que al final se pudieran favorecer mecanismos de falla mixtos o de un piso suave.

En la figura 6.20 se presentan los modelos de cinco niveles correspondientes a los balances que se mencionan respectivamente. En esta figura se puede ver claramente la tendencia marcada para la mayoría de los modelos evaluados, en la cual, a medida que decrece el valor de β , los dissipadores desarrollan más ductilidad. Así también, este incremento en la ductilidad en los elementos antes mencionados trae como consecuencia un mayor daño al sistema del marco,

asociado a los desplazamientos presentados en el dispositivo disipador y transmitido a vigas y columnas.

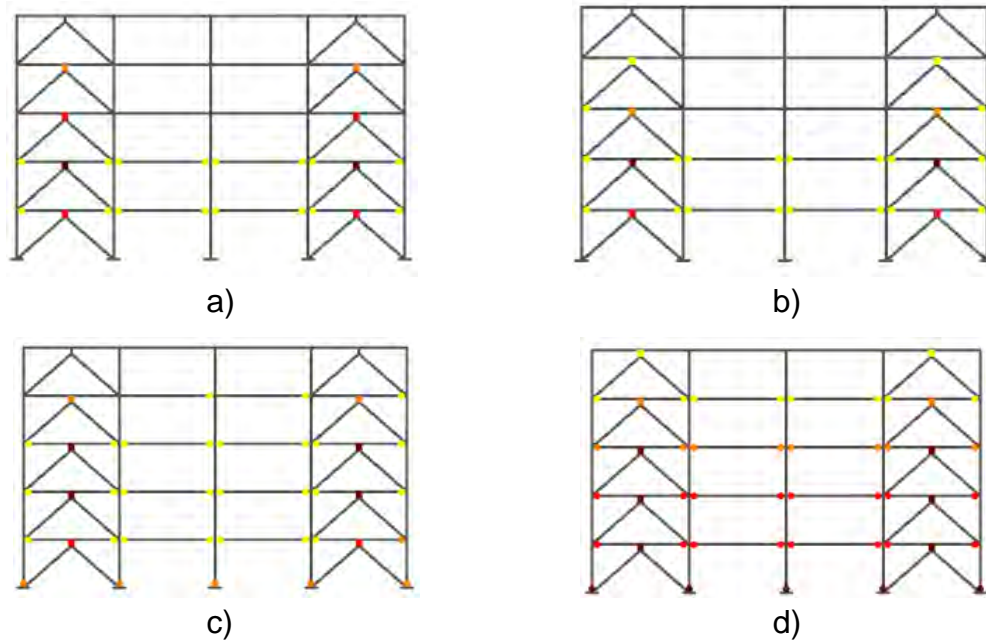


Figura 0.20. Mapeos de fluencia para modelos de 5 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$, $\alpha=25\%$, a) $\beta=100\%$, b) $\beta=75\%$, c) $\beta=50\%$, d) $\beta=25\%$

En la siguiente sección se presentan una serie de figuras correspondientes a los balances óptimos obtenidos en la sección anterior, en las cuales, solamente se tomó como criterio la ductilidad desarrollada por los disipadores, sin tomar en cuenta lo que pasaba con la estructura en conjunto. Esto con la finalidad de tener una visión más amplia de cómo se comporta la estructura a nivel global y no sólo tomando en cuenta un solo parámetro en particular.

6.2.1 Modelos de 5 niveles

En las figuras 6.21 y 6.22 se muestran los mapeos de rotaciones plásticas acumuladas para los modelos de cinco niveles con el balance de rigidez entre disipador y contraviento más flexible considerado en este estudio paramétrico ($\beta=25\%$). De las figuras antes mencionadas, y de la escala de colores explicada anteriormente para los elementos que conforman este sistema estructural, se aprecia claramente que los disipadores de energía son los que absorben la mayor cantidad de daño asociado al desplazamiento μ_d .

De los elementos estructurales que conforman el sistema del marco se puede puntualizar que las columnas presentan rotaciones plásticas acumuladas exclusivamente en el extremo inferior del primer nivel de entrepiso debido a la

condición de empotramiento perfecto al cuál se encuentran sometidos esos elementos. En cambio, las vigas presentan trabajo inelástico, encontrándose aquéllas de mayor magnitud en los niveles inferiores, aunque se puede considerar un daño de leve a moderado, según al color asociado de algún elemento en particular.

En la sección anterior se decidió que para los modelos de cinco niveles el balance óptimo en rigidez era para aquellos cuando $\alpha=75\%$ y $\beta=25\%$ (figuras 6.21c y 6.22c), sin importar el ángulo de inclinación del contraviento de soporte. De las figuras se evalúa la cantidad y magnitud de las rotaciones plásticas para vigas y columnas en conjunto con el desempeño de los disipadores de energía.

Poniendo especial atención a la figuras antes mencionadas, se aprecia que desde el punto de vista ideal que en una estructura con disipadores de energía solamente deberían trabajar inelásticamente los disipadores y, cuando mucho, sólo permitir fluencias de pequeña magnitud en vigas, entonces la mejor opción en este caso es para $\alpha=25\%$ y $\beta=50\%$ (figuras 6.21a).

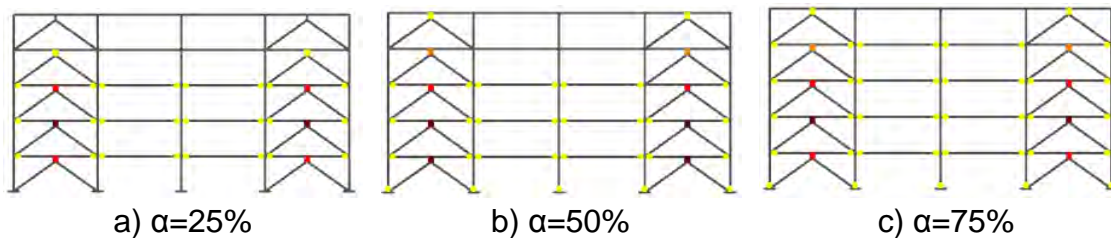


Figura 0.21. Mapeo de fluencia para modelos de 5 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=25\%$

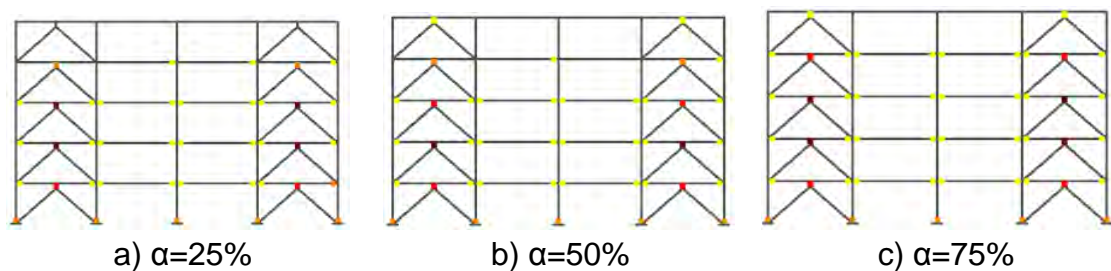


Figura 0.22. Mapeo de fluencia para modelos de 5 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=25\%$

6.2.2 Modelos de 10 niveles

Para los modelos de diez niveles se aprecian diferencias representativas para los modelos cuando el ángulo del contraviento es $\theta=40^\circ$ y $\theta=45^\circ$, a pesar que los análisis no lineales hechos en este estudio son estáticos y no dinámicos; donde en

este último, es donde mejor se pueden apreciar las diferencias que provoca la variación de este parámetro.

Se había seleccionado como el balance óptimo para los modelos de diez niveles y $\theta=40^\circ$, cuando éstos eran $\alpha=50\%$ y $\beta=50\%$ (figura 6.23a), se aprecia que la mitad del total de los disipadores usados están trabajando en óptimas condiciones. Las vigas de este modelo presentan un buen comportamiento; sin embargo, las columnas del borde exterior izquierdo presentan rotaciones plásticas en ambos extremos de estos elementos, lo cual obviamente no es deseable.

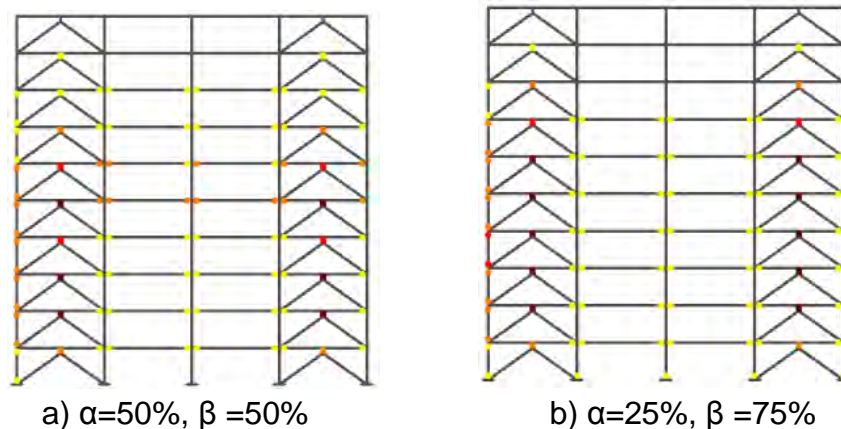


Figura 0.23. Mapeo de fluencia para modelos de 10 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$

Si comparamos los modelos de las figuras 6.23a y 6.23b correspondientes a los balances $\alpha=25\%$ y $\beta=75\%$, el comportamiento presenta leves. Por ejemplo, las rotaciones inelásticas correspondientes a las vigas presentan un daño leve exclusivamente. Las columnas presentan trabajo inelástico de mayor magnitud en el borde exterior izquierdo debido a que, en este balance los contravientos son más robustos, por ende, la carga axial que transmite a la columna es mucho mayor y, en consecuencia, será mayor la magnitud de la rotación plástica de esos elementos. La mayor diferencia entre estos dos modelos reside en el número de disipadores que trabajan inelásticamente, siendo más eficiente el modelo de la figura 6.23b correspondiente a los balances $\alpha=25\%$ y $\beta=75\%$.

De la misma manera que los modelos anteriores, a continuación se presenta una comparativa representativa entre el modelo correspondiente al balance óptimo elegido exclusivamente al desempeño de los disipadores, y otra evaluando el trabajo en conjunto de todo el sistema estructural.

En la figura 6.24 se aprecia claramente que elegir un balance muy flexible entre disipador y contraviento ($\beta=25\%$), no necesariamente asocia un mejor desempeño

de los dispositivos disipadores de energía; pero sí asocia un mayor desplazamiento de los marcos evaluados. De la figura 6.24b se observa que restringiendo la rigidez del disipador a la mitad del contraviento ($\beta=50\%$), el sistema estructural en conjunto presenta un comportamiento mejor al de la figura 6.24a. La magnitud de las rotaciones plásticas de las columnas de la periferia izquierda son menores cuando se asigna un balance de $\beta=50\%$. Además, el desempeño de los disipadores es mejor, como se aprecia de la escala de colores asociados a la ductilidad que desarrollan éstos.

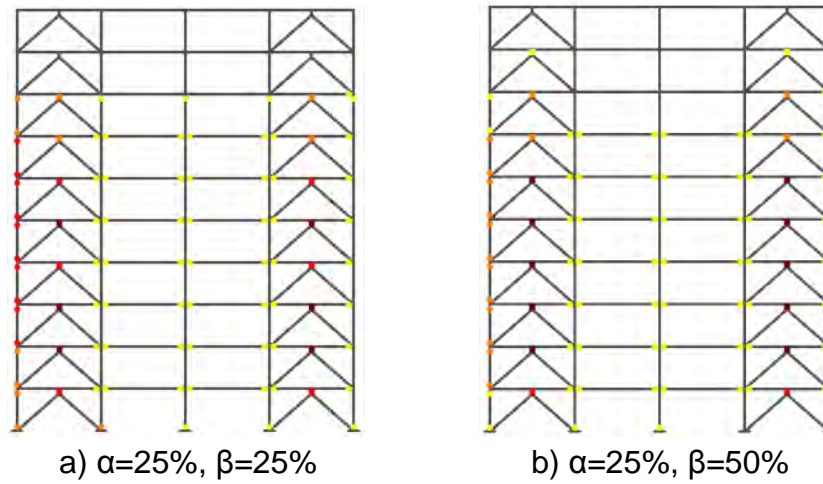


Figura 6.24. Mapeo de fluencia para modelos de 10 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$

6.2.3 Modelos de 15 niveles

Se observa que en los modelos de 15 niveles, mientras más flexible sea el sistema del marco al del sistema contraviento-disipador ($\alpha=25\%$), más disipadores desarrollan ductilidades óptimas (figura 6.25a). Por otro lado, al ser más rígidos los contravientos, inducen mayor carga axial a las columnas, es por eso que en este balance se aprecia daño de moderado a severo en las columnas del borde exterior izquierdo, en los niveles de entrepiso intermedios, justo en el lugar donde los disipadores desarrollan las mayores ductilidades.

Conforme el balance α incrementa, menos son los disipadores que desarrollan una ductilidad apropiada. Si comparamos las figuras 6.25a, 6.25b y 6.25c, se aprecia que cuando el marco es igual de rígido que el sistema contraviento-disipador ($\alpha=50\%$), la cantidad de disipadores que desarrollan una ductilidad deseada ($8 \leq \mu_d \leq 12$) es buena. Además, la cantidad y magnitud de rotaciones plásticas presentadas en vigas columnas asocia una participación pequeña en el intervalo inelástico por parte de los elementos que conforman exclusivamente el sistema del marco.

Cuando el marco es más rígido que el sistema contraviento-disipador ($\alpha=75\%$), la cantidad de disipadores que desarrollan una ductilidad deseada es muy pequeña comparada con los otros balances. Se puede decir que este balance es demasiado rígido para que los disipadores desarrollen ductilidades óptimas y, en consecuencia, vigas y columnas presentan rotaciones plásticas acumuladas pequeñas, lo que en otro sentido, es favorable. En virtud de lo anterior, para modelos de 15 niveles y $\theta=40^\circ$, el balance óptimo desde el punto de vista del mecanismo de colapso, es cuando $\alpha=25\%$ y $\beta=75\%$.

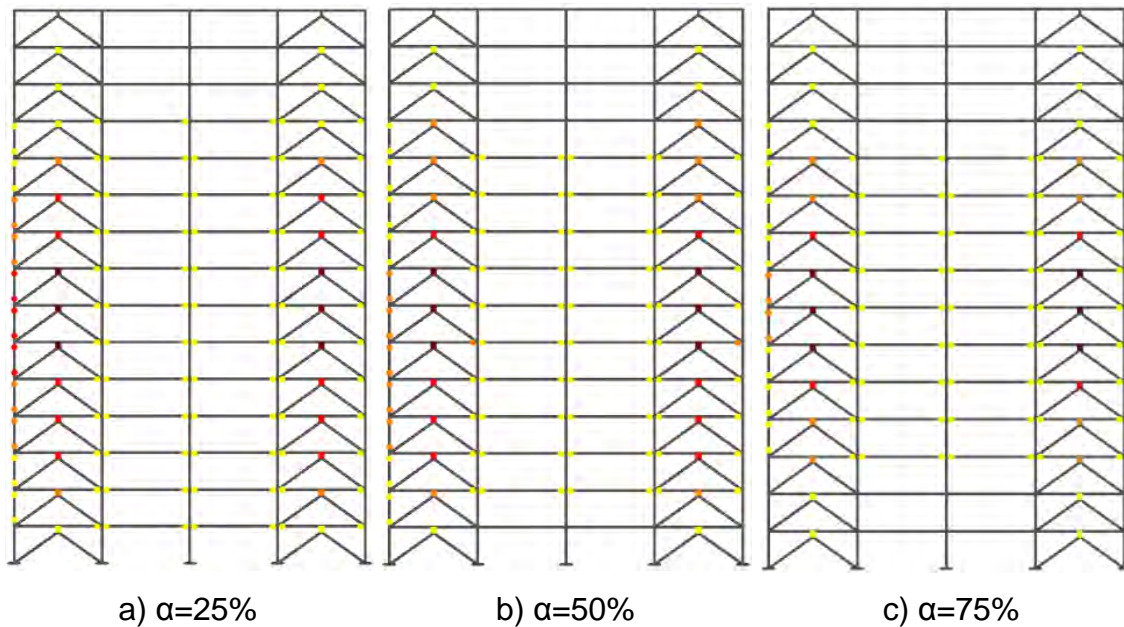


Figura 0.25. Mapeo de fluencia para modelos de 15 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=50\%$

Para los modelos de 15 niveles y $\theta=45^\circ$ (figura 6.26) se había determinado, con base en las ductilidades desarrolladas por los disipadores de energía, como balance óptimo cuando $\alpha=50\%$ y $\beta=25\%$ (figura 6.26a). Pero al igual que los modelos de 10 niveles y este ángulo de inclinación, se observa que el limitar el balance rigidez entre el contraviento y el disipador a $\beta=50\%$ (figura 6.26b), no representa una gran diferencia en el desempeño de los disipadores, pero sí en la magnitud de las rotaciones plásticas presentadas en las columnas de la periferia izquierda. Por lo que para modelos de 15 niveles y $\theta=45^\circ$, el balance óptimo es cuando $\alpha=25\%$ y $\beta=50\%$.

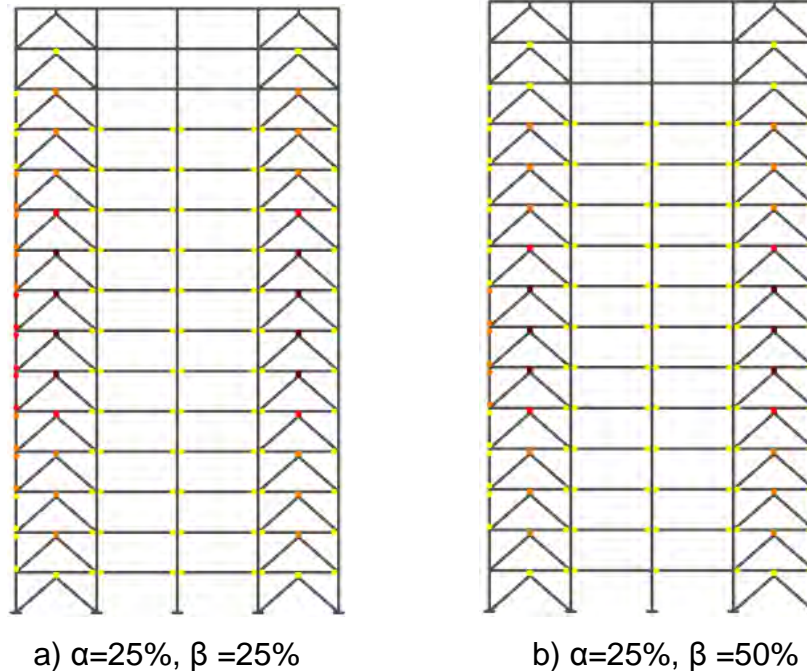


Figura 0.26. Mapeo de fluencia para modelos de 15 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$

6.2.4 Modelos de 20 niveles

Para los modelos de 20 niveles y $\theta=40^\circ$ se eligió en la sección anterior como balance óptimo de rigideces cuando $\alpha=25\%$ y $\beta=50\%$ (figura 6.27a). Observando dicha figura, se aprecia que varios disipadores desarrollan ductilidades deseables, pero contraproducentemente asocia daño de magnitud considerable para las columnas del borde izquierdo.

Comparando las figuras 6.27a y 6.27b se observa que la cantidad de disipadores que desarrollan una ductilidad deseable es similar, pero el balance cuando el sistema del marco es igual al sistema contraviento-disipador (figura 6.27b), presenta menor magnitud de daño a las columnas y menor cantidad de rotaciones plásticas acumuladas a las vigas. Se aprecia también que el menor comportamiento inelástico en columnas y vigas se obtiene para $\alpha=75\%$ (figura 6.27c).

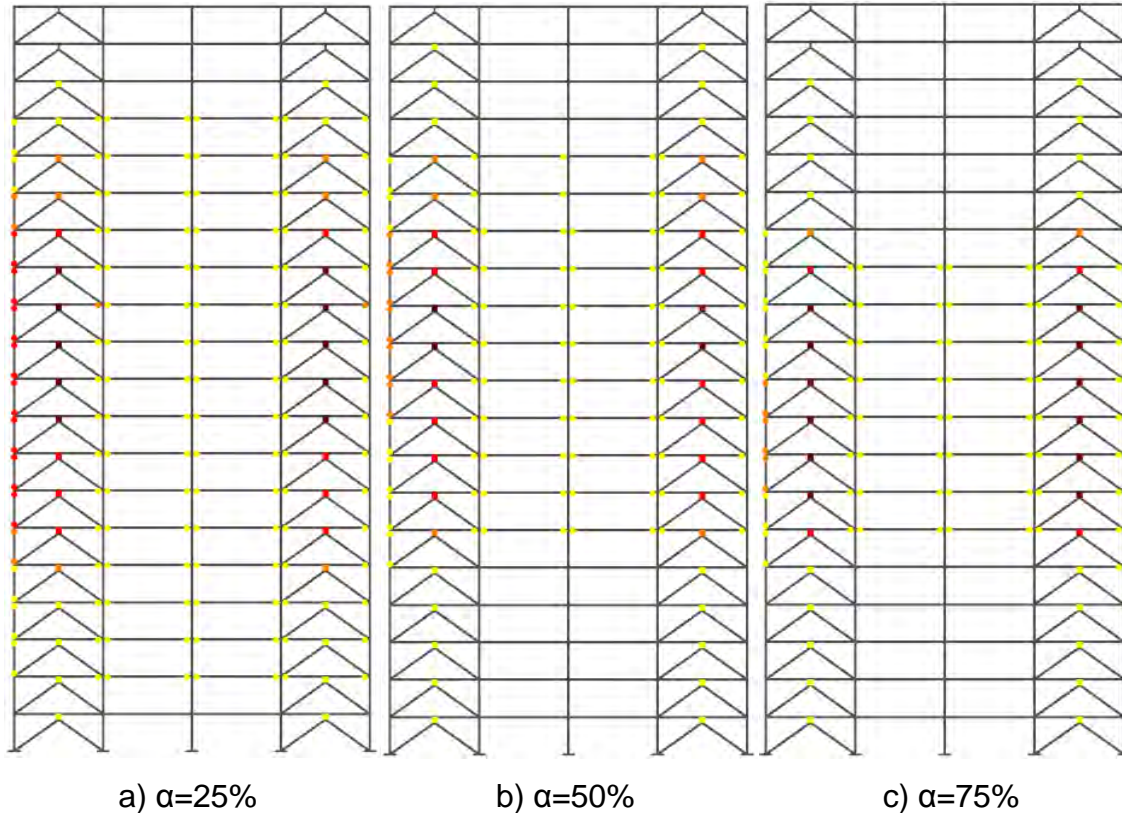


Figura 0.27. Mapeo de fluencia para modelos de 20 niveles, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=50\%$

Para los modelos de 20 niveles y $\theta=45^\circ$, se eligió en la sección anterior como balance óptimo de rigideces cuando $\alpha=25\%$ y $\beta=50\%$ (figura 6.28a). Similar a los modelos con la misma cantidad de niveles pero $\theta=40^\circ$, se observa que una buena cantidad de disipadores desarrollan ductilidades deseables, pero asocian daño severo para las columnas del borde izquierdo.

Si se le compara con la figura 6.28b, que corresponde al balance de $\alpha=75\%$ y $\beta=50\%$, se aprecia una menor cantidad de daño asociado a las rotaciones plásticas de las columnas que para el modelo cuando $\alpha=25\%$, presentándose las mayores magnitudes de rotaciones plásticas en los niveles intermedios, que como se explicó anteriormente, es donde los disipadores desarrollan las mayores ductilidades.

Como se aprecia en la mayoría de los modelos antes mencionados, en el último nivel de entrepiso los disipadores no desarrollan ductilidad alguna, es decir, permanecen elásticos, por lo que colocarlos en el último nivel es una pérdida en la inversión económica, ya que estos disipadores no trabajan.

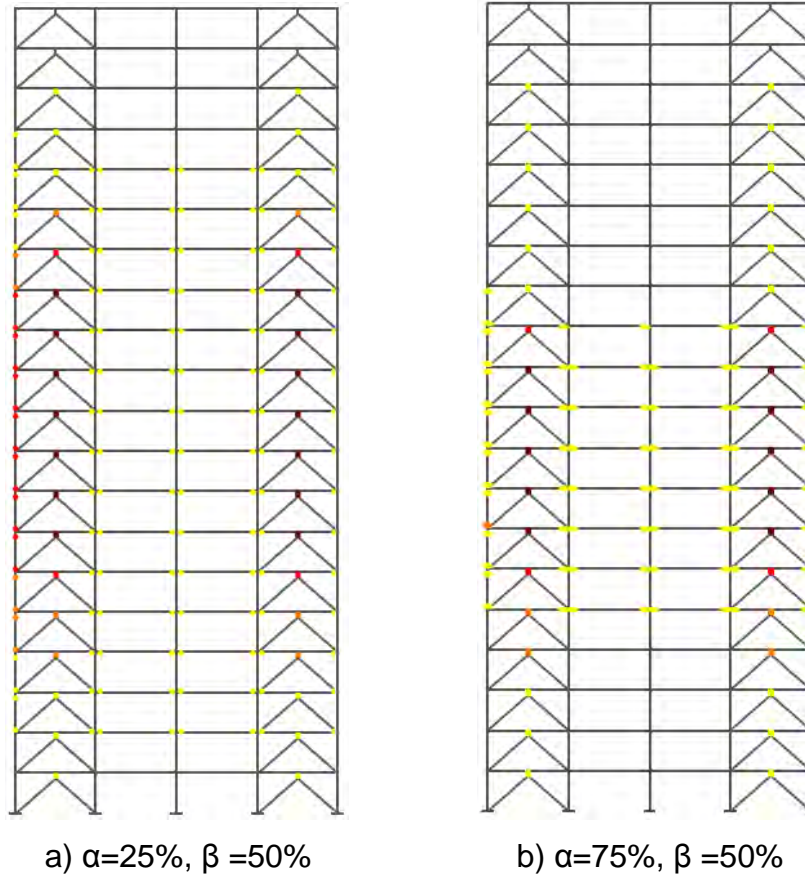


Figura 0.28. Mapeo de fluencia para modelos de 20 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$

6.2.5 Modelos de 25 niveles

Estos modelos representan los más esbeltos de este estudio paramétrico. Si observamos la figura 6.29a cuando $\alpha=25\%$, se aprecia que los disipadores de energía no desarrollan ductilidades deseadas y el daño a las columnas de la periferia son severas, por lo que este balance es el menos adecuado para marcos esbeltos. De manera contraria en la figura 6.29c, se observa que el daño a las columnas, para el balance cuando $\alpha=75\%$, es mucho menor pero no hay suficientes disipadores trabajando eficientemente.

Por último, cuando la rigidez entre el marco y el sistema contraviento-disipador es la misma ($\alpha=50\%$), se distingue que las rotaciones plásticas en columnas y vigas representan daño leve a moderado (figura 6.29b). Por consiguiente, como se estableció del criterio de las ductilidades desarrolladas por los disipadores exclusivamente y apoyados del mapeo de rotaciones plásticas acumuladas presentadas en la figura 6.29, se reafirma que el balance óptimo para los modelos de 25 niveles y $\theta=40^\circ$ es cuando $\alpha=50\%$ y $\beta =50\%$ (figura 6.29b).

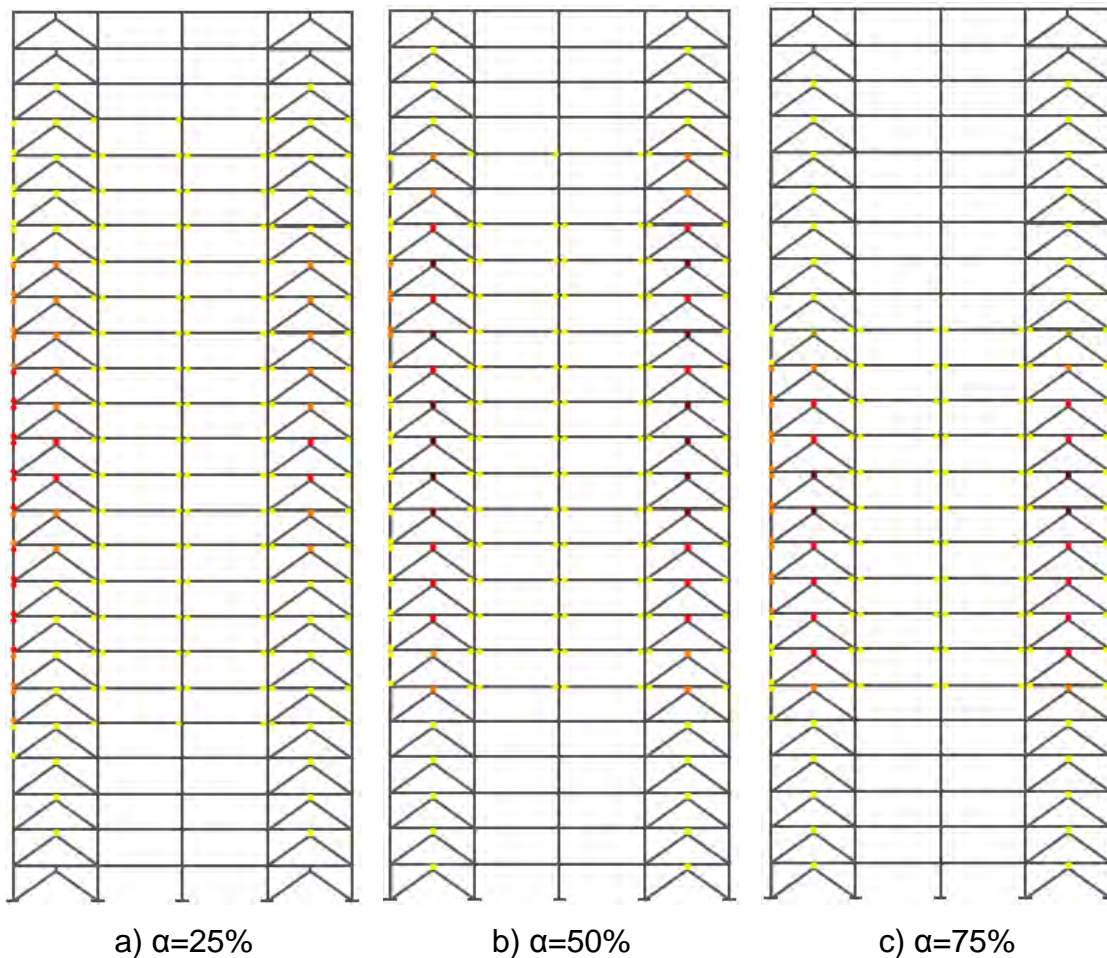


Figura 0.29. Mapeo de fluencia para modelos de 25 niveles,
 $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$, $\beta=50\%$

Para finalizar con la gran variedad de modelos presentados y el mapeo de rotaciones plásticas, tenemos a los marcos de 25 niveles y $\theta=45^\circ$. Anteriormente se había establecido que el balance óptimo de rigideces para estos modelos era cuando $\alpha=50\%$ y $\beta=50\%$ (figura 6.30a). Para los modelos más esbeltos de esta investigación (20 y 25 niveles), considerar un balance de rigidez entre el contraviento y el dissipador muy flexible ($\beta=50\%$ ó $\beta=25\%$), asocia gran cantidad de daño a las columnas de la periferia, como se ha visto desde los modelos de 10 niveles.

Por este motivo, para los modelos de 25 niveles y $\theta=45^\circ$ se considera que el balance óptimo es cuando $\alpha=50\%$ y $\beta=75\%$ (figura 6.30b), ya que los dissipadores trabajan de manera similar a los de la figura 6.30a, pero las rotaciones plásticas son mucho menores a los del balance cuando $\beta=50\%$.

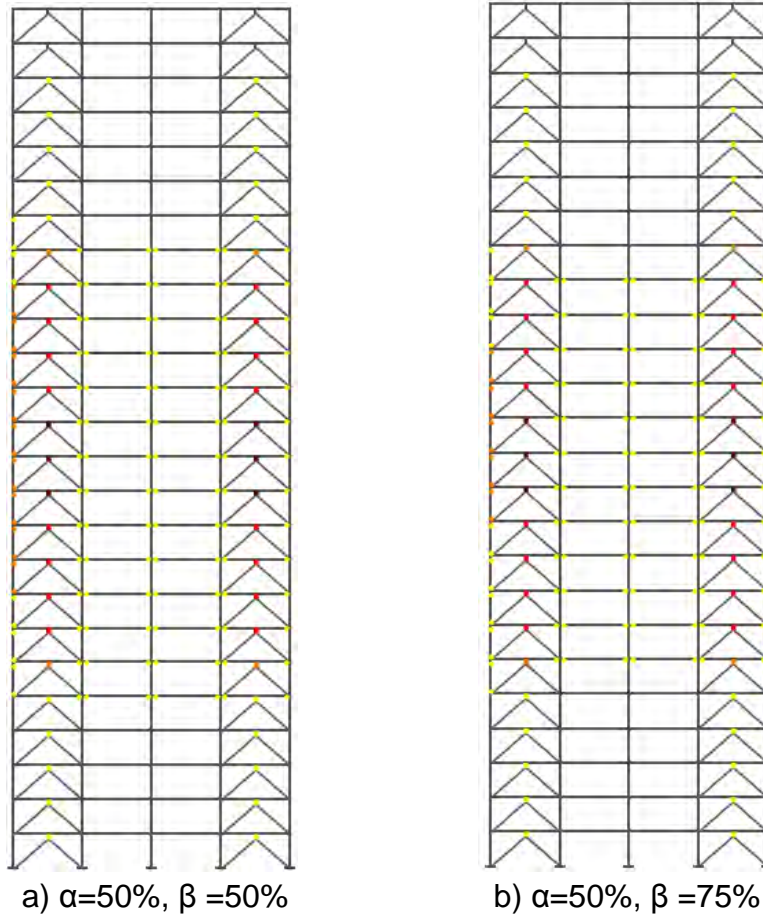


Figura 0.30. Mapeo de fluencia para modelos de 25 niveles, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$

Los balances óptimos α evaluando las ductilidades desarrolladas por los disipadores en conjunto con los mapeos de rotaciones plásticas, se resumen en la tabla 6.2.

NIVELES	H/L	θ	α	β
5	0.53	40°	25%	50%
	0.63	45°	25%	50%
10	1.05	40°	25%	75%
	1.25	45°	25%	50%
15	1.58	40°	25%	75%
	1.88	45°	25%	50%
20	2.10	40°	75%	50%
	2.50	45°	75%	50%
25	2.63	40°	50%	50%
	3.13	45°	50%	75%

Tabla 0.2. Resumen de los balances óptimos para los modelos evaluados

6.3 Curvas cortante-distorsión de entrepiso y globales

En la figura 6.31 se muestra de manera ilustrativa, para el mismo balance de rigidez entre marco y sistema contraviento-disipador, cómo al disminuir el valor de β , la ductilidad Q desarrollada por el sistema estructural en conjunto se incrementa. Esto es evidente, debido a que mientras más flexible sea el disipador con respecto al contraviento, tiende a fluir primero y eso lo hace más eficiente.

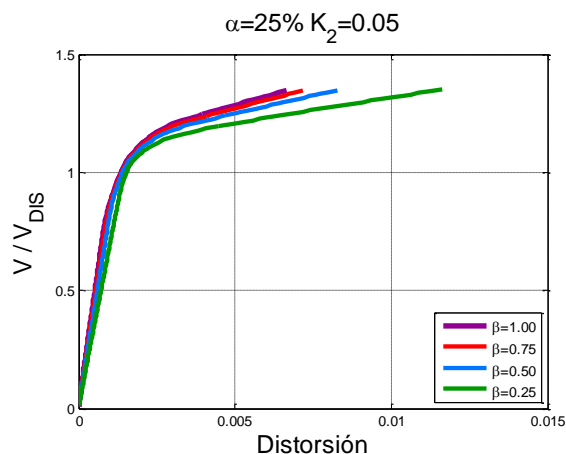


Figura 0.31. Curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para modelos de 10 niveles

Para las gráficas cortante-distorsión que se presentan más adelante en esta sección, se detallan por separado la contribución de cada sistema tanto de la curva global, como para cada uno de los niveles de entrepiso de los modelos seleccionados y reportados en la Tabla 6.2. El sistema del marco está representado por una línea punteada, mientras que la del contraviento-disipador por una línea sólida de color claro (figura 6.32). Además, el cortante fue normalizado con respecto a aquél con el que se diseñó, con la finalidad de evaluar los valores de sobrerresistencia que se presentaban con cada uno de los modelos evaluados en esta investigación.

6.3.1 Modelos de 5 niveles

Para los modelos de cinco niveles el balance óptimo elegido fue cuando $\alpha = 25\%$ y $\beta = 50\%$, sin importar el ángulo de inclinación de los contravientos de soporte, lo cual podemos corroborar a partir de las curvas cortante-distorsión global presentadas en la figura 6.32, que a simple vista son idénticas en el mecanismo de desempeño que presenta el sistema del marco y el del contraviento-disipador para ambas figuras. De estas curvas, la única diferencia entre ambas radica en el valor de la distorsión última permitida para cada modelo por separado. En otras palabras, el modelo en el que los contravientos tienen un ángulo de $\theta = 45^\circ$, es más

flexible y permite mayores desplazamientos, que aquél en que los contravientos presentan $\theta=40^\circ$.

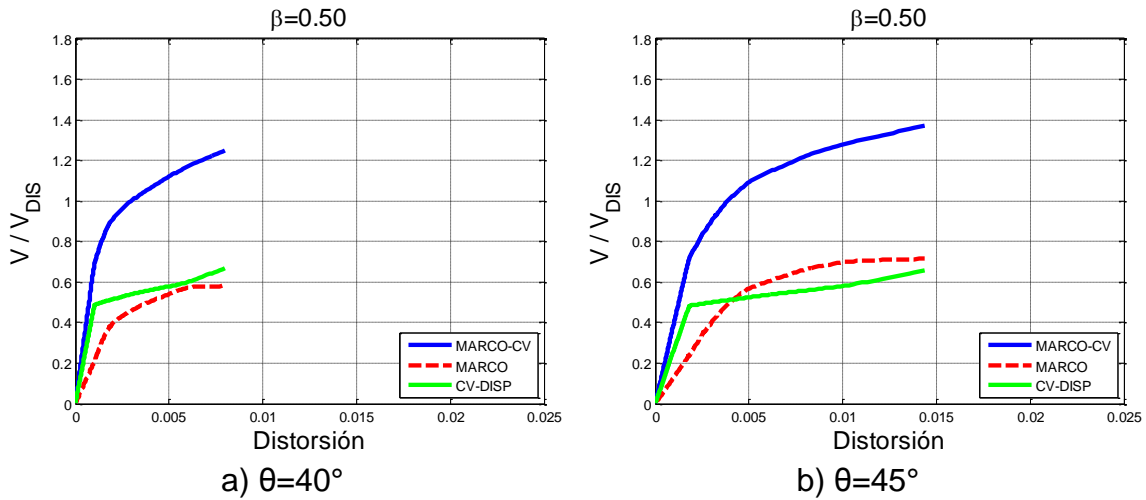


Figura 0.32. Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para modelos de 5 niveles, $\alpha=25\%$, $K_2=0.05$

En las figuras 6.33 y 6.34 se presentan las curvas cortante-distorsión para cada nivel de entrepiso para los balances óptimo encontrados en los modelos de cinco niveles. Como se aprecia de estas gráficas, la curva global del sistema es representativa de cada nivel de entrepiso para estos balances. Es evidente que en todos los niveles el dissipador de energía es el primero que empieza a fluir inelásticamente, antes que el sistema del marco, lo cual asocia que los dissipadores alcancen las ductilidades objetivo antes que los elementos viga y columna presenten rotaciones plásticas acumuladas de gran magnitud.

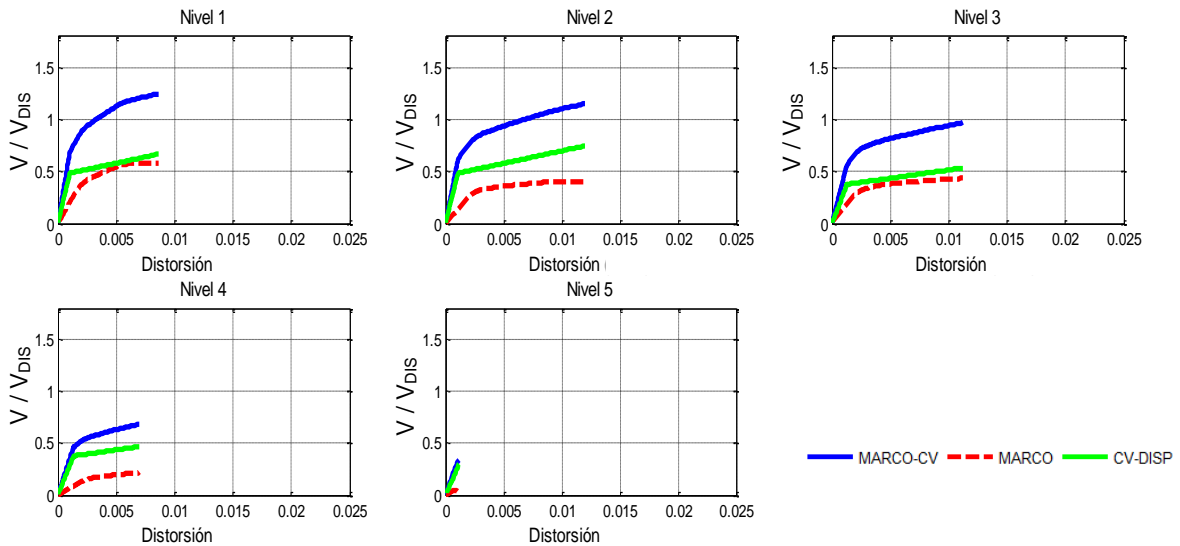


Figura 0.33. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 5 niveles $\theta=40^\circ$, $\alpha=25\%$, $\beta=50\%$, $K_2=0.05$

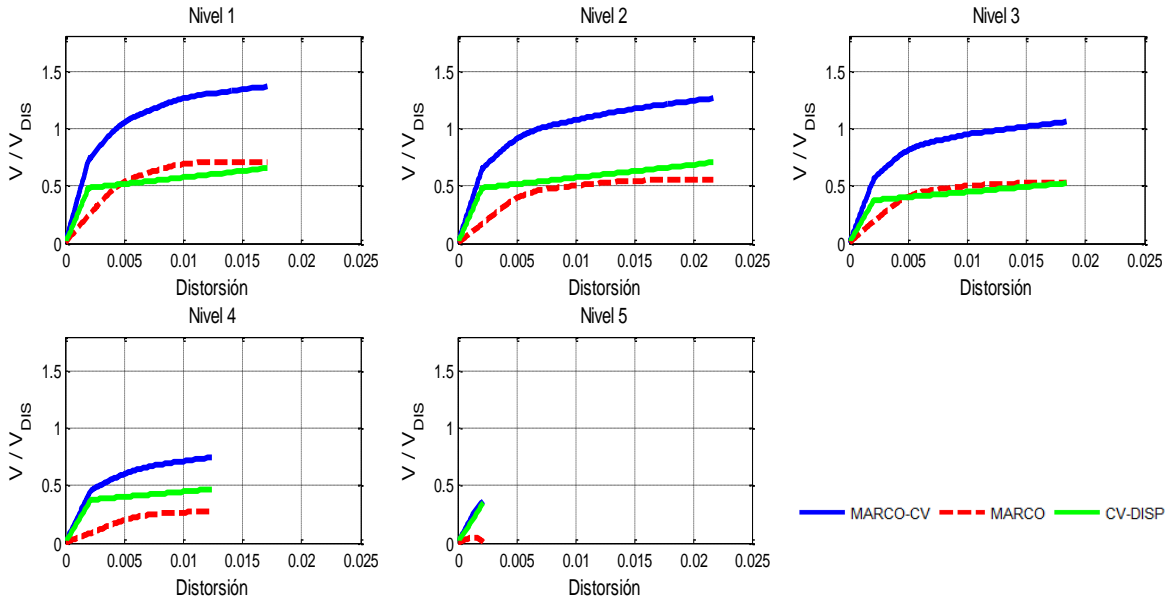


Figura 0.34. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 5 niveles $\theta=45^\circ$, $\alpha= 25\%$, $\beta=50\%$, $K_2=0.05$

6.3.2 Modelos de 10 niveles

Para los modelos de diez niveles el balance óptimo elegido fue cuando $\alpha= 25\%$, pero para elegir el balance de rigidez óptimo entre el disipador y el contraviento, si influyó el ángulo de inclinación de este último y cuando $\theta=40^\circ \beta=75\%$, de forma contraria cuando $\theta=45^\circ \beta=50\%$, lo cual podemos corroborar a partir de las curvas cortante-distorsión global presentadas en la figura 6.35, que a simple vista son casi idénticas en las distorsiones últimas desarrolladas, así como también en el mecanismo de desempeño que presenta el sistema del marco y el del contraviento-disipador para ambas figuras.

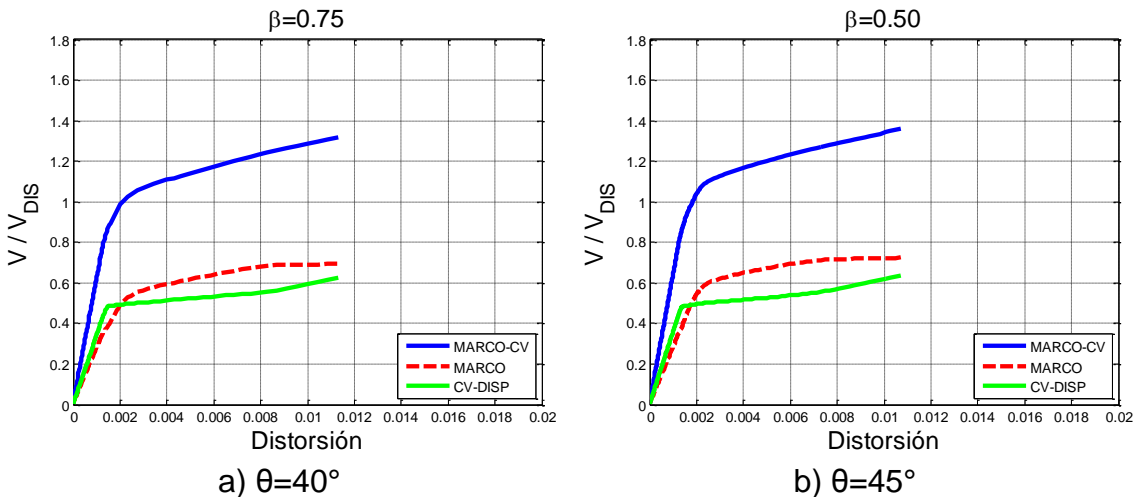


Figura 0.35. Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para modelos de 10 niveles, $\alpha= 25\%$, $K_2=0.05$

Aunque las curvas de cortante-distorsión globales presentadas en la figura 6.35 son muy parecidas, evaluando el desempeño de cada una de éstas, para cada nivel de entrepiso de los modelos de diez niveles, podemos encontrar diferencias en los valores de distorsión desarrolladas.

Comparando los niveles, de las figuras 6.36 y 6.37, desde el primero hasta el nivel 7 observamos claramente que el modelo donde $\theta=40^\circ$ (figura 6.36) desarrolló levemente mayores valores de distorsión que para los modelos donde $\theta=45^\circ$ (figura 6.37). Para los tres últimos niveles podemos ver que el comportamiento es exactamente el mismo, destacando que el comportamiento del último nivel de entrepiso es elástico, tanto para el sistema del marco como para el del contraviento-disipador.

Para ambas figuras, las mayores distorsiones se alcanzaron de los niveles tres al siete, que fueron donde los disipadores desarrollaron mayores ductilidades y, como se aprecia de las figuras, estos desplazamientos desarrollados por los disipadores, también influyeron en la participación inelástica del marco.

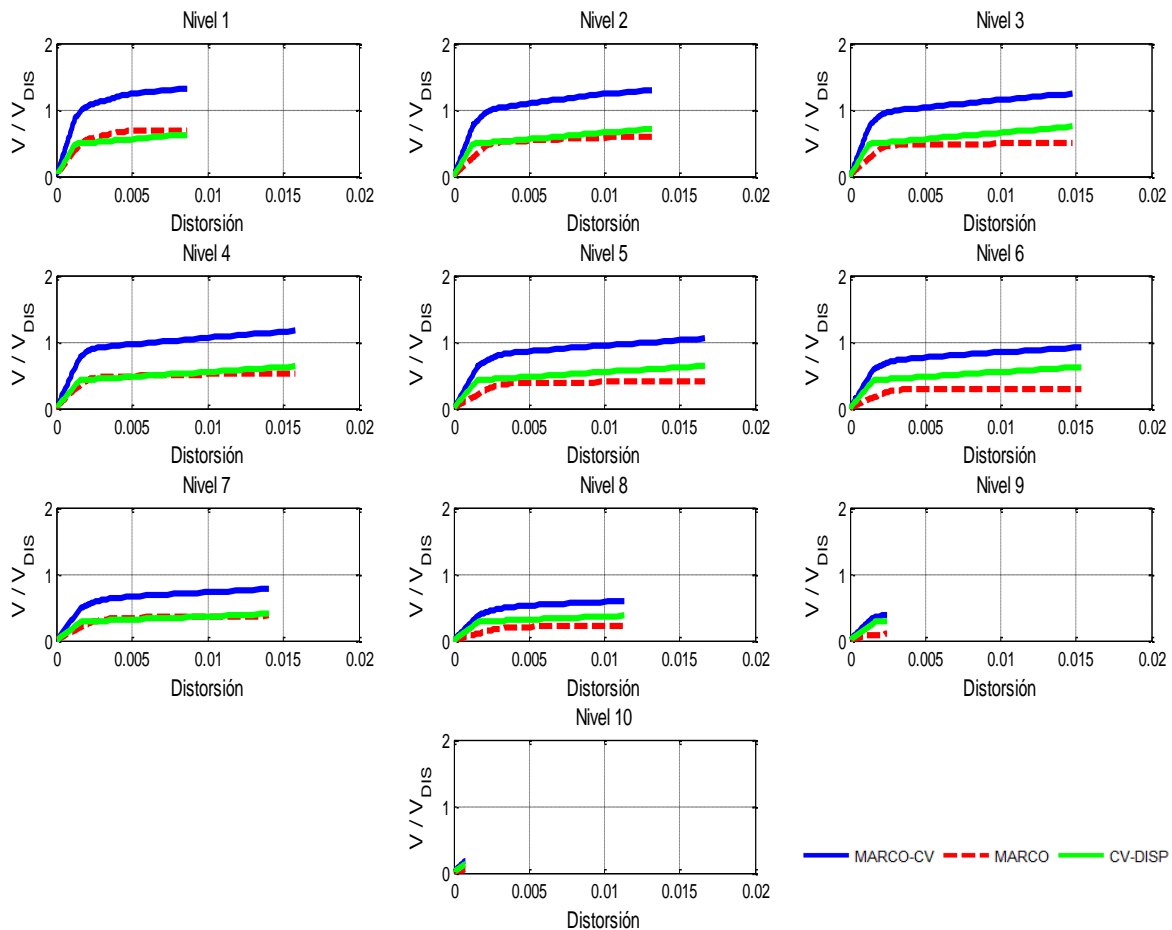


Figura 0.36. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 10 niveles $\theta=40^\circ$, $\alpha=25\%$, $\beta=75\%$, $K_2=0.05$

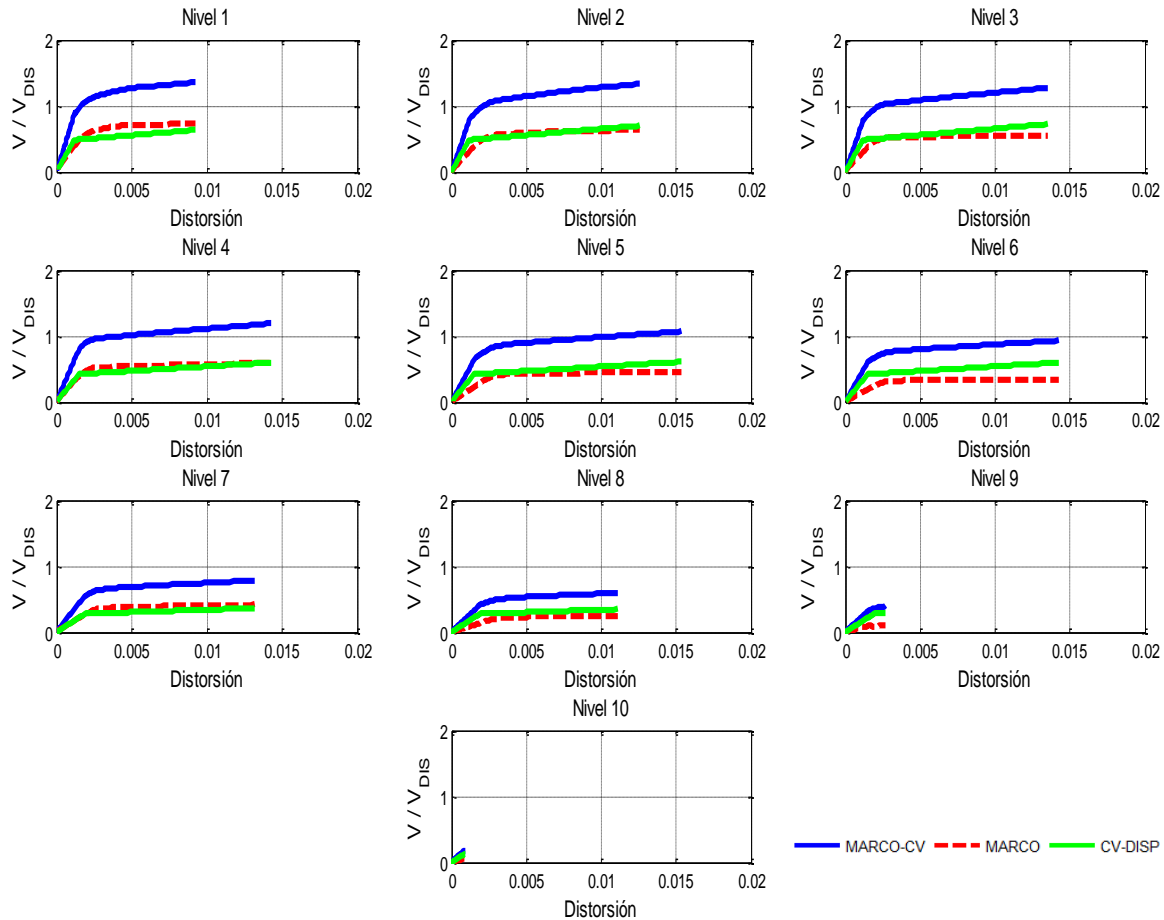


Figura 0.37. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 10 niveles $\theta=45^\circ$, $\alpha=25\%$, $\beta=50\%$, $K_2=0.05$

6.3.3 Modelos de 15 niveles

Para los modelos de 15 niveles el balance óptimo elegido de α tampoco varió conforme el ángulo del contraviento usado. Para los modelos de 15 niveles, el balance óptimo continuó siendo $\alpha=25\%$, pero cuando $\theta=40^\circ$, el balance de rigidez entre el contraviento y el dissipador fue de $\beta=75\%$. A primera instancia lo que puede dar a entender es que cuando se utiliza un ángulo de inclinación en contravientos de $\theta=40^\circ$, el dissipador debe aportar mayor rigidez para limitar los desplazamientos y las distorsiones asociadas a ellos. A su vez, los dissipadores alcanzan las ductilidades objetivos y las vigas y las columnas no presenten gran actividad inelástica.

En la figura 6.38 se aprecian las curvas cortante-distorsión para los balance óptimos antes mencionados. Se observa que ambas figuras son muy similares tanto en los valores de sobreesistencia desarrollados como en los de distorsiones.

La figuras 6.38 no son representativas del balance de rigidez α con el cuál se diseñó a la estructura; como se aprecia, tal pareciera que el sistema del marco aporta la misma rigidez que el sistema contraviento-disipador, aunque en ambos casos el sistema del contraviento-disipador interactúa en primera instancia en el intervalo inelástico antes que el sistema del marco.

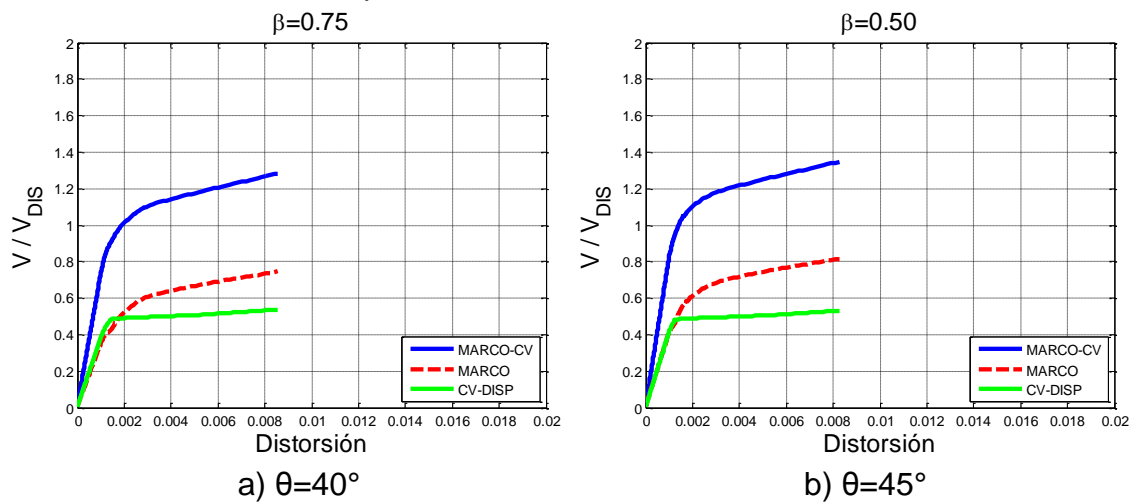


Figura 0.38. Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para modelos de 15 niveles, $\alpha = 25\%$

Para tener un panorama más amplio del comportamiento del sistema del marco y del sistema de contraviento-disipador, se presentan por separado las curvas obtenidas en ambos modelos en las figuras 6.39 y 6.40, que corresponden a las curvas cortante-distorsión para cada nivel de entrepiso para los modelos óptimos de 15 niveles.

En la figura 6.39 donde se presentan los balances cuando $\alpha = 25\%$ y $\beta = 75\%$, se observa que para la mayoría de los niveles de entrepiso, cada curva cortante normalizado-distorsión es representativa del balance antes mencionado, en el que el sistema del contraviento-disipador aporta la mayor rigidez al sistema global. Se aprecia claramente que en todos los niveles de entrepiso, excluyendo los últimos dos, los disipadores son los primeros que trabajan inelásticamente. Para el primer nivel de entrepiso el sistema del marco desarrolla poca actividad inelástica, mientras que en los niveles intermedios son donde se presentan las mayores magnitudes de distorsiones.

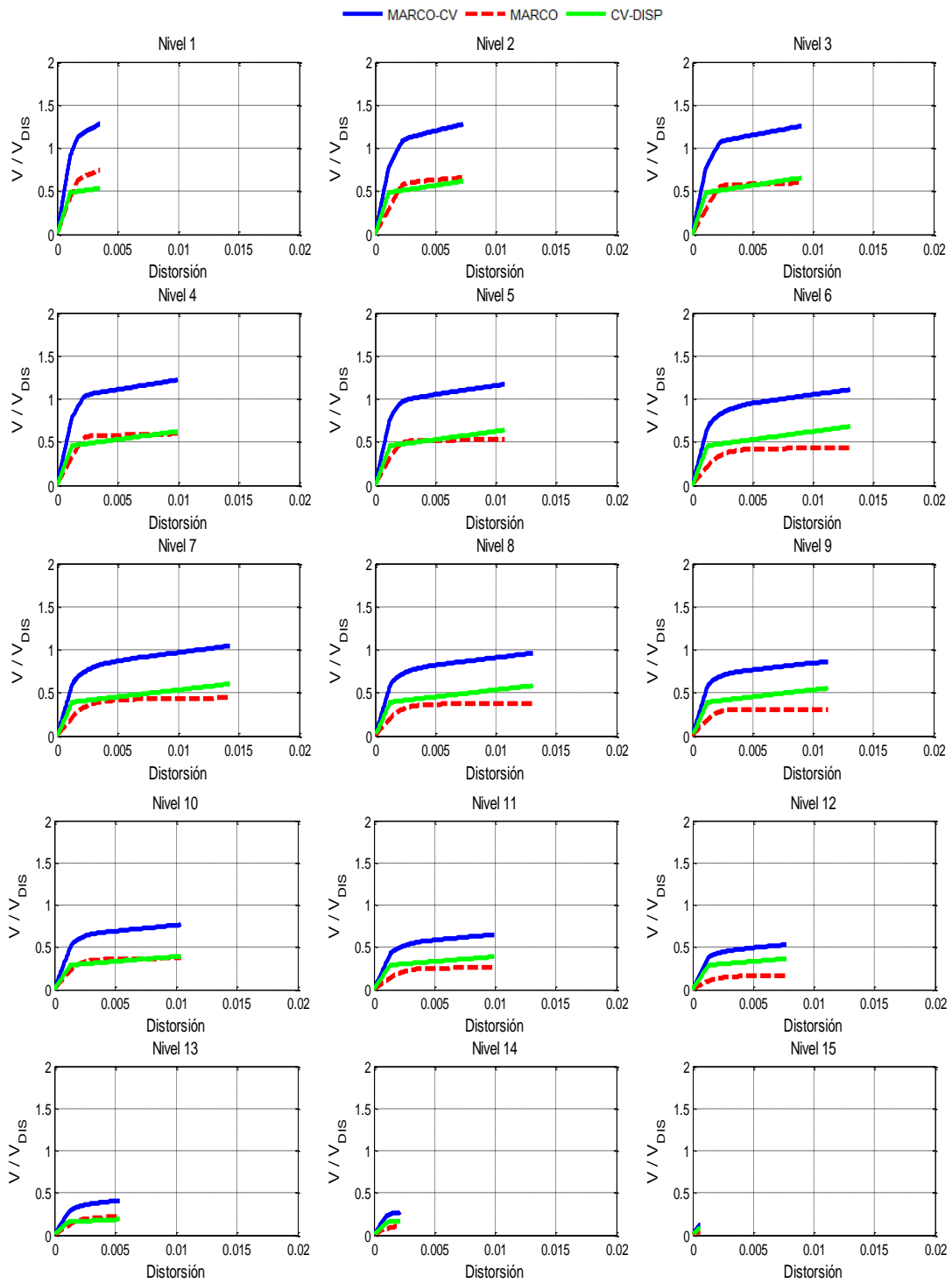


Figura 0.39. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 15 niveles $\theta=40^\circ$, $\alpha=25\%$, $\beta=75\%$, $K_2=0.05$

En la figura 6.40 se presentan los balances cuando $\alpha=25\%$ y $\beta=50\%$, y no se aprecia claramente que cada curva cortante-distorsión sea representativa del balance antes mencionado, en el que el sistema del contraviento-disipador aporta la mayor rigidez al sistema global. Se observa que en la gran mayoría de los

niveles de entrepiso pareciese que el aporte de rigidez y de resistencia, por ambas partes, es la misma; y como en los modelos anteriores los últimos niveles tienen poca intervención.

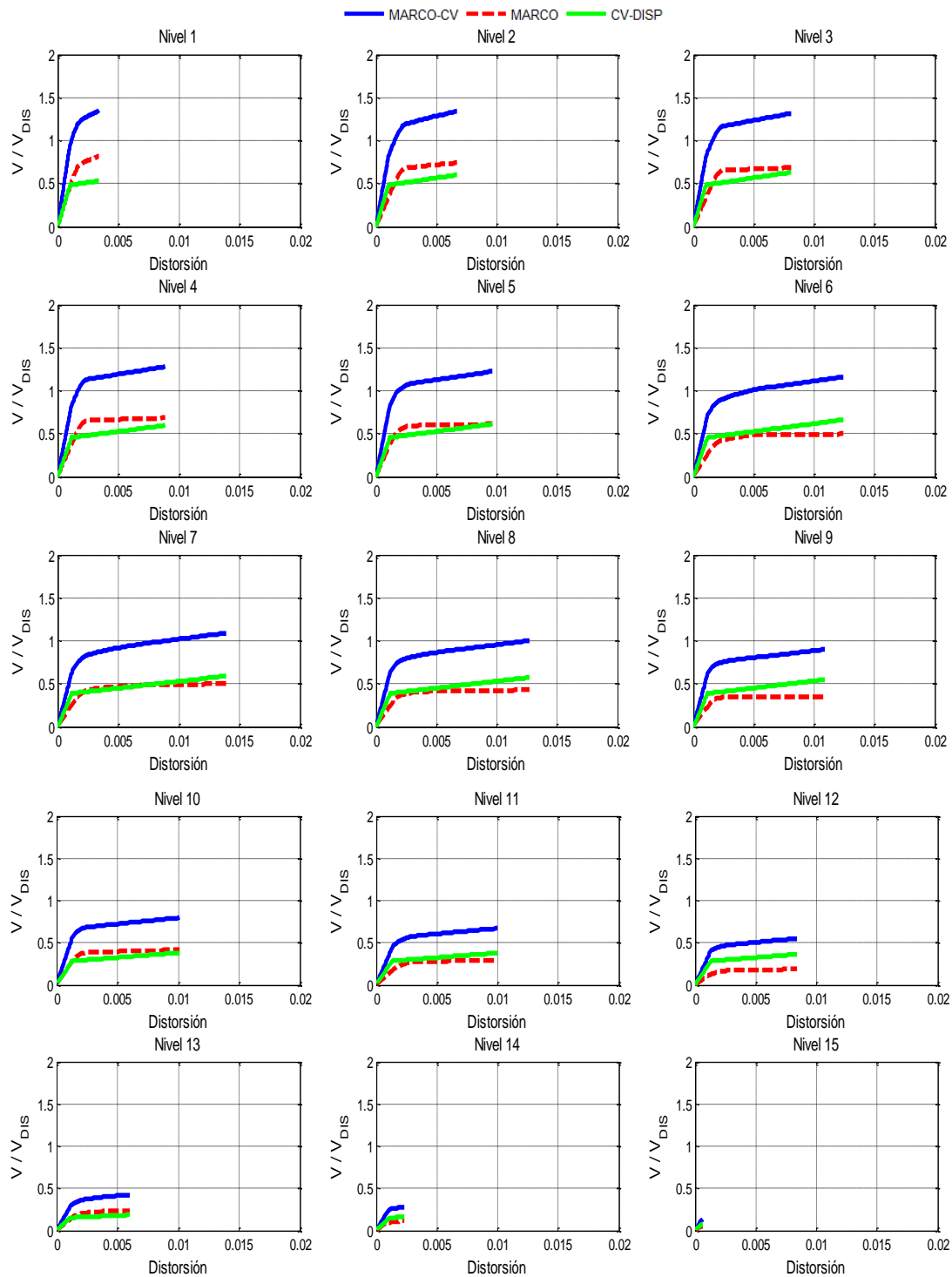


Figura 0.40. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 15 niveles
 $\theta=45^\circ$, $\alpha=25\%$, $\beta=50\%$, $K_2=0.05$

6.3.4 Modelos de 20 niveles

Para los modelos de 20 niveles el balance óptimo de rigidez entre marco y sistema contraviento-disipador fue cuando $\alpha=75\%$; es decir, que el sistema del marco deberá aportar la mayor parte de la rigidez del sistema global. Para estructuras esbeltas, la carga axial del contraviento que transmite al sistema del marco es de magnitud considerable. En consecuencia, las columnas se diseñaron para resistir dicha carga axial, por este motivo, no es de sorprenderse por el valor del balance óptimo encontrado.

En las figuras 6.41 se presentan las curvas cortante-distorsión globales de los modelos con los balances óptimos para ambos ángulos de inclinación que se evaluaron. Estas figuras son representativas del balance de rigidez α con el cuál se diseñó a la estructura y ambas son muy similares en los valores de sobrerresistencia como en los de distorsión.

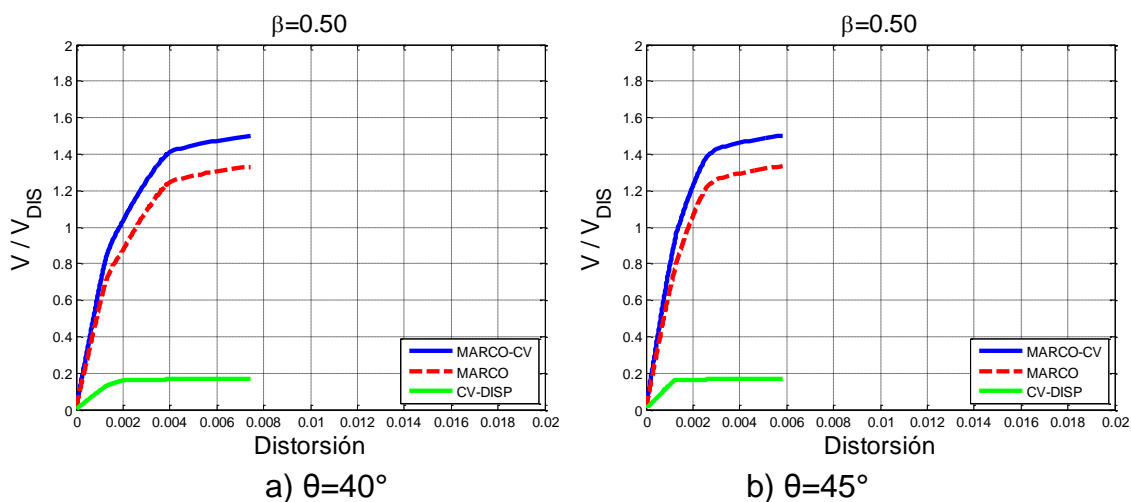
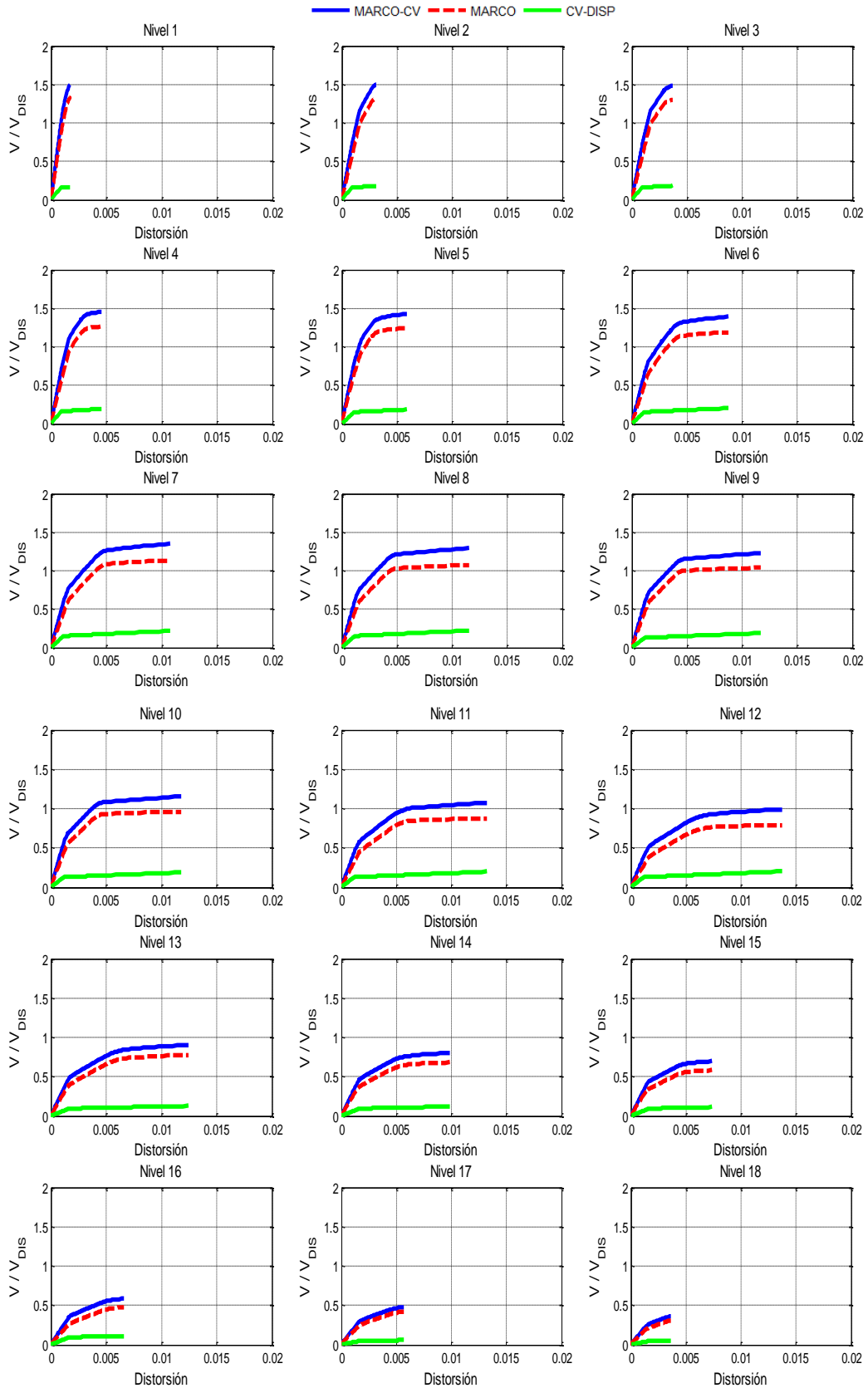


Figura 0.41. Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para modelos de 20 niveles, $\alpha = 75\%$

En las figuras 6.42 y 6.43 se presentan las curvas cortante-distorsión para cada nivel de entresuelo de los modelos cuando $\theta=40^\circ$ y $\theta=45^\circ$ respectivamente. Haciendo una comparación entre ambas, se aprecia que no existe mucha diferencia en el comportamiento entre las curvas y que cada una de ellas es representativa del balance α elegido como óptimo.

Las distorsiones máximas se presentan en los niveles intermedios de ambos modelos, y de los últimos niveles de entresuelo, se observa que su participación es de poca a nula en el comportamiento global del sistema.



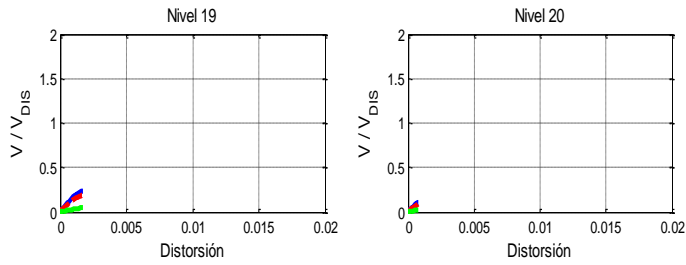
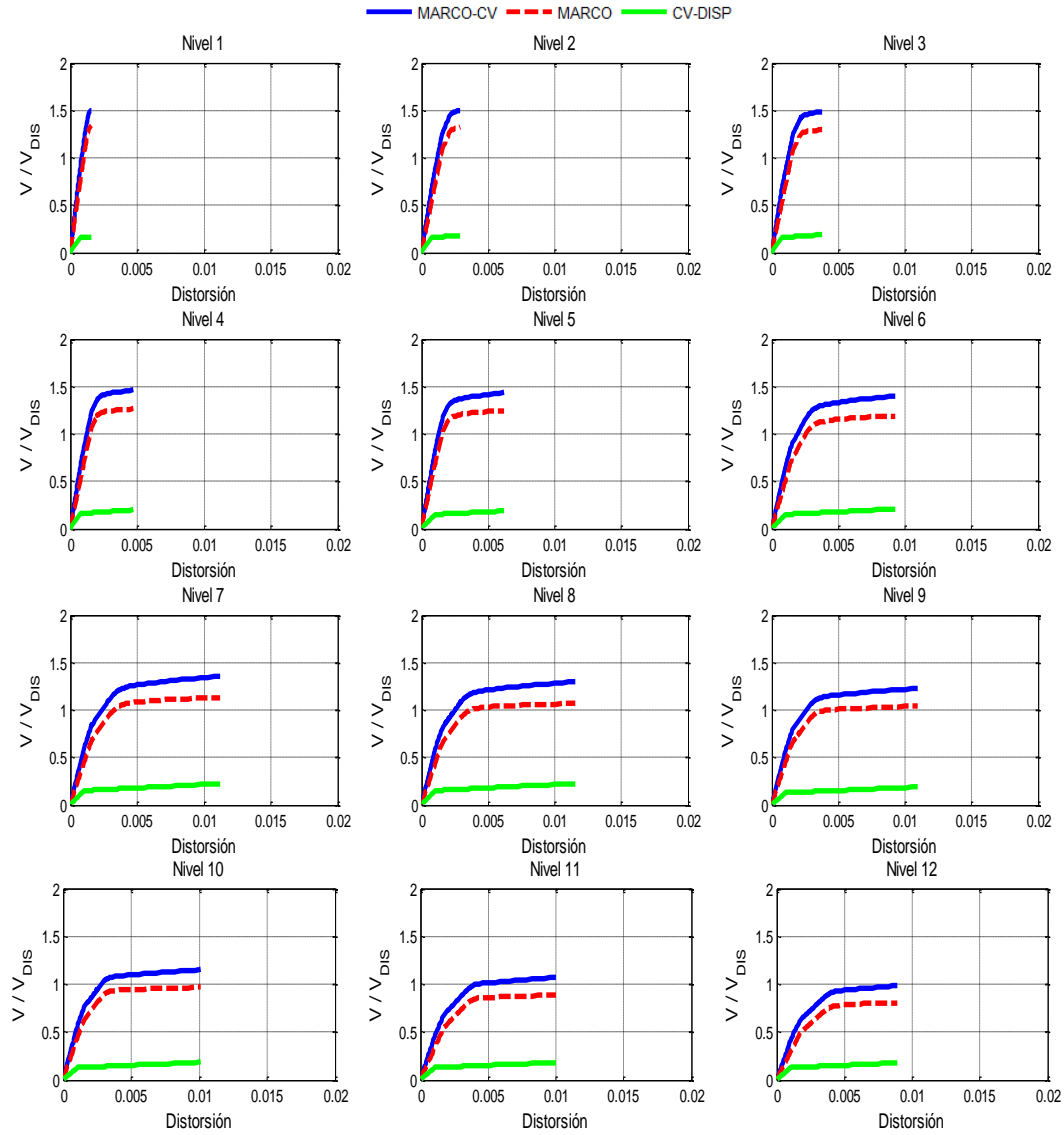


Figura 0.42. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 20 niveles $\theta=40^\circ$, $\alpha=75\%$, $\beta=50\%$, $K_2=0.05$



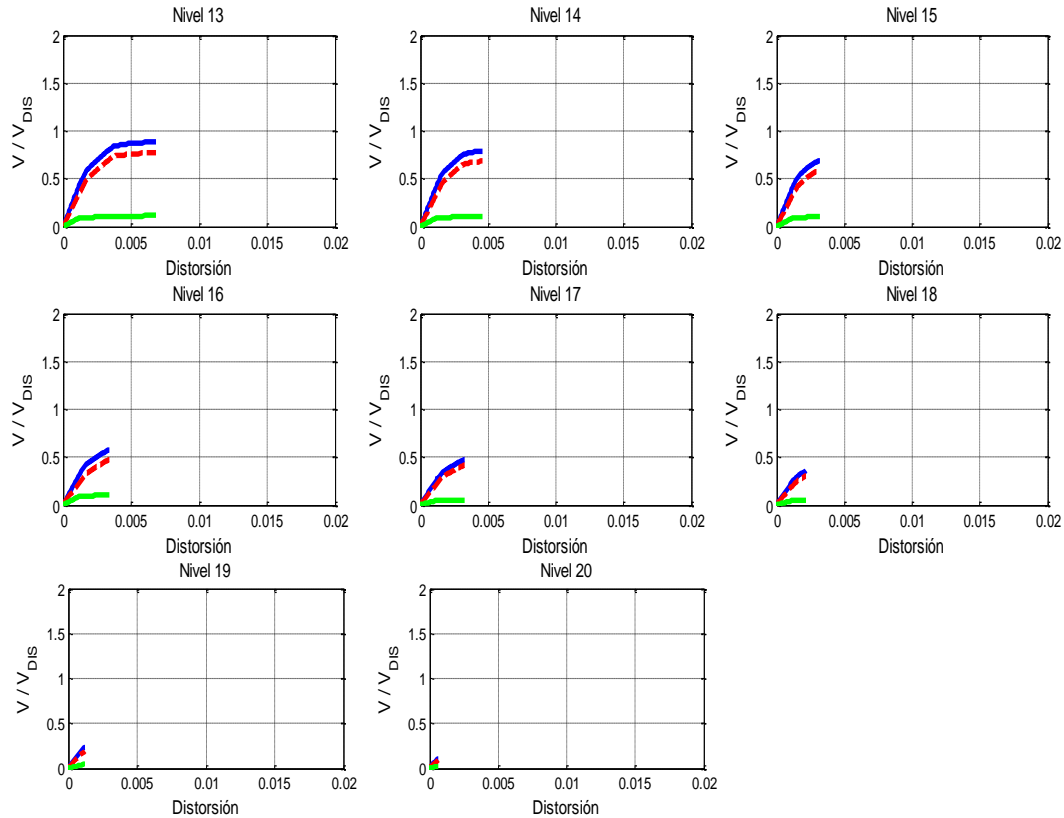


Figura 0.43. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 20 niveles
 $\theta=45^\circ$, $\alpha=75\%$, $\beta=50\%$, $K_2=0.05$

6.3.5 Modelos de 25 niveles

Para los modelos de 25 niveles el balance óptimo de rigidez entre marco y sistema contraviento-disipador fue cuando $\alpha=50\%$, es decir, que el sistema del marco aporta la misma rigidez que el sistema del contraviento-disipador. Al igual que para los modelos de 20 niveles, la carga axial que transmite el contraviento al sistema del marco es grande. A diferencia de los modelos de 20 niveles, para los modelos de 25 niveles era más eficiente el balance antes mencionado, debido a que los disipadores desarrollaban mayores ductilidades objetivo que con el balance de $\alpha=75\%$.

En las figuras 6.44 se presentan las curvas cortante-distorsión globales de los modelos con los balances óptimos elegidos de todos los parámetros evaluados. Como se aprecian de las figuras, éstas no son representativas del balance elegido, debido a que en estas curvas globales, tal pareciese que el marco aporta mayor rigidez que el sistema contraviento-disipador. Además, también se aprecia respuesta inelástica del marco, que aunque pueda ser tolerable si es

principalmente por fluencias razonablemente pequeñas en vigas (daño tolerable), no cumple al 100% con la filosofía de diseño que en estructuras con disipadores pasivos de energía, el marco no debería responder inelásticamente, sino que la acción no lineal y el daño se debería concentrar exclusivamente en los disipadores.

Al igual que en la mayoría de los casos antes mencionados, existe mucha similitud en el mecanismo de comportamiento del sistema global y por separado, así como también en los valores de sobrerresistencia presentadas en las gráficas. La única diferencia que se observa, en primera instancia, es en el valor de la distorsión global desarrollada, que para el modelo cuando $\theta=40^\circ$, es perceptiblemente mayor que para cuando el ángulo del contraviento es $\theta=45^\circ$.

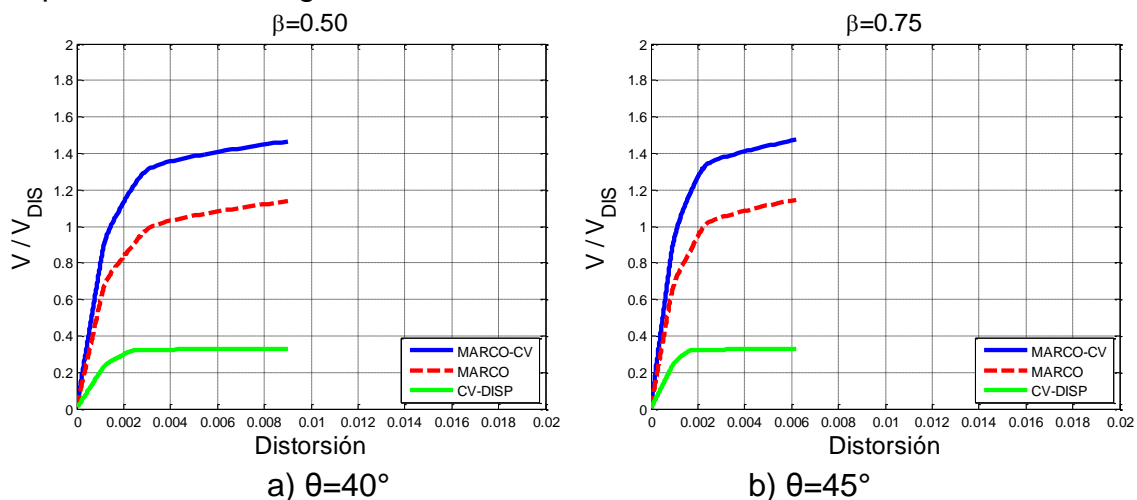
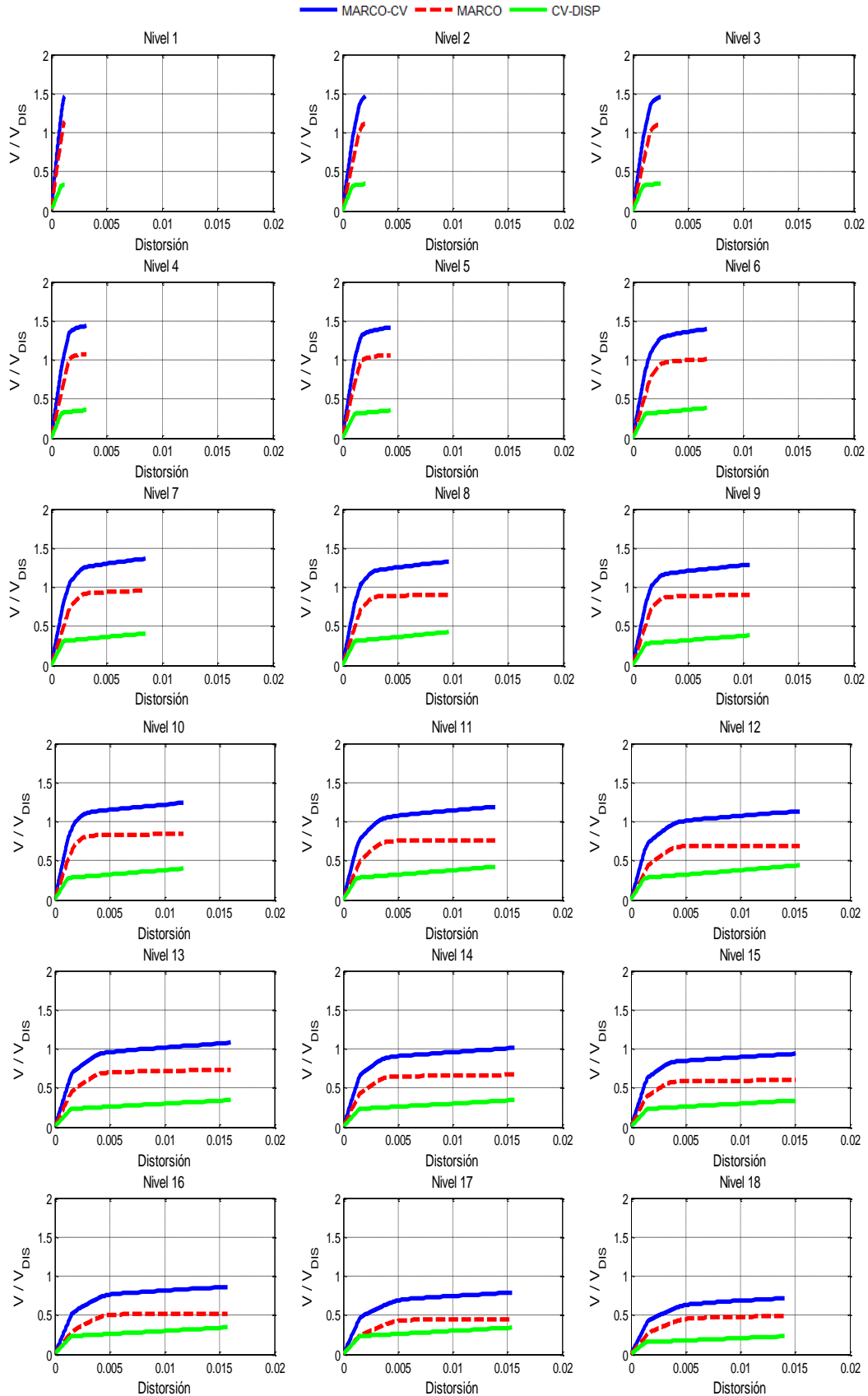


Figura 0.44. Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para modelos de 25 niveles, $\alpha=50\%$

A continuación se detalla el comportamiento para cada nivel de entrepiso de los modelos antes mencionados en las figuras 6.45 y 6.46 que corresponden los modelos para cuando $\theta=40^\circ$ y $\theta=45^\circ$ respectivamente. El comportamiento para ambos modelos es bastante similar, como se aprecia a partir de las curvas cortante-distorsión globales.

Se observa de las figuras que para los primeros tres niveles de entrepiso el comportamiento en ellos es elástico con muy poca participación por parte de los disipadores. Las mayores distorsiones de entrepiso se presentan de los niveles 11 al 18, con un valor promedio de 0.015; y precisamente es en estos niveles de entrepiso donde los disipadores desarrollan las mayores ductilidades (figura 6.44). Para el modelo cuando $\theta=45^\circ$, las mayores distorsiones se presentan del nivel 11 al 17 y rondan en el intervalo de 0.01 (figura 6.45).



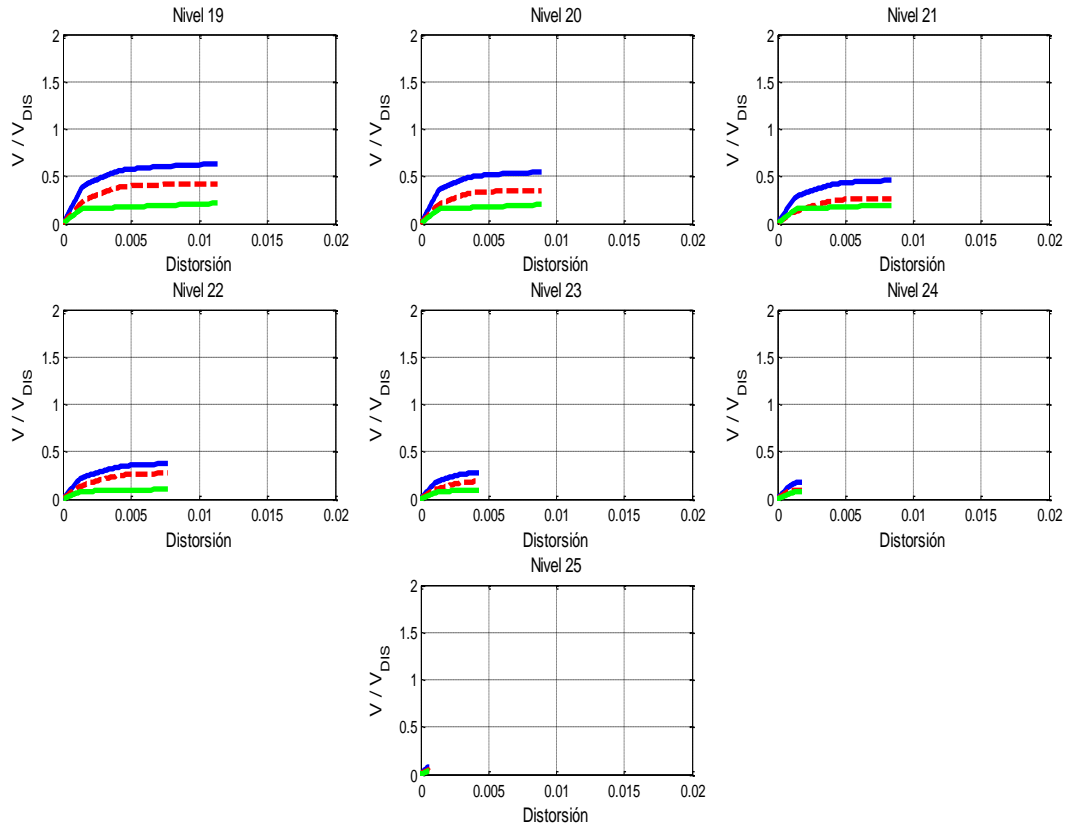
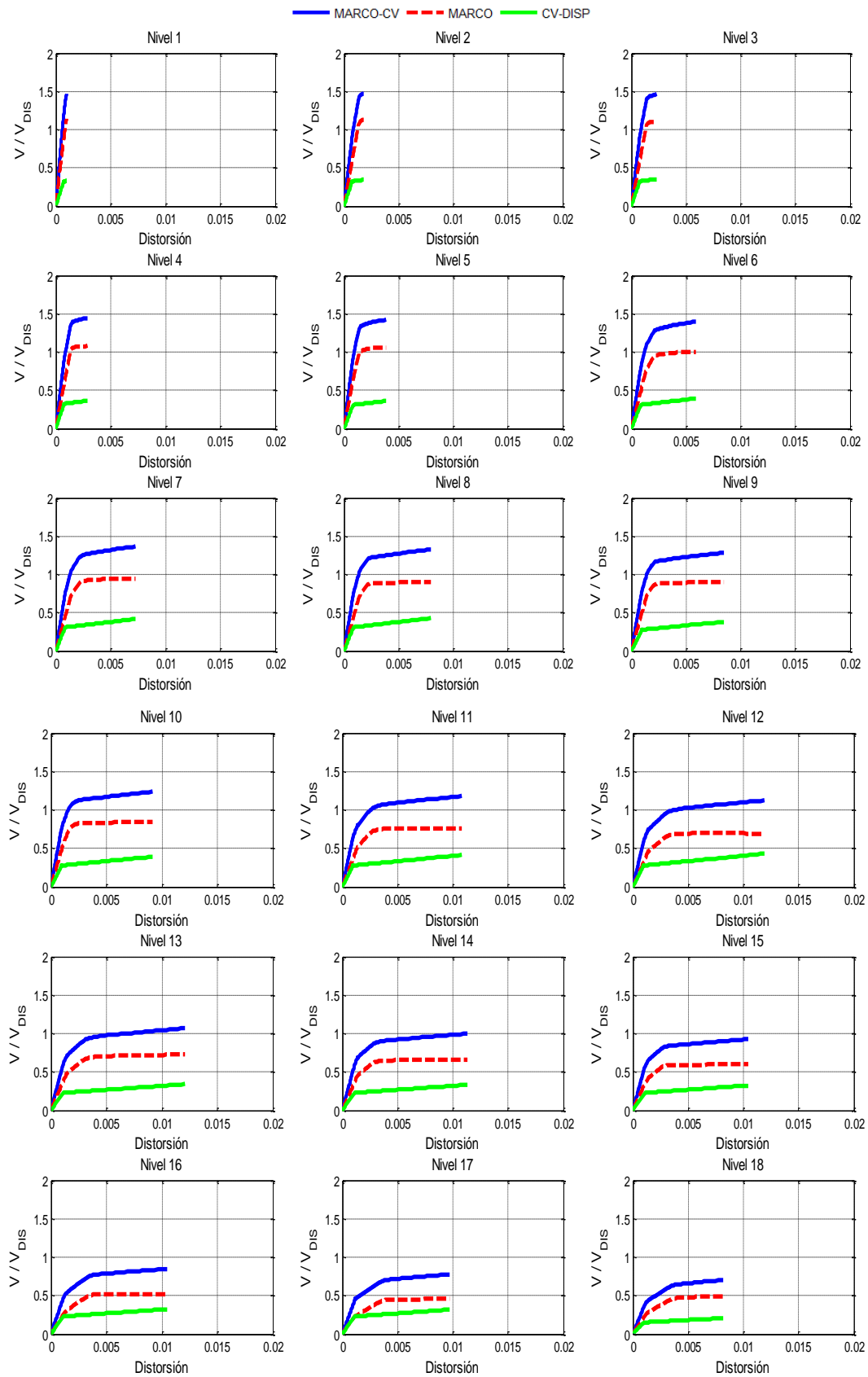


Figura 0.45. Curva cortante normalizado-distorsión para el modelo de 25 niveles
 $\theta=40^\circ$, $\alpha=50\%$, $\beta=50\%$, $K_2=0.05$

Para los últimos dos niveles el comportamiento se repite al igual que en todos los modelos, con excepción de los modelos de cinco niveles, donde los últimos niveles de entrepiso la partición del marco o del contraviento-disipador es imperceptible o nula.

Se observa que para la mayoría de los niveles de entrepiso la contribución en rigidez de los sistemas por separados es la misma, es decir corresponden al 50% cada uno de ellos. Aunque existen ciertos niveles donde la aportación del marco es un poco mayor, esto puede verse más claramente para los primeros niveles de entrepiso en las figuras 6.44 y 6.45.

Cabe resaltar el hecho que en la mayoría de los niveles de entrepiso el primero sistema que ingresa en el intervalo inelástico es el sistema contraviento-disipador, lo cuál es el mecanismo deseable para este tipo de tecnología utilizada, aunque lo 100% deseable es que el marco no incurriere en el intervalo de respuesta no lineal.



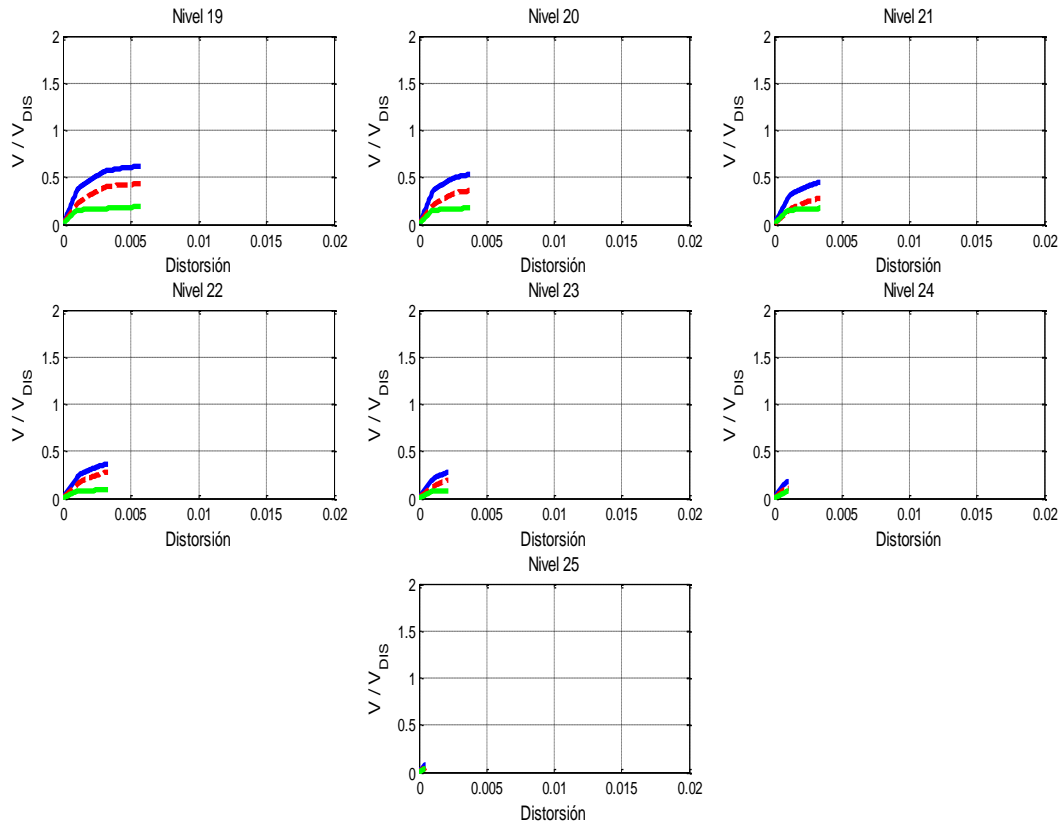


Figura 0.46. Curva cortante-distorsión para el modelo de 25 niveles
 $\theta=45^\circ$, $\alpha=50\%$, $\beta=75\%$, $K_2=0.05$

6.4 Envoltentes de distorsiones

En la figura 6.47 se muestran las curvas envolventes de distorsiones de entrepiso asociadas a Δ_u , para los modelos de 15 niveles cuando $\theta=45^\circ$ y $\alpha=25\%$. De esta figura se observa que a medida que disminuye el balance de rigidez entre el contraviento y el disipador (β), las distorsiones de entrepiso tienden a ser mayores. Lo anterior está asociado a que, a medida que el disipador es más flexible que el contraviento, los desplazamientos que la estructura experimenta tienden a ser mayores para que los disipadores alcancen las ductilidades objetivo.

Además, de la figura antes mencionada, se aprecian las diferencias entre la decisión de diseñar a los disipadores de energía como elastoplásticos perfectos ($K_2=0.00$), o el de considerar una pendiente posterior a la fluencia ($K_2=0.03$ y $K_2=0.05$). El considerar el comportamiento de un disipador como elastoplástico perfecto, como se ha demostrado previamente, limita el desempeño de los disipadores, ya que no desarrollan ductilidades óptimas y por ende, las distorsiones asociadas a ello son mucho menores que para los otros dos casos.

Cuando los disipadores se diseñan con una pendiente posterior a la fluencia, éstos desarrollan mayores ductilidades y, por lo tanto, las distorsiones asociadas a esto tienden a ser mayores. De la figura 6.47 se aprecia que el comportamiento entre los casos cuando $K_2=0.03$ y $K_2=0.05$, son muy similares, aunque con leves diferencias en los valores de distorsión alcanzados.

Para este caso, en específico cuando se considera una pendiente posterior a la fluencia de $K_2=0.03$, las distorsiones de entrepiso tienen a ser mayores para todos los casos β ; a excepción para cuando $\beta=25\%$, donde se observa que los valores de distorsiones máximas se alcanzan cuando $K_2=0.05$. Para todos los casos, las distorsiones máximas se desarrollan en los niveles intermedios de entrepiso. Cabe aclarar que este comportamiento no es una tendencia que se desarrolla en todos los modelos.

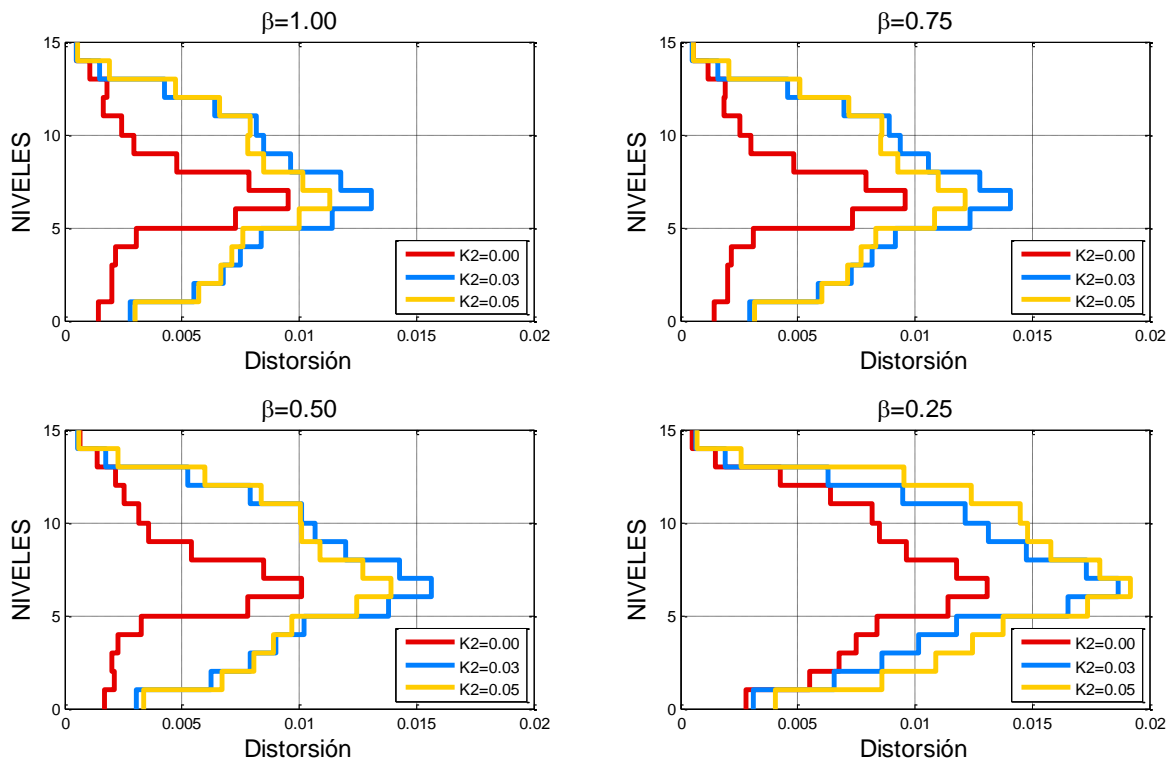


Figura 0.47. Curvas envolventes de distorsiones de entrepiso modelos 15 niveles
 $\theta=45^\circ$, $\alpha=25\%$

Las figuras que se presentan a continuación son representativas de los balances óptimos en rigideces elegidos en las secciones anteriores, donde los disipadores alcanzan las ductilidades objetivo y el comportamiento global de la estructura es bastante satisfactorio. En las figuras 6.48 y 6.49 se muestran dos curvas envolventes de distorsiones para los diferentes modelos evaluados a lo largo de esta investigación. La línea sólida representa a las distorsiones desarrolladas en

cada entrepiso asociadas a Δ_y , mientras que la línea punteada representa a las distorsiones desarrolladas en cada entrepiso asociadas a Δ_u (figura 6.1).

De las figuras 6.48 y 6.49, correspondiente a los modelos donde $\theta=40^\circ$ y $\theta=45^\circ$, se observa que para todos los modelos las mayores distorsiones de entrepiso se presentan en los niveles intermedios, zona donde los disipadores de energía desarrollaron las mayores ductilidades. Además, los últimos niveles no desarrollan actividad inelástica, por lo que su participación es casi nula y, por lo tanto, las distorsiones de entrepiso asociadas a Δ_u y a Δ_y son muy similares. Esta particularidad se presenta también en el primer nivel de entrepiso para los modelos de 25 niveles (figura 6.48 y 6.49).

Para los modelos más pequeños (5 niveles), se observa que aquéllos que fueron diseñados con un ángulo de inclinación de contraviento $\theta=45^\circ$, desarrollan mayores ductilidades que cuando se diseñaron con $\theta=40^\circ$. En los modelos de mediana altura (10 y 15 niveles), se aprecia que la envolvente de distorsión asociados a Δ_y , no es representativa en forma y distribución a la asociada a Δ_u . Para estos modelos también se observa que la distribución de las envolventes de distorsión en los modelos de 10 niveles es mucho más uniforme que para los modelos de 15 niveles.

En los modelos esbeltos (20 y 25 niveles), se repite la tendencia donde las distorsiones máximas se presentan en los niveles intermedio de entrepiso, para el modelo de 25 niveles (figura 6.48) se observa cierta irregularidad en las envolventes de distorsiones asociadas a Δ_u , esto es consecuencia de los cambios de sección entre contravientos y columnas presentadas en la zona intermedia, además de las ductilidades desarrolladas por parte de los disipadores de energía.

En las figuras 6.48 y 6.49, no es claro de observar un patrón en la distribución de las distorsiones asociadas a Δ_u dependientes del parámetro α ; pero si podemos encontrar una tendencia más clara para las distorsiones asociadas a Δ_y , donde a medida que el parámetro α es mayor, las magnitudes de las distorsiones asociadas al estado límite de servicio tienden a ser mayores.

De estas figuras también es importante mencionar que las magnitudes de las distorsiones de entrepiso en el primer nivel siempre son significativamente menores al resto de los otros niveles; y esta tendencia se aprecia más claramente conforme el número de niveles de entrepiso va en aumento, sin importar el ángulo del contraviento utilizado. Gran parte de esta característica que se comenta se debe a la condición de empotramiento perfecto teórico que se supone, para el

diseño estructural, en este primer nivel de entrespiso; hecho que es muy difícil de lograr en las edificaciones reales.

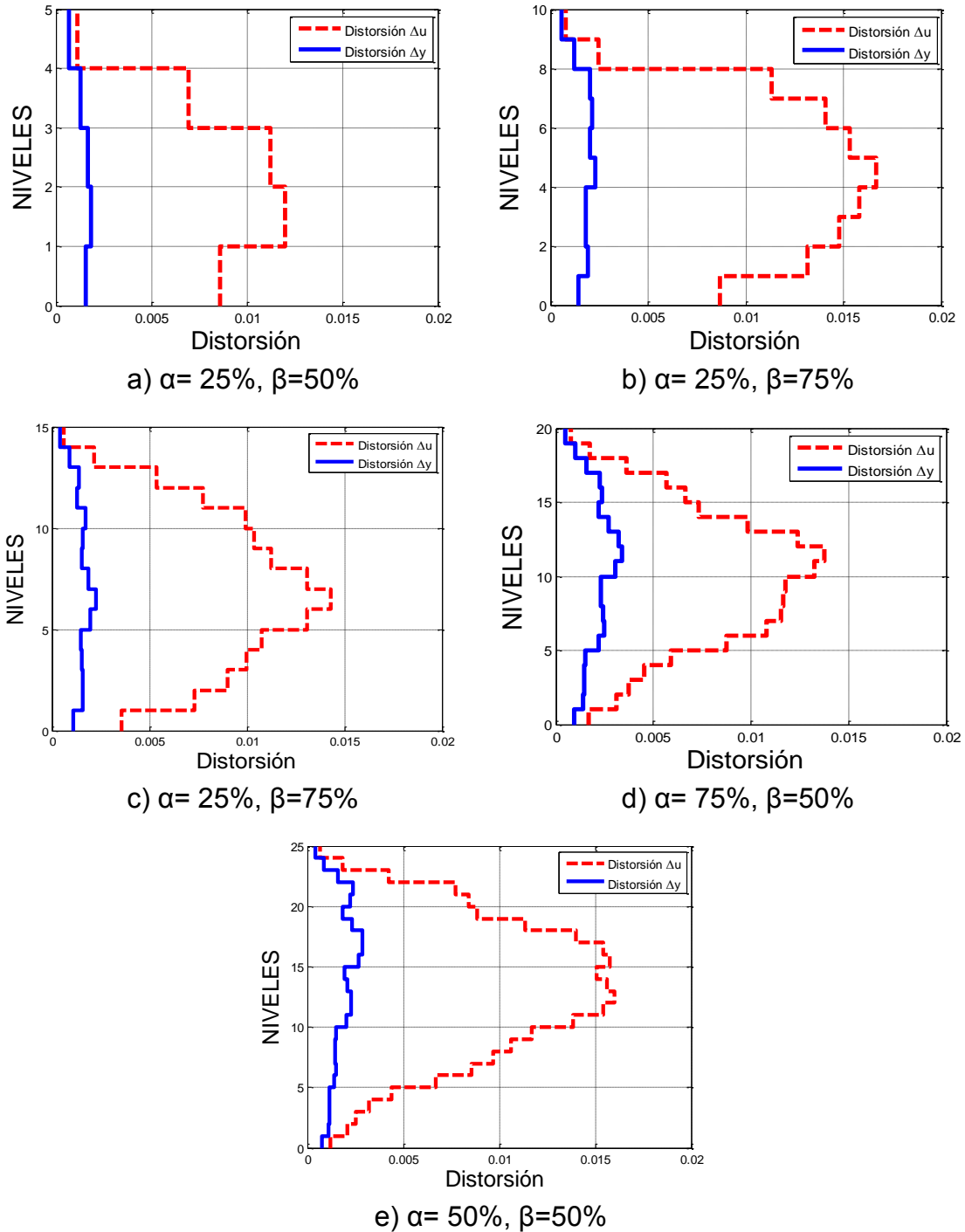


Figura 0.48. Curvas envolventes de distorsiones de entrespiso, $\theta=40^\circ$, $K_2=0.05$

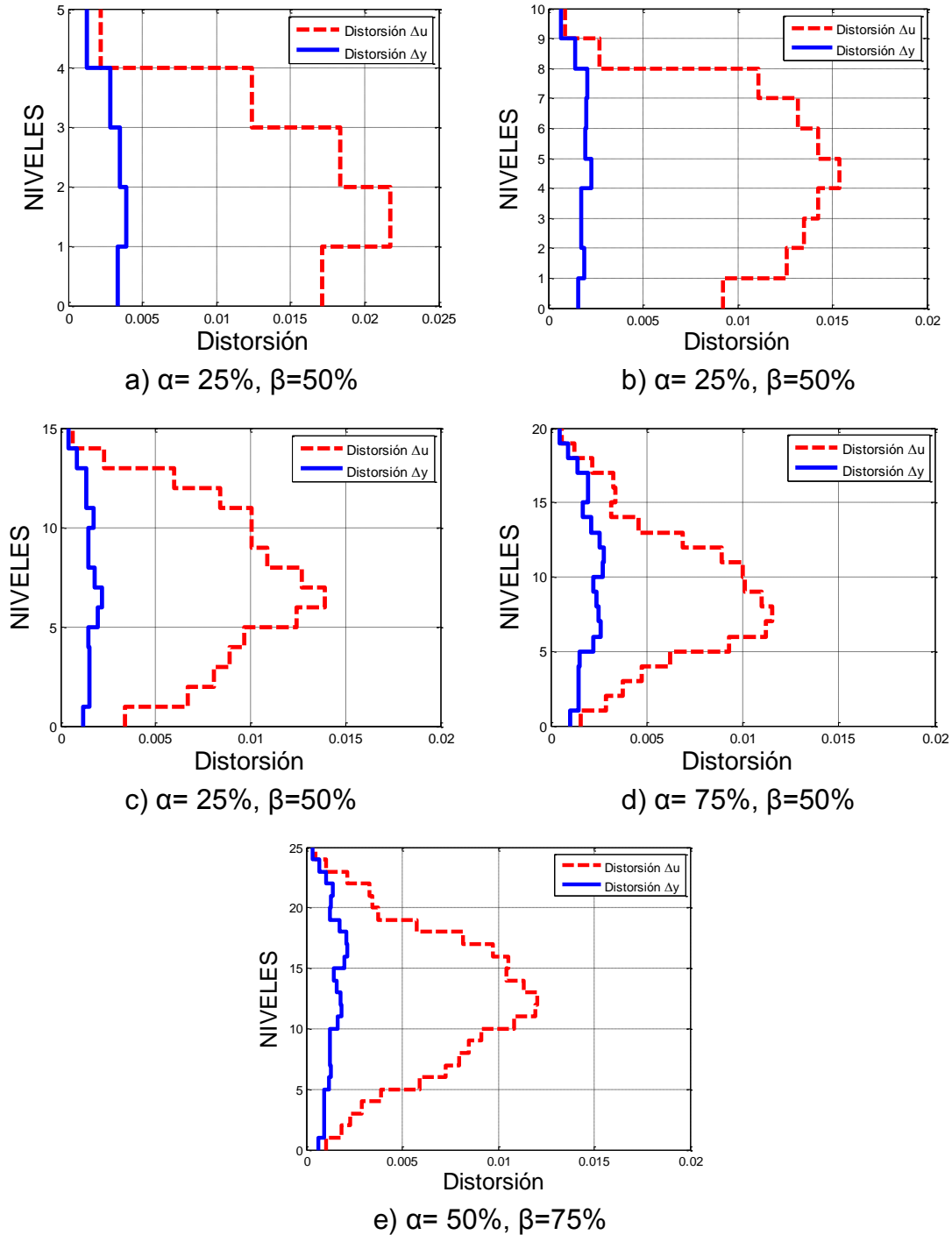


Figura 0.49. Curvas envolventes de distorsiones de entrepiso, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$

De las figuras 6.48 y 6.49 se observa que de los modelos de pequeña y mediana altura (5 a 15 niveles), las distorsiones de entrepiso asociado a Δ_u varían en un intervalo entre 0.013 a 0.022, este último valor representa al modelo de cinco niveles donde $\theta=45^\circ$ (figura 6.49). De los seis modelos que conforman el total de

los marcos de pequeña y mediana altura se puede decir los modelos tienden a desarrollar una distorsión, asociado a Δ_u , promedio de entrepiso de 0.017. Mientras que, las distorsiones de entrepiso asociadas a Δ_y , varían entre 0.002 a 0.004. En los modelos esbeltos de esta investigación, los marcos tienden a desarrollar distorsiones de entrepiso máximas, asociadas a Δ_u , que varían entre 0.12 a 0.015, siendo el último valor correspondiente al modelo de 25 niveles donde $\theta=40^\circ$ (figura 6.48). Mientras que las distorsiones asociadas a Δ_y , varían entre 0.002 y 0.003.

Estas gráficas de envolventes de distorsiones de entrepiso pueden ser de gran utilidad para fijar límites de entrepiso asociados al estado límite donde los disipadores desarrollan la ductilidad deseada (Δ_u), o bien, al estado límite de servicio operacional de la estructura global (Δ_y).

En la figura 6.50 se asocia una curva envolvente de distorsión con su correspondiente mapeo de fluencia. Como se había explicado anteriormente, las distorsiones máximas se presentan en el mismo sitio donde los disipadores desarrollaron las mayores ductilidades locales. Así también, en los entrepisos donde se presentan estas ductilidades vienen acompañadas de disipación de energía por parte de las columnas simbolizadas con una escala de color que representan la magnitud de las rotaciones plásticas en esos elementos. Si bien, esto puede deberse a la variación de secciones que se presentan en esos entrepisos, el repentino cambio de magnitudes en la gráfica envolvente de distorsiones muestra donde podrían estarse formando posibles pisos débiles.

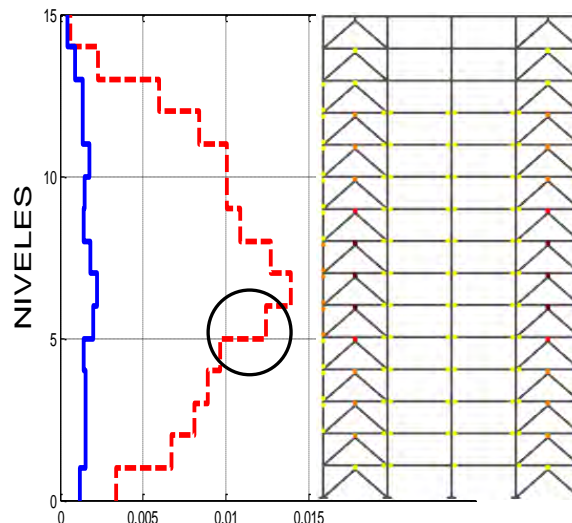


Figura 0.50. Comparativa de curva envolventes de distorsiones de entrepiso y mapeo de fluencia asociado. Modelo 15N, $\theta=45^\circ$, $K_2=0.05$

En la figura 6.51 se aprecian los valores promedio de las distorsiones de entrepiso asociadas a Δ_y ; estos valores se obtuvieron calculando la media de las distorsiones de entrepiso sin tomar en cuenta el primer nivel de entrepiso ni aquellos niveles donde su comportamiento fuera elástico. Se pueden identificar a los diez modelos elegidos por ser los que mejor se comportaban según la filosofía de estructuras con disipadores de energía. Se representan a los valores correspondientes de los modelos donde $\theta=45^\circ$ con un cuadrado y a los valores de los modelos donde $\theta=40^\circ$ con un rombo.

De esta figura se observa que la mayoría de los valores se encuentran en el intervalo entre 0.15% y 0.20%, sin importar el balance de rigidez α con el cuál se diseñó. Se observa que el valor de la distorsión para el modelo de cinco niveles y $\theta=45^\circ$ sobrepasa los límites antes mencionados y se encuentra cercano al 0.3%. También se aprecia que la distorsión de fluencia: (a) disminuye conforme aumenta el número de niveles, (b) depende del ángulo de inclinación del contraviento θ y, (b) depende del balance de rigidez entre el marco y el sistema disipador-contraviento α ; a mayor α , mayor es la distorsión de fluencia, lo cual se debe esperar dado que α crece a medida que el sistema depende más de la rigidez del marco.

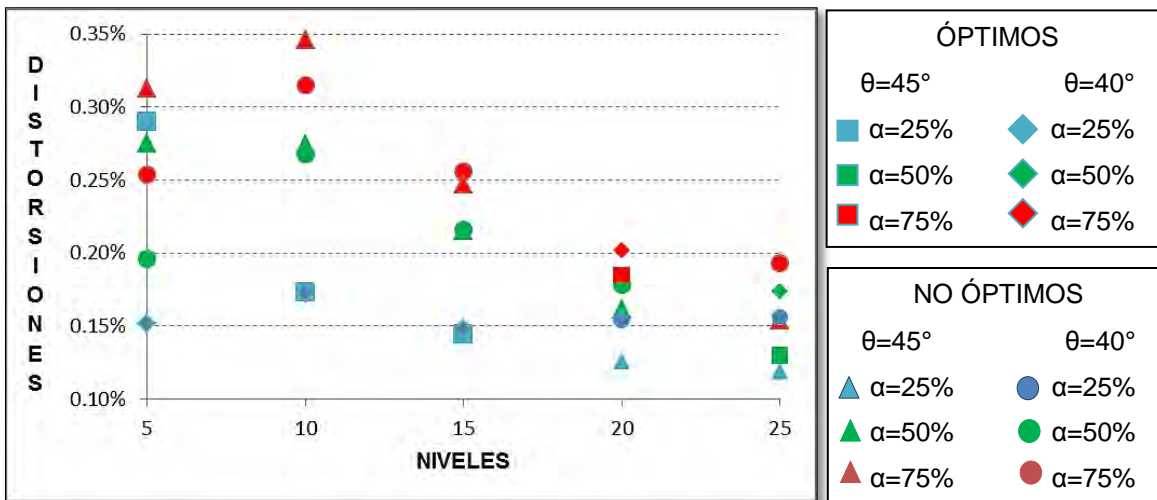


Figura 0.51. Factor de distorsión asociado a Δ_u para ambos ángulos de inclinación en los contravientos de soporte

6.5 Parámetros obtenidos de las curvas cortante normalizado-distorsión

Con la finalidad de proponer métodos de diseño sencillos y conocidos a los ingenieros de la práctica, es importante adecuar una metodología de diseño de

estructuras con disipadores de energía que sea congruente con la filosofía de diseño sismorresistente utilizada actualmente en México, tanto para el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOC-08), como para el Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal (NTCS-04). Por ello, se obtuvieron parámetros de interés con base en las curvas cortante normalizado-distorsión obtenidas de los análisis estáticos no lineales.

De la idealización de las curvas cortante normalizado-distorsión globales (figura 6.52), para cada modelo evaluado en este estudio paramétrico, se obtuvieron los siguientes parámetros:

- Factores de comportamiento sísmico (Q)
- Factores de reducción de fuerzas sísmicas por sobrerresistencia (R)

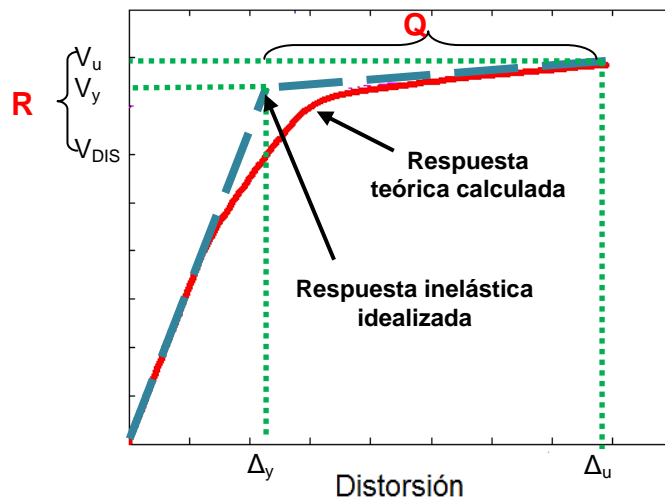


Figura 0.52. Idealización bilineal de los diagramas cortante-distorsión

6.5.1 Factores de comportamiento sísmico Q

El factor de comportamiento sísmico Q relaciona la capacidad de deformación inelástica de una estructura sin comprometer la estabilidad de ésta. Desde un punto de vista histórico, las primeras reducciones en permitirse a los espectros inelásticos de diseño sísmico en México, fueron por concepto de ductilidad en el RCDF-76 con base en el factor de comportamiento sísmico Q (Tena 2010).

Actualmente, para los dos manuales de diseño sísmico más utilizados en el país, no existen propuestas de diseño específicas para estructuras con disipadores de energía, y en consecuencia, tampoco hay lineamientos pertinentes que nos delimiten el uso de este factor de comportamiento sísmico Q . En esta

investigación, el factor de comportamiento sísmico Q se obtuvo de la relación entre la distorsión máxima alcanzada por parte de la curva cortante normaliza-distorsión global de la estructura, entre la distorsión asociada a Δ_u (figura 6.52), es decir:

$$Q = \frac{\Delta_y}{\Delta_u} \tag{6.1}$$

De la figura 6.53 se aprecia que a medida que el valor de β disminuye, es decir, que los disipadores son mucho más flexibles que los contravientos de soporte, los valores de Q desarrollados por los modelos tienden a ser mayores. Además, se observa que a medida que el valor de α aumenta, es decir que el sistema de marco aporta mayor rigidez al sistema global, los valores de Q tienden a disminuir.

Por ejemplo, observando las tres gráficas correspondientes a esta figura, se aprecia que los mayores valores se alcanzaron cuando $\alpha=25\%$, a excepción del marco de 25 niveles que para este balance de rigidez, se tuvo que limitar su desplazamiento previniendo la formación de posibles pisos débiles. En los modelos donde $\alpha=50\%$, los valores máximos corresponden cuando $\beta=25\%$ para los modelos más pequeños, y este valor disminuye conforme el número de niveles de los marcos aumenta. Por último, cuando se diseñaron a los marcos con $\alpha=75\%$, éstos tienden a alcanzar un comportamiento sísmico máximo de $Q=6$.

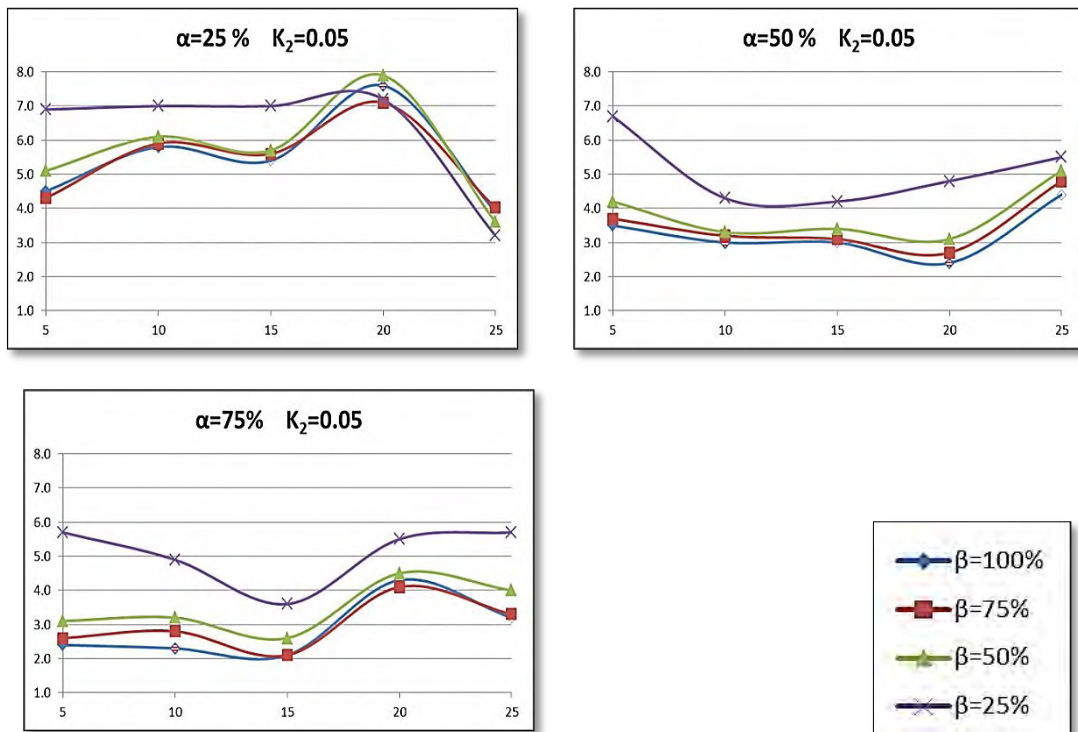


Figura 0.53. Factores de comportamiento sísmico Q para los modelos donde $\theta=45^\circ$

En las tablas que se presentan a continuación se reportan los factores Q que desarrollaron cada uno de los modelos analizados. Estas tablas son representativas de los balances óptimos α elegidos a lo largo de la investigación para cada nivel de entrepiso que se evaluó.

Se emplea una escala de colores asociada a la ductilidad μ desarrollada por los disipadores, siendo los colores verde los que presentaron mejor desempeño, amarillo los que presentan un desempeño razonable desde un punto de vista de diseño sismorresistente, el color naranja un desempeño poco aceptable y rojo aquellos modelos donde los disipadores no alcanzaron las ductilidades objetivo y, por tanto, no ofrecen grandes ventajas. Además, se distinguen a los factores de comportamiento sísmico Q con tres colores: (1) con el color verde aquéllos donde fluyen los disipadores sin que por ello se presenten rotaciones plásticas en las columnas y se toleran muy pocas fluencias reducidas en las vigas; (2) con color amarillo aquéllos donde la fluencia de los disipadores propicia actividad inelástica tolerable en vigas y en algunas columnas y, (3) por último con color rojo aquéllas donde la fluencia de los disipadores lidera a un indeseable mecanismo de piso débil, donde se presentan rotaciones inelásticas muy altas en ambos extremos de las columnas en distintos niveles.

Cabe señalar que conforme a esta escala de colores, los desempeños inaceptables corresponden a aquéllos donde Q está sombreado en rojo, no importando el color de μ , y los desempeños ideales conforme a la filosofía de diseño de estructuras con disipadores de energía corresponden a aquéllos donde Q está sombreado en verde y μ está en verde o amarillo.

De las tablas 6.3 y 6.4 se observa que el diseñar a los disipadores como elastoplásticos perfectos limita el desempeño de éstos, dado que no se pueden desarrollar las ductilidades objetivo; esto lidera a factores Q reducido que, por su parte, no lideran en general a mecanismos de piso suave. Como se aprecia de estas tablas el considerar una pendiente posterior a la fluencia en los disipadores de energía mejora su desempeño para alcanzar las ductilidades objetivo, pero al desarrollar también mayores fuerzas, esto conduce a que en muchas ocasiones se axialicen de más las columnas y se formen articulaciones en ellas que puedan liderar a mecanismos de piso suave, y es por ello que en estas tablas, muchos valores reportados para Q están marcados en rojo, sobre todo si se comparan con los correspondientes cuando el modelo es elastoplástico ($k_2=0$).

5 NIVELES $\alpha = 25\%$				10 NIVELES $\alpha = 25\%$			
	K ₂ =0.00	K ₂ =0.03	K ₂ =0.05		K ₂ =0.00	K ₂ =0.03	K ₂ =0.05
$\beta=100\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\beta=100\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	Q=4.6	Q=5.3	Q=5.2		Q=4.9	Q=6.6	Q=6.3
$\beta=75\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\beta=75\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	Q=4.4	Q=5.6	Q=5.4		Q=4.6	Q=6.6	Q=6.5
$\beta=50\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu > 10$	$\mu > 10$	$\beta=50\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu > 10$	$\mu > 10$
	Q=3.7	Q=5.7	Q=5.6		Q=4.2	Q=6.6	Q=6.8
$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu > 10$	$\mu > 10$	$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 6 - 8$
	Q=2.7	Q=6.6	Q=6.5		Q=3.5	Q=5.	Q=5.9

15 NIVELES $\alpha = 25\%$				20 NIVELES $\alpha = 75\%$			
	K ₂ =0.00	K ₂ =0.03	K ₂ =0.05		K ₂ =0.00	K ₂ =0.03	K ₂ =0.05
$\beta=100\%$	$\mu < 6$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\beta=100\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	Q=2.5	Q=5.6	Q=5.5		Q=3.1	Q=2.9	Q=2.7
$\beta=75\%$	$\mu < 6$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\beta=75\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	Q=2.4	Q=5.8	Q=5.7		Q=3.6	Q=3.2	Q=2.9
$\beta=50\%$	$\mu < 6$	$\mu > 10$	$\mu > 10$	$\beta=50\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu > 10$	$\mu > 10$
	Q=2.5	Q=6.	Q=6.4		Q=3.4	Q=4.	Q=3.6
$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 6 - 8$	$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu = 10 - 8$	$\mu > 10$
	Q=2.7	Q=4.6	Q=5.4		Q=3.	Q=4.4	Q=4.8

25 NIVELES $\alpha = 50\%$			
	K ₂ =0.00	K ₂ =0.03	K ₂ =0.05
$\beta=100\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	Q=3.9	Q=4.6	Q=4.3
$\beta=75\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	Q=5.9	Q=4.8	Q=4.5
$\beta=50\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu > 10$	$\mu > 10$
	Q=5.1	Q=5.3	Q=5.1
$\beta=25\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	Q=4.7	Q=5.3	Q=6.

Tabla 6.3. Coeficientes de comportamiento sísmico para los balances α óptimos, $\theta=40^\circ$

5 NIVELES $\alpha = 25\%$				10 NIVELES $\alpha = 25\%$			
	$K_2=0.00$	$K_2=0.03$	$K_2=0.05$		$K_2=0.00$	$K_2=0.03$	$K_2=0.05$
$\beta=100\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\beta=100\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	$Q=4.3$	$Q=4.4$	$Q=4.5$		$Q=4.$	$Q=6.3$	$Q=5.8$
$\beta=75\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\beta=75\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	$Q=4.1$	$Q=4.1$	$Q=4.3$		$Q=3.8$	$Q=6.3$	$Q=5.9$
$\beta=50\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu > 10$	$\beta=50\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu > 10$	$\mu > 10$
	$Q=3.7$	$Q=4.3$	$Q=5.1$		$Q=3.5$	$Q=6.6$	$Q=6.1$
$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu > 10$	$\mu > 10$	$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu = 10 - 8$	$\mu > 10$
	$Q=2.6$	$Q=5.3$	$Q=6.9$		$Q=2.5$	$Q=6.5$	$Q=7.$

15 NIVELES $\alpha = 25\%$				20 NIVELES $\alpha = 75\%$			
	$K_2=0.00$	$K_2=0.03$	$K_2=0.05$		$K_2=0.00$	$K_2=0.03$	$K_2=0.05$
$\beta=100\%$	$\mu < 6$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\beta=100\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	$Q=2.4$	$Q=5.5$	$Q=5.4$		$Q=2.9$	$Q=2.5$	$Q=2.4$
$\beta=75\%$	$\mu < 6$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\beta=75\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	$Q=2.3$	$Q=5.6$	$Q=5.6$		$Q=3.4$	$Q=2.9$	$Q=2.7$
$\beta=50\%$	$\mu < 6$	$\mu > 10$	$\mu > 10$	$\beta=50\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu > 10$	$\mu > 10$
	$Q=2.$	$Q=5.5$	$Q=5.7$		$Q=3.$	$Q=3.4$	$Q=3.5$
$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu = 10 - 8$	$\mu > 10$	$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu > 10$	$\mu > 10$
	$Q=1.9$	$Q=5.7$	$Q=7.$		$Q=2.9$	$Q=4.4$	$Q=4.8$

25 NIVELES $\alpha = 50\%$			
	$K_2=0.00$	$K_2=0.03$	$K_2=0.05$
$\beta=100\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	$Q=4.6$	$Q=4.5$	$Q=4.4$
$\beta=75\%$	$\mu = 10 - 8$	$\mu > 10$	$\mu > 10$
	$Q=4.7$	$Q=5.2$	$Q=4.8$
$\beta=50\%$	$\mu = 6 - 8$	$\mu > 10$	$\mu > 10$
	$Q=4.4$	$Q=5.6$	$Q=5.1$
$\beta=25\%$	$\mu < 6$	$\mu = 6 - 8$	$\mu = 10 - 8$
	$Q=4.$	$Q=5.$	$Q=5.5$

Tabla 6.4. Coeficientes de comportamiento sísmico para los balances α óptimos, $\theta=45^\circ$

También se puede apreciar que los modelos de cinco niveles fueron los únicos que tuvieron un desempeño excelente referente a la filosofía de diseño de estructuras con disipadores de energía. Todos los demás modelos presentaron actividad inelástica no sólo en los disipadores, sino también en columnas y vigas principalmente, y aunque las rotaciones plásticas de esos elementos fueron de magnitudes pequeñas, hay que recordar que una estructura que cuenta con la tecnología de los disipadores de energía, éstos deben ser los únicos que trabajen inelásticamente.

De los resultados antes expuestos se reportan los coeficientes de comportamiento sísmico Q de los balances óptimos elegidos en esta investigación (figura 6.54). Se aprecia que los mayores valores corresponden para aquellos modelos donde $\alpha=25\%$, ya que $Q \approx 6$. Para los modelos de 20 niveles y en el cuál se eligió un balance de $\alpha=75\%$, el factor de comportamiento sísmico tiende a cuatro ($Q \approx 4$). Finalmente, para los modelos más esbeltos este parámetro tiende a cinco ($Q \approx 5$). Cabe señalar que para estos casos, se debería tolerar cierto daño en las vigas, lo cual no cumple al 100% la filosofía de diseño de estructuras con disipadores de energía, por lo que el diseñador debe estar consciente que debería tolerar ese daño, y los miembros de los comités de reglamentos también. Otras opciones sería evaluar si limitando Q a un valor menor (por ejemplo, $Q=4$), se logra que sólo trabajen los disipadores, o valorar opciones adicionales de un detallado dúctil de vigas y columnas que permitan desarrollar las capacidades de los disipadores sin que se presente fluencia o daño en estos elementos. Esto sale del alcance del presente estudio, por lo que se deberá evaluar en investigaciones futuras.

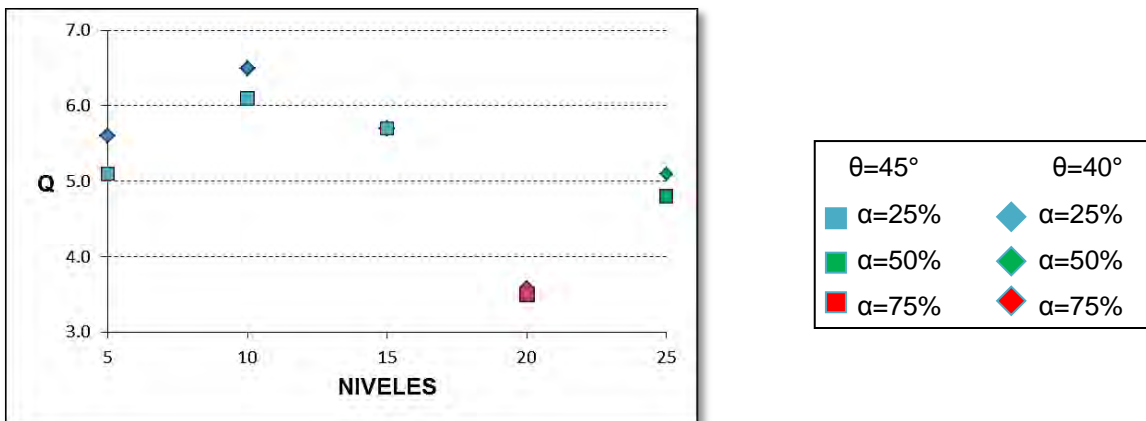


Figura 0.54. Factores de comportamiento sísmico Q para balances de rigideces óptimos

6.5.2 Factores de sobrerresistencia R

Como comentan Miranda y Bertero en 1994, Kappos en 1999, y Ordaz y colaboradores en 2003, en general, las estructuras cuentan con reservas de resistencias debidas a diversos factores, dentro de las cuales se encuentran la redundancia o la sobrerresistencia local de algunos elementos. Algunos requisitos especificados por los reglamentos de diseño, como el empleo de áreas de acero mínimo, factores de reducción de resistencia, metodologías empleadas para evaluar resistencias, efectos debidos a las cargas laterales, o consideraciones relacionados con aspectos constructivos, como el uso de secciones tipo, pueden inducir niveles de sobrerresistencia considerables (Godínez 2010).

En primera instancia de los factores antes mencionados, tenemos los valores nominales de los materiales empleados en la construcción, éstos son generalmente menores que sus resistencias reales. Por otro lado, muchos de los modelos que se emplean para evaluar resistencias tienen simplificaciones del lado de la seguridad. Aunque quizás, una de las fuentes más grandes de sobrerresistencia en muchas estructuras sea el procedimiento mismo de diseño que se utiliza en las disposiciones reglamentarias (Tena 2010).

Al igual que para el factor de comportamiento sísmico Q , actualmente no existen propuestas de diseño para el factor de sobrerresistencia R para estructuras con disipadores de energía. En esta investigación, el factor de sobrerresistencia R se obtuvo de la relación entre el cortante último desarrollado por los modelos obtenidos del análisis estático no lineal, entre el cortante de diseño (figura 6.52), es decir:

$$R = \frac{V_u}{V_{DIS}} \quad (6.2)$$

De los resultados expuestos en la figura 6.55 se aprecia que las menores sobrerresistencias se presentan para los modelos de pequeña y mediana altura, de las cuales se encontró que el balance óptimo para estas estructuras fue cuando el sistema contraviento-disipador aportaba mayor rigidez al sistema global ($\alpha=25\%$). Para los modelos de mayor altura, los balances elegidos fueron cuando $\alpha=75\%$, para los modelos de 20 niveles y $\alpha=50\%$ para los modelos de 25 niveles. Como se había mencionado antes, para estos balances elegidos la carga axial que transmite el contraviento a la columna es de magnitud considerable, por lo que el diseño de estos elementos se hizo con mayores reservas de resistencia. Es por este motivo, que los valores máximos de los factores de sobrerresistencia le corresponden a los marcos más esbeltos.

Para los modelos comprendidos en el intervalo de $0.5 < H/L < 2$, el factor de sobrerresistencia tiende a ser $R \approx 1.4$; para los modelos comprendidos en el intervalo de $2 < H/L < 3.2$, este valor tiende a ser $R \approx 1.5$. Con estos datos, podemos decir que el factor de sobrerresistencia tiende a aumentar conforme la rigidez que aporte el sistema del marco al sistema global aumenta también.

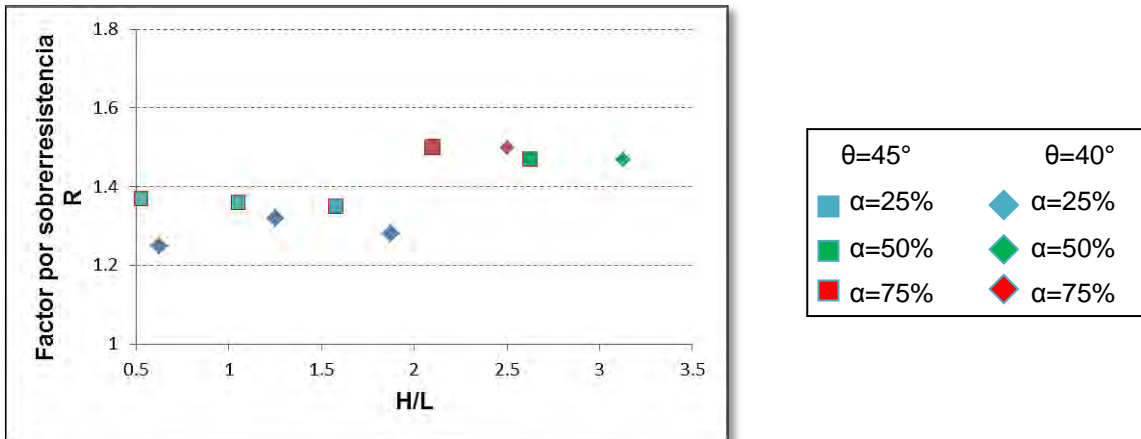


Figura 0.55 Factores de comportamiento sísmico R para balances de rigideces óptimos

CONCLUSIONES

En este estudio paramétrico se estudió el comportamiento de estructuras con disipadores hysteréticos de energía, con base en marcos de concreto reforzado y contraventeo metálico de soporte para los disipadores en configuración chevrón (“V” invertida). Con la finalidad de proponer balances óptimos de rigideces entre el sistema del marco y el sistema contraviento-disipador, se realizaron análisis estáticos no lineales a los diversos modelos con variaciones en los parámetros antes mencionados y explicados a lo largo de esta investigación.

Se observó que el diseñar a los dispositivos disipadores de energía como elastoplásticos perfectos o con pendientes posteriores a la fluencia K_2 repercuten en el desempeño de éstos. Se distingue que en general, a medida que la variable K_2 aumenta, la ductilidad desarrollada por el disipador también tiende a aumentar. Sin embargo, el desempeño de los disipadores con una pendiente posterior a la fluencia de 3% ó 5%, presentan un comportamiento bastante similar.

Evaluando el balance de rigidez entre el sistema del contraviento y el del disipador de los marcos analizados, se observa que conforme el balance β disminuye, es decir, que el disipador es más flexible que el contraviento y por ello ser el fusible del sistema, la ductilidad desarrollada por los disipadores de energía tiende a aumentar.

Haciendo la comparación entre los diversos mapeos de fluencia desarrollados durante esta investigación, se observó que considerar un balance de rigidez demasiado flexible del disipador en comparación con la del contraviento de soporte ($\beta=25\%$), conlleva a la formación de posibles pisos débiles en los entrepisos donde los disipadores desarrollan las mayores ductilidades. Para la mayoría de los modelos, el balance óptimo β se limitó cuando la rigidez del disipador corresponde a la mitad de la rigidez del contraviento ($\beta=50\%$), lo anterior es consecuencia al daño presentado en vigas y columnas asociado a la magnitud de las rotaciones plásticas presentadas, como se explicó anteriormente.

Además, de los mapeos de fluencia se aprecia que en la mayoría de los modelos evaluados, los disipadores del último nivel de entrepiso no desarrollan ductilidad alguna, es decir, permanecen elásticos, por lo que colocarlos en el último nivel es una pérdida en la inversión económica, ya que estos disipadores no trabajan. En contraparte, para los modelos esbeltos (20 y 25 niveles), los disipadores de los primeros niveles desarrollan ductilidades menores a 6.0.

Haciendo una comparativa entre los mapeos de fluencia y las ductilidades μ_d desarrolladas por los disipadores, se eligieron los balances óptimos de rigideces entre el sistema del marco y el sistema contraviento-disipador. Se observó que a medida que los modelos son más esbeltos, el sistema del marco necesita aportar mayor rigidez al sistema global.

Para los modelos de pequeña y mediana altura (5, 10 y 15 niveles) se encontró que el balance óptimo es aquél cuando el sistema contraviento-disipador aporta la mayor rigidez al sistema global ($\alpha=25\%$). Para los modelos de 20 niveles, el balance óptimo fue cuando el sistema del marco aportó mayor rigidez al sistema global ($\alpha=75\%$), esto se debe en gran medida a que la carga axial de los contravientos de soporte transmitidas a las columnas eran de magnitudes considerables, por lo que el sistema del marco debía aportar mayor resistencia y rigidez al sistema global y así mitigar los efectos causados por los desplazamientos de los disipadores al sistema del marco.

Para los modelos más esbeltos (25 niveles) se distingue una particularidad que es importante comentar. El usar un balance donde el sistema contraviento-disipador aportará mayor rigidez al sistema global, hacía que los disipadores desarrollaran ductilidades superiores, pero tenía como consecuencia la formación de varios pisos débiles, incluso donde los disipadores no desarrollaban su máxima capacidad. El elegir un balance de rigidez donde el sistema del marco aportará la mayor rigidez posible limitaba las rotaciones plásticas de las columnas, pero los disipadores no desarrollaban las ductilidades óptimas para un buen desempeño. Es por esto que para estos niveles el balance óptimo fue cuando el aporte de rigidez entre el sistema contraviento-disipador y el sistema del marco fue equitativa ($\alpha=50\%$).

Cuando se evaluaron las curvas cortante normalizado-distorsión de los modelos con los balances óptimos seleccionados, se observó que las curvas globales para los modelos de 5, 10 y 20 niveles eran representativas del balance α elegido. De manera contraria, para los modelos de 15 y 25 niveles éstas graficas no eran representativas de esos balances. Evaluando detalladamente las curvas cortante normalizado-distorsión para cada nivel de entrepiso, se observó que en algunos niveles de entrepiso se presentaban diferencias entre el balance α de diseño y el desarrollado por los sistemas por separado. Estas diferencias se presentaban en el primer nivel de entrepiso por la condición de empotramiento perfecto teórica, que rara vez se logra en la vida real, y en los últimos niveles de entrepiso donde el comportamiento global y por separado de los sistemas permanecía elástico.

Analizando las envolventes de distorsiones de entrepiso se observó que los máximos valores se alcanzaron en los niveles de entrepiso donde los disipadores desarrollaron las mayores ductilidades. Se observa además que los valores de las distorsiones asociadas al estado límite de servicio para la mayoría de los modelos se encuentra en el intervalo entre 0.15% y 0.20% principalmente. Es importante distinguir que contrariamente a lo que muchos ingenieros piensan, la curva envolvente de distorsión asociado al estado límite de servicio (Δ_y), no siempre es representativa a la envolvente de distorsión última asociada al desempeño óptimo de los disipadores (Δ_u).

Como era de esperarse, al comparar los datos obtenidos de los análisis estáticos no lineales ante carga monótona creciente, el factor de comportamiento sísmico Q , tiende a disminuir conforme el número de niveles aumenta y por ende, el balance entre el sistema del marco y el del contraviento-disipador (α). De forma contraria, se observó que conforme el balance α aumenta los modelos tienden a desarrollar mayor sobrerresistencia, debido al efecto de sobrediseñar a las columnas por efecto de las cargas axiales de los contravientos transmitidas al sistema del marco.

Cabe destacar que esta investigación recabó numerosos datos debido a la variación de gran cantidad de parámetros, y aunado a las comparaciones hechas entre diversas gráficas tanto a nivel elemento (ductilidades desarrolladas por los disipadores de energía y curvas cortante normalizado-distorsión de entrepiso), como a nivel global de la estructura (mapeos de fluencia, curvas cortante normalizado-distorsión global y envolventes de distorsiones), ofreció una gran cantidad de resultados que permitieron elegir los balances óptimos de rigideces antes mencionados.

Aunque este estudio paramétrico fue extenso, aún quedan muchas variables por estudiar. Por ejemplo, en la actual investigación se diseñó al sistema del marco como “**no dúctiles**”, pero respetando la filosofía de diseño viga débil y columna fuerte. Lo anterior tiene sus bases en la idea errónea de diseño que muchos ingenieros tienen de las estructuras con disipadores de energía. Se ha llegado a pensar, en una estructura con este tipo de tecnología, que cuando los disipadores de energía desarrollan las ductilidades objetivos, el trabajo inelástico la desarrollan exclusivamente los disipadores de energía sin ninguna consecuencia al sistema del marco.

En esta investigación se demostró que el diseñar al sistema del marco como no dúctil, tiende a desarrollar posibles pisos débiles debido a las magnitudes de las rotaciones plásticas desarrolladas en las columnas de los entrepisos donde los

disipadores desarrollan mayores ductilidades. Sería importante en un futuro no muy lejano continuar con esta investigación considerando los requisitos de confinamiento para marcos dúctiles para los elementos que conforman el sistema del marco. También sería recomendable evaluar si limitando Q a un valor menor (por ejemplo, $Q=4$), se logra que sólo trabajen los disipadores, a pesar de que los elementos del marco se diseñen y detallen como no dúctiles.

Además, sería de gran utilidad el realizar análisis dinámicos paso a paso, bajo una previa selección de registros de aceleración asociados al espectro de diseño sísmico, para evaluar el desempeño de las estructuras con disipadores de energía y compararlas con los análisis estáticos no lineales.

REFERENCIAS

- Aguirre, M. y Sánchez, R. (1992), "Structural seismic damper", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 5, pp. 1158-1171.
- Aiken, I., Nims, D., Whittaker, A. y Kelly, J. (1993), "Testing of passive energy dissipation systems", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 335 -369
- Aiken, I. (2006), "Energy dissipation devices", *Memorias, Eighth US National Conference on Earthquake Engineering (8NCEE), San Francisco, California, CD-ROM, abril.*
- Amateco, T., Escobar, J. A. y Dyer, J. (2004), "Modelo histerético de materiales con deterioro de rigidez y resistencia", *Memorias, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, CDROM, noviembre.*
- Arroyo, D. y Terán A. (2002), "Factores de reducción de fuerzas sísmicas para el diseño de estructuras con sistemas pasivos de disipación de energía", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 66, pp. 73-93.*
- Arroyo, D., Terán, A., Gama, E. y Guerrero, J. (2009) "Estudio experimental de contravientos restringidos contra pandeo: desarrollo conceptual y detalles de implementación", *Reporte UAM-A/DMAE-2009/04, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, diciembre.*
- Bazán, T. E y Meli, R. (1999), **Diseño sísmico de edificios**, primera edición, Limusa. Mééxico.
- Bertero V. V. (2002), "Perspectivas actuales y futuras en cuanto al uso del diseño por desempeño en los estados unidos", *Memorias, VII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica: Diseño por Desempeño, Cuernavaca, Morelos, CDROM.*
- CSI-2005 (2005), "CSI analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, octubre.
- Esteva, L., Ruiz, S. y Rivera, J. (2005), "Reliability- and performance-based seismic design of structures with energy-dissipating devices", *Memorias, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Control of Structures, Kobe, Japon, CD-ROM, Junio, pp. 489-505.*
- Godínez, E. (2010), Estudio del comportamiento de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo concéntrico. Tesis de Doctorado, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.
- Gómez, S. I. (2007), **Análisis sísmico moderno**, primera edición, Trillas, México.
- González, O. y Robles F. (2005), Aspectos fundamentales del concreto reforzado, cuarta edición, Limusa, México.
- González, R. (1990), "Respuesta de estructuras provistas de dispositivos externos de disipación de energía tipo solera", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 40, pp. 47-74.*

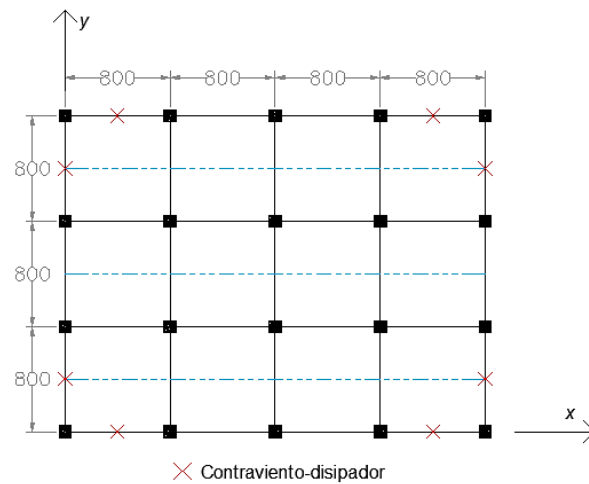
- Granados, R., Rodríguez, R. y Cesín, M. (2006), **Edificios altos construidos en México**, primera edición, IMCYC, México.
- Hamburguer, R. (2000), “Seismic rehabilitation of concrete structures”, *International publication series*, 2nd printing, Tokyo, Japon.
- Hernández, O., M. A. Montiel, S. E. Ruiz, O. de Buen and J. L. Sánchez (2004), “Conveniencia de usar disipadores de energía en vez de contravientos en edificios con periodo fundamental largo”, *Memorias, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Acapulco, CDROM, noviembre.
- Housner, G.-W., Bergman, L.-A., Caughey, T.-K., Chassiakos. A.-G., Claus, R.-O., Masri. S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer, B. F. y Yao, T. P. (1997), “Structural control: past, present, and future”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 9, pp. 897–971.
- Jara, J. M. (1994), “Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores”, *Revista de ingeniería sísmica, SMIS*, No. 47, pp. 35-79.
- Martinez-Romero, E. (1993), “Experiences on the use of supplementary energy dissipators on buildings structures”, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 581-625.
- Martinez, E. y Méndez, C. (2004), “Experiencia mexicana en la rehabilitación de estructuras con disipadores pasivos de energía”, *Memorias, VIII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica: Rehabilitación sísmica de estructuras*, Tlaxcala, Tlaxcala, CDROM.
- Meli, R. (2002), **Diseño estructural**, segunda edición, Limusa, México.
- Montiel, M. A. and S. E. Ruiz (2006a), “Seismic design method for reliability-based rehabilitation of buildings”, *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 1, pp. 189-214.
- NTCC-04 (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II*, No. 103-BIS, octubre.
- NTCEM-04 (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras Metálicas”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II*, No. 103-BIS, octubre.
- NTCS-04 (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II*, No. 103-BIS, octubre
- Pall, R., Pasquin, C., Leboeuf, N. y Pall, A. (2004), “Friction-dampers for seismic rehabilitation of Eaton’s building, Montreal”, *Memorias, Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper No. 1949, CDROM.
- Prakash, V., Powell, G. H. y Phillipou F. C. (1992), “DRAIN-2DX: base program user guide”, *Report No. UBC/SEMM-92/29*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.

- Ruiz, E., Mejía R. y Ruiz S. E. (1996), "Análisis comparativo de dos marcos: uno diseñado convencionalmente y otro con dispositivos TADAS", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 53, pp. 37-48.
- Ruiz, S.E. (2002), "Algunas recomendaciones para el diseño de edificios con disipadores de energía", *Memorias, VII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica: Diseño por Desempeño*, Cuernavaca, Morelos, CDROM.
- Silva, F., y Ruiz S. E. (1994), "Comparación de la respuesta sísmica de marcos con dispositivos disipadores de energía y sin ellos", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 48, pp. 23-40.
- Soong, T. T. y Spencer, B.F. (2002), "Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and State-of-the-practice," *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 243-259.
- Tanaka, K., y Sasaki, Y. (2000), "Hysteretic performance of shear panel dampers of ultra low-yield-strength steel for seismic response control of buildings", *Memorias, 12th World Conference of Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, CDROM.
- Tarpy, C. (2005), "A 200 años de Trafalgar", *National Geographic en español*, Vol. 17, No. 04.
- Tena-Colunga, A. (1997), "Mathematical modelling of the ADAS energy dissipation device", *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 10, pp. 811-821.
- Tena, A. (2000), "Modelado analítico de edificios con disipadores de energía", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 62, pp. 29-62.
- Tena-Colunga, A (2002), "Some aspects on the analytical modelling of metallic energy dissipation devices", *Memorias, 12th European Conference on Earthquake Engineering*, Londres, Inglaterra, Artículo No. 060, CD-ROM.
- Tena, A. (2003), "Disipación pasiva de energía en México: un estado del arte", *Memorias, VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Barquisimeto, Venezuela, CD-ROM, noviembre
- Tena-Colunga, A. (2007), "State of the Art and State of the Practice for energy dissipation and seismic isolation of structures in Mexico", *Memorias, 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Estambul, Turquía, CD-ROM, mayo.
- Tena, A. (2010), *Notas de la clase Diseño Sismorresistente*, Posgrado en Ingeniería Estructural, UAM-Azcapotzalco, Trimestre 10-P, México, D.F.
- Tena, A (2011), *Notas de la clase Sistemas de control de la respuesta sísmica*, Posgrado en Ingeniería Estructural, UAM-Azcapotzalco, Trimestre 11-I, México, D.F.
- Terán, A. y Virto, N. (2006), "Diseño basado en desplazamientos de edificaciones bajas rigidizadas con contravientos desadheridos", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 80, pp. 1-29.

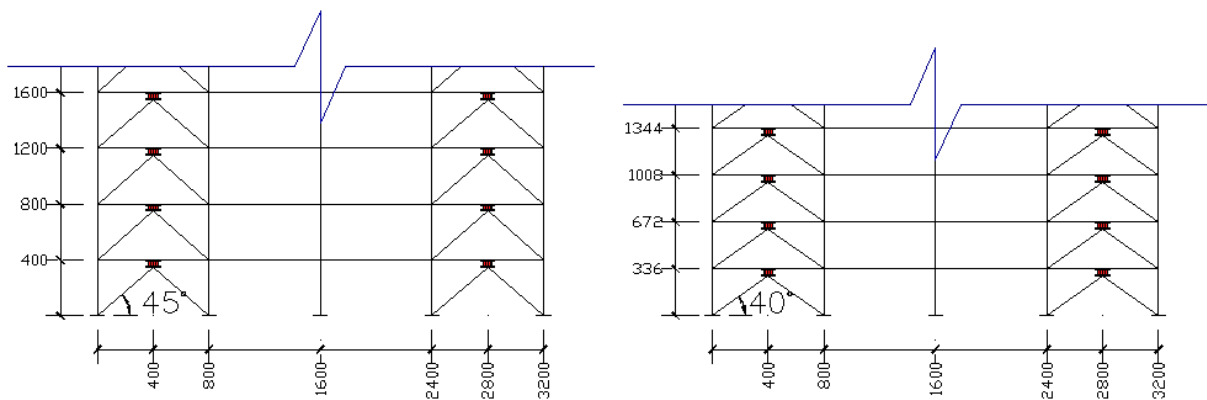
- Torres, M. y Ruiz, S. E. (2004), "Design algorithm based on probabilistic seismic demands for buildings rehabilitated with hysteretic energy-dissipating devices", *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 2, pp. 503-521.
- Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong C.-P., y Su Y-F. (1993), "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 505-528.
- Vargas, R., y Bruneau M. (2009), "Analytical Response and Design of Buildings with Metallic Structural Fuses. I", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 4, pp. 386–393.
- Wallace, J., y Moehle, J. (1989), "BIAX: A computer program for the analysis reinforced concrete sections", *Report No. UCB/SEMM-89/12*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
- Watabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A. y Fujimoto, M. (1988). "Properties of brace encased in buckling restrained concrete and steel tube", *Memorias, Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol IV, pp 719-724
- Whittaker, A., Bertero, V., Thompson, C. y Alonso, J. (1989), "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", *Reporte UCB/EERC-89/02*, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- Whittaker, A., Constantinou, M. y Sigaher, N. (1999), "Supplemental Damping for new and retrofit construction", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 61, pp. 1-21.

APÉNDICE A. RESUMEN DE LAS SECCIONES DE DISEÑO DE LOS MARCOS EVALUADOS

En la siguiente sección se resumen las secciones de diseño de los elementos estructurales que se utilizaron en los marcos evaluados de esta investigación. Es importante aclarar que para los contravientos de soporte se utilizaron placas para formar una sección cajón. Para los disipadores de energía se utilizó una altura para todos los modelos que fue de 50 cm, y se variaron el número de placas y el espesor de éstas con el propósito de cumplir con las especificaciones de rigideces que se usaron en esta investigación. En la figura A1 se muestra la planta y las elevaciones de los modelos que se estudiaron.



a) Planta del edificio



b) Elevaciones de los marcos perimetrales dirección X estudiados

Figura A1. Planta y elevaciones de los marcos evaluados

A1. Secciones de diseño de los modelos de cinco niveles y $\theta=40^\circ$ A1.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-3	45 x 45	22 # 6	0.0340	2 # 3 @ 15
4-5	35 x 35	14 # 6	0.0368	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-3	40 x 60	4 # 6 + 2 # 4	2 # 6	2 # 3 @ 15
4-5	35 x 50	4 # 6	2 # 4	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-2	34.29	1.27	167.74
3-5	27.94	0.95	102.82

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$ **K₂= 0.00**

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1202.10	11.63	1122.45	-1122.45	3-5
	17.91	1961.08	14.92	1440.45	-1440.45	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	901.58	11.63	1122.45	-1122.45	3-5
	17.91	1470.81	14.92	1440.45	-1440.45	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	601.05	11.63	1122.45	-1122.45	3-5
	17.91	980.54	14.92	1440.45	-1440.45	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	300.53	11.63	1122.45	-1122.45	3-5
	17.91	490.27	14.92	1440.45	-1440.45	1-2

K₂= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1202.10	11.63	883.82	-883.82	3-5
	17.91	1961.08	14.92	1134.21	-1134.21	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	901.58	11.63	883.82	-883.82	3-5
	17.91	1470.81	14.92	1134.21	-1134.21	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	601.05	11.63	883.82	-883.82	3-5
	17.91	980.54	14.92	1134.21	-1134.21	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	300.53	11.63	883.82	-883.82	3-5
	17.91	490.27	14.92	1134.21	-1134.21	1-2

K₂ = 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1202.10	11.63	774.10	-774.10	3-5
	17.91	1961.08	14.92	993.42	-993.42	1-2

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	901.58	11.63	774.10	-774.10	3-5
	17.91	1470.81	14.92	993.42	-993.42	1-2

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	601.05	11.63	774.10	-774.10	3-5
	17.91	980.54	14.92	993.42	-993.42	1-2

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	300.53	11.63	774.10	-774.10	3-5
	17.91	490.27	14.92	993.42	-993.42	1-2

A1.2. Secciones de diseño de los modelos α=50%

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-3	50 x 50	20 # 6	0.0253	2 # 3 @ 20
4-5	40 x 40	16 # 6	0.0317	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-3	40 x 60	4 # 8	4 # 6	2 # 3 @ 15
4-5	35 x 55	4 # 6	2 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A6. Diagonales de contraventeo modelo de cinco niveles $\alpha=50\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-2	19.05	0.95	68.95
3-5	17.78	0.64	43.55

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$

K₂= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	509.13	11.63	632.25	-632.25	3-5
17.88	806.12	14.90	810.18	-810.18	1-2	

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	381.84	11.63	632.25	-632.25	3-5
17.88	604.59	14.90	810.18	-810.18	1-2	

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	254.56	11.63	632.25	-632.25	3-5
17.88	403.06	14.90	810.18	-810.18	1-2	

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	127.28	11.63	632.25	-632.25	3-5
17.88	201.53	14.90	810.18	-810.18	1-2	

K₂= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	509.13	11.63	497.83	-497.83	3-5
17.88	806.12	14.90	637.93	-637.93	1-2	

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	381.84	11.63	497.83	-497.83	3-5
17.88	604.59	14.90	637.93	-637.93	1-2	

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	254.56	11.63	497.83	-497.83	3-5
17.88	403.06	14.90	637.93	-637.93	1-2	

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	127.28	11.63	497.83	-497.83	3-5
17.88	201.53	14.90	637.93	-637.93	1-2	

$K_2 = 0.05$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	509.13	11.63	436.03	-436.03	3-5
	17.88	806.12	14.90	558.74	-558.74	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	381.84	11.63	436.03	-436.03	3-5
	17.88	604.59	14.90	558.74	-558.74	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	254.56	11.63	436.03	-436.03	3-5
	17.88	403.06	14.90	558.74	-558.74	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	127.28	11.63	436.03	-436.03	3-5
	17.88	201.53	14.90	558.74	-558.74	1-2

A1.3. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=75\%$

Tabla A7. Columnas modelo de cinco niveles $\alpha=75\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-3	60 x 60	24 # 6	0.0211	2 # 3 @ 20
4-5	50 x 50	22 # 6	0.0279	2 # 3 @ 20

Tabla A8. Vigas modelo de cinco niveles $\alpha=75\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-3	40 x 60	4 # 8 + 2 # 4	3 # 8	2 # 3 @ 15
4-5	35 x 55	4 # 6 + 2 # 4	2 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 20

Tabla A9. Diagonales de contraventeo modelo de cinco niveles $\alpha=75\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-2	12.7	0.48	23.29
3-5	12.7	0.32	15.73

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$

$K_2=0.00$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	183.85	11.63	276.46	-276.46	3-5
	17.88	272.24	14.90	354.30	-354.30	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	137.89	11.63	276.46	-276.46	3-5
	17.88	204.18	14.90	354.30	-354.30	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	91.93	11.63	276.46	-276.46	3-5
	17.88	136.12	14.90	354.30	-354.30	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	45.96	11.63	276.46	-276.46	3-5
	17.88	68.06	14.90	354.30	-354.30	1-2

$K_2=0.03$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	183.85	11.63	217.68	-217.68	3-5
	17.88	272.24	14.90	278.98	-278.98	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	137.89	11.63	217.68	-217.68	3-5
	17.88	204.18	14.90	278.98	-278.98	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	91.93	11.63	217.68	-217.68	3-5
	17.88	136.12	14.90	278.98	-278.98	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	45.96	11.63	217.68	-217.68	3-5
	17.88	68.06	14.90	278.98	-278.98	1-2

$K_2 = 0.05$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	183.85	11.63	190.66	-190.66	3-5
	17.88	272.24	14.90	244.35	-244.35	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	137.89	11.63	190.66	-190.66	3-5
	17.88	204.18	14.90	244.35	-244.35	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	91.93	11.63	190.66	-190.66	3-5
	17.88	136.12	14.90	244.35	-244.35	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	45.96	11.63	190.66	-190.66	3-5
	17.88	68.06	14.90	244.35	-244.35	1-2

A2. Secciones de diseño de los modelos de 10 niveles y $\theta=40^\circ$

A2.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Tabla A10. Columnas modelo de 10 niveles $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-4	65 x 65	18 # 8	0.022	4 # 3 @ 15
5-7	55 x 55	12 # 8	0.020	2 # 3 @ 15
8-10	45 x 45	12 # 6	0.017	2 # 3 @ 20

Tabla A11. Vigas modelo de 10 niveles $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-4	50 x 70	6 # 6 + 3 # 4	6 # 6 + 2 # 4	3 # 3 @ 15
5-7	40 x 60	6 # 6 + 2 # 4	3 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 20
8-10	35 x 55	4 # 6 + 2 # 4	2 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 20

Tabla A12. Diagonales de contraventeo modelo de 10 niveles $\alpha=25\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	59.69	3.81	440.32
4-6	31.75	3.81	227.42
7-10	27.94	2.54	135.48

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$

K₂ = 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1583.95	11.63	1825.82	-1825.82	7-10
	20.83	2658.77	17.36	2726.19	-2726.19	4-6
	23.72	5147.83	19.77	3103.97	-3103.97	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1187.96	11.63	1825.82	-1825.82	7-10
	20.83	1994.08	17.36	2726.19	-2726.19	4-6
	23.72	3860.87	19.77	3103.97	-3103.97	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	791.97	11.63	1825.82	-1825.82	7-10
	20.83	1329.38	17.36	2726.19	-2726.19	4-6
	23.72	2573.92	19.77	3103.97	-3103.97	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	395.99	11.63	1825.82	-1825.82	7-10
	20.83	664.69	17.36	2726.19	-2726.19	4-6
	23.72	1286.96	19.77	3103.97	-3103.97	1-3

K₂= 0.03

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1583.95	11.63	1437.66	-1437.66	7-10
	20.83	2658.77	17.36	2146.60	-2146.60	4-6
	23.72	5147.83	19.77	2444.07	-2444.07	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1187.96	11.63	1437.66	-1437.66	7-10
	20.83	1994.08	17.36	2146.60	-2146.60	4-6
	23.72	3860.87	19.77	2444.07	-2444.07	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	791.97	11.63	1437.66	-1437.66	7-10
	20.83	1329.38	17.36	2146.60	-2146.60	4-6
	23.72	2573.92	19.77	2444.07	-2444.07	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	395.99	11.63	1437.66	-1437.66	7-10
	20.83	664.69	17.36	2146.60	-2146.60	4-6
	23.72	1286.96	19.77	2444.07	-2444.07	1-3

K₂= 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1583.95	11.63	1259.19	-1259.19	7-10
	20.83	2658.77	17.36	1880.13	-1880.13	4-6
	23.72	5147.83	19.77	2140.67	-2140.67	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1187.96	11.63	1259.19	-1259.19	7-10
	20.83	1994.08	17.36	1880.13	-1880.13	4-6
	23.72	3860.87	19.77	2140.67	-2140.67	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	791.97	11.63	1259.19	-1259.19	7-10
	20.83	1329.38	17.36	1880.13	-1880.13	4-6
	23.72	2573.92	19.77	2140.67	-2140.67	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	395.99	11.63	1259.19	-1259.19	7-10
	20.83	664.69	17.36	1880.13	-1880.13	4-6
	23.72	1286.96	19.77	2140.67	-2140.67	1-3

A2.2. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=50\%$

Tabla A13. Columnas modelo de 10 niveles $\alpha=50\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-4	65 x 65	26 # 8	0.031	2 # 3 @ 15
5-7	55 x 55	20 # 8	0.034	2 # 3 @ 20
8-10	45 x 45	24 # 6	0.036	2 # 3 @ 20

Tabla A14. Vigas modelo de 10 niveles $\alpha=50\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-4	50 x 70	6 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 4 # 4	3 # 3 @ 15
5-7	40 x 60	6 # 8 + 2 # 6	3 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 20
8-10	35 x 55	6 # 6 + 2 # 4	3 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 20

Tabla A15. Diagonales de contraventeo modelo de 10 niveles $\alpha=50\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	30.48	2.54	148.39
4-6	30.48	1.27	75.81
7-10	12.7	1.71	40.61

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$ **K₂= 0.00**

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	474.76	11.63	1014.35	-1014.35	7-10
	20.83	886.26	17.36	1514.55	-1514.55	4-6
	23.72	1734.80	19.77	1724.43	-1724.43	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	356.07	11.63	1014.35	-1014.35	7-10
	20.83	664.69	17.36	1514.55	-1514.55	4-6
	23.72	1301.10	19.77	1724.43	-1724.43	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	237.38	11.63	1014.35	-1014.35	7-10
	20.83	443.13	17.36	1514.55	-1514.55	4-6
	23.72	867.40	19.77	1724.43	-1724.43	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	118.69	11.63	1014.35	-1014.35	7-10
	20.83	221.56	17.36	1514.55	-1514.55	4-6
	23.72	433.70	19.77	1724.43	-1724.43	1-3

K₂= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	474.76	11.63	798.70	-798.70	7-10
	20.83	886.26	17.36	1192.56	-1192.56	4-6
	23.72	1734.80	19.77	1357.82	-1357.82	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	356.07	11.63	798.70	-798.70	7-10
	20.83	664.69	17.36	1192.56	-1192.56	4-6
	23.72	1301.10	19.77	1357.82	-1357.82	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	237.38	11.63	798.70	-798.70	7-10
	20.83	443.13	17.36	1192.56	-1192.56	4-6
	23.72	867.40	19.77	1357.82	-1357.82	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	118.69	11.63	798.70	-798.70	7-10
	20.83	221.56	17.36	1192.56	-1192.56	4-6
	23.72	433.70	19.77	1357.82	-1357.82	1-3

K₂ = 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	474.76	11.63	699.55	-699.55	7-10
	20.83	886.26	17.36	1044.52	-1044.52	4-6
	23.72	1734.80	19.77	1189.26	-1189.26	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	356.07	11.63	699.55	-699.55	7-10
	20.83	664.69	17.36	1044.52	-1044.52	4-6
	23.72	1301.10	19.77	1189.26	-1189.26	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	237.38	11.63	699.55	-699.55	7-10
	20.83	443.13	17.36	1044.52	-1044.52	4-6
	23.72	867.40	19.77	1189.26	-1189.26	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	118.69	11.63	699.55	-699.55	7-10
	20.83	221.56	17.36	1044.52	-1044.52	4-6
	23.72	433.70	19.77	1189.26	-1189.26	1-3

A2.3. Secciones de diseño de los modelos α=75%

Tabla A16. Columnas modelo de 10 niveles α=75%				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-4	70 x 70	32 # 8	0.033	2 # 3 @ 15
5-7	60 x 60	26 # 8	0.037	2 # 3 @ 20
8-10	50 x 50	16 # 8	0.032	2 # 3 @ 20

Tabla A17. Vigas modelo de 10 niveles α=75%				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-4	50 x 70	6 # 8 + 4 # 6	5 # 8 + 3 # 6	3 # 3 @ 15
5-7	40 x 60	6 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 20
8-10	35 x 55	7 # 6 + 2 # 4	4 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 20

Tabla A18. Diagonales de contraventeo modelo de 10 niveles $\alpha=75\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	15.24	1.91	54.44
4-6	15.24	0.95	28.12
7-10	15.24	0.64	18.95

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$

K₂ = 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	221.56	11.63	444.31	-444.31	7-10
	20.84	328.81	17.37	663.77	-663.77	4-6
	23.74	636.41	19.78	755.98	-755.98	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	166.17	11.63	444.31	-444.31	7-10
	20.84	246.61	17.37	663.77	-663.77	4-6
	23.74	477.31	19.78	755.98	-755.98	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	110.78	11.63	444.31	-444.31	7-10
	20.84	164.41	17.37	663.77	-663.77	4-6
	23.74	318.20	19.78	755.98	-755.98	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	55.39	11.63	444.31	-444.31	7-10
	20.84	82.20	17.37	663.77	-663.77	4-6
	23.74	159.10	19.78	755.98	-755.98	1-3

K₂ = 0.03

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	221.56	11.63	349.85	-349.85	7-10
	20.84	328.81	17.37	522.65	-522.65	4-6
	23.74	636.41	19.78	595.26	-595.26	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	166.17	11.63	349.85	-349.85	7-10
	20.84	246.61	17.37	522.65	-522.65	4-6
	23.74	477.31	19.78	595.26	-595.26	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	110.78	11.63	349.85	-349.85	7-10
	20.84	164.41	17.37	522.65	-522.65	4-6
	23.74	318.20	19.78	595.26	-595.26	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	55.39	11.63	349.85	-349.85	7-10
	20.84	82.20	17.37	522.65	-522.65	4-6
	23.74	159.10	19.78	595.26	-595.26	1-3

K₂ = 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	221.56	11.63	306.42	-306.42	7-10
	20.84	328.81	17.37	457.77	-457.77	4-6
	23.74	636.41	19.78	521.37	-521.37	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	166.17	11.63	306.42	-306.42	7-10
	20.84	246.61	17.37	457.77	-457.77	4-6
	23.74	477.31	19.78	521.37	-521.37	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	110.78	11.63	306.42	-306.42	7-10
	20.84	164.41	17.37	457.77	-457.77	4-6
	23.74	318.20	19.78	521.37	-521.37	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	55.39	11.63	306.42	-306.42	7-10
	20.84	82.20	17.37	457.77	-457.77	4-6
	23.74	159.10	19.78	521.37	-521.37	1-3

A3. Secciones de diseño de los modelos de 15 niveles y $\theta=40^\circ$ A3.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	80 x 80	24 # 10	0.030	4 # 4 @ 15
6-10	70 x 70	16 # 8	0.017	4 # 3 @ 15
11-15	60 x 60	16 # 6	0.013	2 # 3 @ 15

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	55 x 80	5 # 8 + 2 # 4	3 # 8 + 2 # 6	4 # 3 @ 15
6-10	50 x 70	5 # 8 + 2 # 4	3 # 8 + 2 # 4	2 # 3 @ 20
11-15	40 x 60	6 # 6	4 # 6	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	43.18	10.16	774.19
4-6	40.64	7.62	561.29
7-9	40.64	6.35	475.81
10-12	41.91	3.81	304.84
13-15	34.29	3.81	246.77

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$

K2= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2885.05	11.63	1597.44	-1597.44	13-15
	26.00	3563.88	21.66	2976.32	-2976.32	10-12
	35.17	5562.67	29.31	4026.48	-4026.48	7-9
	41.12	6562.07	34.26	4707.26	-4707.26	4-6
	43.55	9051.13	36.29	4986.09	-4986.09	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2163.79	11.63	1597.44	-1597.44	13-15
	26.00	2672.91	21.66	2976.32	-2976.32	10-12
	35.17	4172.01	29.31	4026.48	-4026.48	7-9
	41.12	4921.55	34.26	4707.26	-4707.26	4-6
	43.55	6788.35	36.29	4986.09	-4986.09	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1442.52	11.63	1597.44	-1597.44	13-15
	26.00	1781.94	21.66	2976.32	-2976.32	10-12
	35.17	2781.34	29.31	4026.48	-4026.48	7-9
	41.12	3281.04	34.26	4707.26	-4707.26	4-6
	43.55	4525.57	36.29	4986.09	-4986.09	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	721.26	11.63	1597.44	-1597.44	13-15
	26.00	890.97	21.66	2976.32	-2976.32	10-12
	35.17	1390.67	29.31	4026.48	-4026.48	7-9
	41.12	1640.52	34.26	4707.26	-4707.26	4-6
	43.55	2262.78	36.29	4986.09	-4986.09	1-3

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2885.05	11.63	1257.82	-1257.82	13-15
	26.00	3563.88	21.66	2343.56	-2343.56	10-12
	35.17	5562.67	29.31	3170.45	-3170.45	7-9
	41.12	6562.07	34.26	3706.51	-3706.51	4-6
	43.55	9051.13	36.29	3926.06	-3926.06	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2163.79	11.63	1257.82	-1257.82	13-15
	26.00	2672.91	21.66	2343.56	-2343.56	10-12
	35.17	4172.01	29.31	3170.45	-3170.45	7-9
	41.12	4921.55	34.26	3706.51	-3706.51	4-6
	43.55	6788.35	36.29	3926.06	-3926.06	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1442.52	11.63	1257.82	-1257.82	13-15
	26.00	1781.94	21.66	2343.56	-2343.56	10-12
	35.17	2781.34	29.31	3170.45	-3170.45	7-9
	41.12	3281.04	34.26	3706.51	-3706.51	4-6
	43.55	4525.57	36.29	3926.06	-3926.06	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	721.26	11.63	1257.82	-1257.82	13-15
	26.00	890.97	21.66	2343.56	-2343.56	10-12
	35.17	1390.67	29.31	3170.45	-3170.45	7-9
	41.12	1640.52	34.26	3706.51	-3706.51	4-6
	43.55	2262.78	36.29	3926.06	-3926.06	1-3

K₂ = 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2885.05	11.63	1101.68	-1101.68	13-15
	26.00	3563.88	21.66	2052.63	-2052.63	10-12
	35.17	5562.67	29.31	2776.88	-2776.88	7-9
	41.12	6562.07	34.26	3246.39	-3246.39	4-6
	43.55	9051.13	36.29	3438.69	-3438.69	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2163.79	11.63	1101.68	-1101.68	13-15
	26.00	2672.91	21.66	2052.63	-2052.63	10-12
	35.17	4172.01	29.31	2776.88	-2776.88	7-9
	41.12	4921.55	34.26	3246.39	-3246.39	4-6
	43.55	6788.35	36.29	3438.69	-3438.69	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1442.52	11.63	1101.68	-1101.68	13-15
	26.00	1781.94	21.66	2052.63	-2052.63	10-12
	35.17	2781.34	29.31	2776.88	-2776.88	7-9
	41.12	3281.04	34.26	3246.39	-3246.39	4-6
	43.55	4525.57	36.29	3438.69	-3438.69	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	721.26	11.63	1101.68	-1101.68	13-15
	26.00	890.97	21.66	2052.63	-2052.63	10-12
	35.17	1390.67	29.31	2776.88	-2776.88	7-9
	41.12	1640.52	34.26	3246.39	-3246.39	4-6
	43.55	2262.78	36.29	3438.69	-3438.69	1-3

A3.2. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=50\%$

Tabla A22. Columnas modelo de 15 niveles $\alpha=50\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	80 x 80	24 # 10	0.030	4 # 4 @ 15
6-10	70 x 70	22 # 10	0.036	4 # 3 @ 15
11-15	60 x 60	16 # 8	0.023	2 # 3 @ 20

Tabla A23. Vigas modelo de 15 niveles $\alpha=50\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	55 x 80	6 # 10 + 2 # 6	4 # 10 + 3 # 6	4 # 3 @ 15
6-10	50 x 70	6 # 8 + 4 # 6	5 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 20
11-15	40 x 60	6 # 8	4 # 8	2 # 3 @ 20

Tabla A24. Diagonales de contraventeo modelo de 15 niveles $\alpha=50\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	43.18	3.18	264.11
4-6	38.10	2.54	187.10
7-9	33.02	2.54	161.29
10-12	27.94	1.91	102.82
13-15	22.86	1.91	83.47

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$ **K2= 0.00**

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	975.83	11.63	887.46	-887.46	13-15
	26.00	1202.10	21.66	1653.51	-1653.51	10-12
	35.17	1885.65	29.31	2236.93	-2236.93	7-9
	41.12	2187.36	34.26	2615.15	-2615.15	4-6
	43.55	3087.76	36.29	2770.05	-2770.05	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	731.87	11.63	887.46	-887.46	13-15
	26.00	901.58	21.66	1653.51	-1653.51	10-12
	35.17	1414.24	29.31	2236.93	-2236.93	7-9
	41.12	1640.52	34.26	2615.15	-2615.15	4-6
	43.55	2315.82	36.29	2770.05	-2770.05	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	487.91	11.63	887.46	-887.46	13-15
	26.00	601.05	21.66	1653.51	-1653.51	10-12
	35.17	942.83	29.31	2236.93	-2236.93	7-9
	41.12	1093.68	34.26	2615.15	-2615.15	4-6
	43.55	1543.88	36.29	2770.05	-2770.05	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	243.96	11.63	887.46	-887.46	13-15
	26.00	300.53	21.66	1653.51	-1653.51	10-12
	35.17	471.41	29.31	2236.93	-2236.93	7-9
	41.12	546.84	34.26	2615.15	-2615.15	4-6
	43.55	771.94	36.29	2770.05	-2770.05	1-3

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	975.83	11.63	698.79	-698.79	13-15
	26.00	1202.10	21.66	1301.98	-1301.98	10-12
	35.17	1885.65	29.31	1761.36	-1761.36	7-9
	41.12	2187.36	34.26	2059.17	-2059.17	4-6
	43.55	3087.76	36.29	2181.14	-2181.14	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	731.87	11.63	698.79	-698.79	13-15
	26.00	901.58	21.66	1301.98	-1301.98	10-12
	35.17	1414.24	29.31	1761.36	-1761.36	7-9
	41.12	1640.52	34.26	2059.17	-2059.17	4-6
	43.55	2315.82	36.29	2181.14	-2181.14	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	487.91	11.63	698.79	-698.79	13-15
	26.00	601.05	21.66	1301.98	-1301.98	10-12
	35.17	942.83	29.31	1761.36	-1761.36	7-9
	41.12	1093.68	34.26	2059.17	-2059.17	4-6
	43.55	1543.88	36.29	2181.14	-2181.14	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	243.96	11.63	698.79	-698.79	13-15
	26.00	300.53	21.66	1301.98	-1301.98	10-12
	35.17	471.41	29.31	1761.36	-1761.36	7-9
	41.12	546.84	34.26	2059.17	-2059.17	4-6
	43.55	771.94	36.29	2181.14	-2181.14	1-3

K₂ = 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	975.83	11.63	612.04	-612.04	13-15
	26.00	1202.10	21.66	1140.35	-1140.35	10-12
	35.17	1885.65	29.31	1542.71	-1542.71	7-9
	41.12	2187.36	34.26	1803.55	-1803.55	4-6
	43.55	3087.76	36.29	1910.38	-1910.38	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	731.87	11.63	612.04	-612.04	13-15
	26.00	901.58	21.66	1140.35	-1140.35	10-12
	35.17	1414.24	29.31	1542.71	-1542.71	7-9
	41.12	1640.52	34.26	1803.55	-1803.55	4-6
	43.55	2315.82	36.29	1910.38	-1910.38	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	487.91	11.63	612.04	-612.04	13-15
	26.00	601.05	21.66	1140.35	-1140.35	10-12
	35.17	942.83	29.31	1542.71	-1542.71	7-9
	41.12	1093.68	34.26	1803.55	-1803.55	4-6
	43.55	1543.88	36.29	1910.38	-1910.38	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	243.96	11.63	612.04	-612.04	13-15
	26.00	300.53	21.66	1140.35	-1140.35	10-12
	35.17	471.41	29.31	1542.71	-1542.71	7-9
	41.12	546.84	34.26	1803.55	-1803.55	4-6
	43.55	771.94	36.29	1910.38	-1910.38	1-3

A3.3. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=75\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	85 x 85	28 # 10	0.031	4 # 3 @ 15
6-10	75 x 75	20 # 10	0.028	4 # 3 @ 15
11-15	65 x 65	20 # 8	0.024	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	55 x 80	6 # 10 + 2 # 8	5 # 10 + 2 # 6	4 # 3 @ 15
6-10	50 x 70	8 # 8 + 3 # 6	7 # 8 + 3 # 4	3 # 3 @ 20
11-15	40 x 60	6 # 8 + 2 # 4	4 # 8 + 3 # 4	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	36.83	1.27	91.94
4-6	27.94	1.27	69.35
7-9	22.86	1.27	56.45
10-12	20.32	0.95	37.80
13-15	15.24	0.95	28.12

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$ **K2= 0.00**

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	328.81	11.63	377.08	-377.08	13-15
	25.96	441.95	21.63	701.55	-701.55	10-12
	35.03	659.98	29.19	946.65	-946.65	7-9
	40.94	810.83	34.12	1106.46	-1106.46	4-6
	43.37	1074.82	36.14	1172.14	-1172.14	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	246.61	11.63	377.08	-377.08	13-15
	25.96	331.46	21.63	701.55	-701.55	10-12
	35.03	494.98	29.19	946.65	-946.65	7-9
	40.94	608.12	34.12	1106.46	-1106.46	4-6
	43.37	806.12	36.14	1172.14	-1172.14	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	164.41	11.63	377.08	-377.08	13-15
	25.96	220.97	21.63	701.55	-701.55	10-12
	35.03	329.99	29.19	946.65	-946.65	7-9
	40.94	405.42	34.12	1106.46	-1106.46	4-6
	43.37	537.41	36.14	1172.14	-1172.14	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	82.20	11.63	377.08	-377.08	13-15
	25.96	110.49	21.63	701.55	-701.55	10-12
	35.03	164.99	29.19	946.65	-946.65	7-9
	40.94	202.71	34.12	1106.46	-1106.46	4-6
	43.37	268.71	36.14	1172.14	-1172.14	1-3

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	328.81	11.63	296.92	-296.92	13-15
	25.96	441.95	21.63	552.40	-552.40	10-12
	35.03	659.98	29.19	745.40	-745.40	7-9
	40.94	810.83	34.12	871.23	-871.23	4-6
	43.37	1074.82	36.14	922.95	-922.95	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	246.61	11.63	296.92	-296.92	13-15
	25.96	331.46	21.63	552.40	-552.40	10-12
	35.03	494.98	29.19	745.40	-745.40	7-9
	40.94	608.12	34.12	871.23	-871.23	4-6
	43.37	806.12	36.14	922.95	-922.95	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	164.41	11.63	296.92	-296.92	13-15
	25.96	220.97	21.63	552.40	-552.40	10-12
	35.03	329.99	29.19	745.40	-745.40	7-9
	40.94	405.42	34.12	871.23	-871.23	4-6
	43.37	537.41	36.14	922.95	-922.95	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	82.20	11.63	296.92	-296.92	13-15
	25.96	110.49	21.63	552.40	-552.40	10-12
	35.03	164.99	29.19	745.40	-745.40	7-9
	40.94	202.71	34.12	871.23	-871.23	4-6
	43.37	268.71	36.14	922.95	-922.95	1-3

K2= 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	328.81	11.63	260.06	-260.06	13-15
	25.96	441.95	21.63	483.82	-483.82	10-12
	35.03	659.98	29.19	652.87	-652.87	7-9
	40.94	810.83	34.12	763.07	-763.07	4-6
	43.37	1074.82	36.14	808.37	-808.37	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	246.61	11.63	260.06	-260.06	13-15
	25.96	331.46	21.63	483.82	-483.82	10-12
	35.03	494.98	29.19	652.87	-652.87	7-9
	40.94	608.12	34.12	763.07	-763.07	4-6
	43.37	806.12	36.14	808.37	-808.37	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	164.41	11.63	260.06	-260.06	13-15
	25.96	220.97	21.63	483.82	-483.82	10-12
	35.03	329.99	29.19	652.87	-652.87	7-9
	40.94	405.42	34.12	763.07	-763.07	4-6
	43.37	537.41	36.14	808.37	-808.37	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	82.20	11.63	260.06	-260.06	13-15
	25.96	110.49	21.63	483.82	-483.82	10-12
	35.03	164.99	29.19	652.87	-652.87	7-9
	40.94	202.71	34.12	763.07	-763.07	4-6
	43.37	268.71	36.14	808.37	-808.37	1-3

A4. Secciones de diseño de los modelos de 20 niveles y $\theta=40^\circ$ A4.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	105 x 105	32 # 12	0.033	6 # 4 @ 15
6-10	95 x 95	24 # 10	0.021	4 # 4 @ 15
11-15	85 x 85	16 # 8	0.011	4 # 3 @ 15
16-20	75 x 75	12 # 8	0.011	2 # 3 @ 15

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	70 x 95	7 # 8 + 3 # 4	4 # 8 + 3 # 6	4 # 4 @ 15
6-10	60 x 85	7 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 2 # 6	4 # 3 @ 15
11-15	50 x 70	5 # 8 + 2 # 6	3 # 8 + 2 # 6	3 # 3 @ 20
16-20	40 x 60	3 # 8 + 2 # 6	3 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	66.04	15.24	1780.64
5-8	63.50	12.70	1451.61
9-12	58.42	10.16	1083.87
13-16	38.10	7.62	522.58
17-20	29.21	5.08	270.97

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$ **K2= 0.00**

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3167.90	11.63	2313.60	-2313.60	17-20
	26.08	6109.51	21.74	4325.22	-4325.22	13-16
	35.40	12671.58	29.50	5870.36	-5870.36	9-12
	41.54	13365.20	34.62	6888.69	-6888.69	5-8
	44.06	20817.60	36.72	7306.41	-7306.41	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2375.92	11.63	2313.60	-2313.60	17-20
	26.08	4582.14	21.74	4325.22	-4325.22	13-16
	35.40	9503.69	29.50	5870.36	-5870.36	9-12
	41.54	10023.90	34.62	6888.69	-6888.69	5-8
	44.06	15613.20	36.72	7306.41	-7306.41	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1583.95	11.63	2313.60	-2313.60	17-20
	26.08	3054.76	21.74	4325.22	-4325.22	13-16
	35.40	6335.79	29.50	5870.36	-5870.36	9-12
	41.54	6682.60	34.62	6888.69	-6888.69	5-8
	44.06	10408.80	36.72	7306.41	-7306.41	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	791.97	11.63	2313.60	-2313.60	17-20
	26.08	1527.38	21.74	4325.22	-4325.22	13-16
	35.40	3167.90	29.50	5870.36	-5870.36	9-12
	41.54	3341.30	34.62	6888.69	-6888.69	5-8
	44.06	5204.40	36.72	7306.41	-7306.41	1-4

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3167.90	11.63	1821.74	-1821.74	17-20
	26.08	6109.51	21.74	3405.68	-3405.68	13-16
	35.40	12671.58	29.50	4622.33	-4622.33	9-12
	41.54	13365.20	34.62	5424.17	-5424.17	5-8
	44.06	20817.60	36.72	5753.08	-5753.08	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2375.92	11.63	1821.74	-1821.74	17-20
	26.08	4582.14	21.74	3405.68	-3405.68	13-16
	35.40	9503.69	29.50	4622.33	-4622.33	9-12
	41.54	10023.90	34.62	5424.17	-5424.17	5-8
	44.06	15613.20	36.72	5753.08	-5753.08	1-4

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1583.95	11.63	1821.74	-1821.74	17-20
	26.08	3054.76	21.74	3405.68	-3405.68	13-16
	35.40	6335.79	29.50	4622.33	-4622.33	9-12
	41.54	6682.60	34.62	5424.17	-5424.17	5-8
	44.06	10408.80	36.72	5753.08	-5753.08	1-4

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	791.97	11.63	1821.74	-1821.74	17-20
	26.08	1527.38	21.74	3405.68	-3405.68	13-16
	35.40	3167.90	29.50	4622.33	-4622.33	9-12
	41.54	3341.30	34.62	5424.17	-5424.17	5-8
	44.06	5204.40	36.72	5753.08	-5753.08	1-4

K2= 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3167.90	11.63	1595.59	-1595.59	17-20
	26.08	6109.51	21.74	2982.91	-2982.91	13-16
	35.40	12671.58	29.50	4048.52	-4048.52	9-12
	41.54	13365.20	34.62	4750.82	-4750.82	5-8
	44.06	20817.60	36.72	5038.90	-5038.90	1-4

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2375.92	11.63	1595.59	-1595.59	17-20
	26.08	4582.14	21.74	2982.91	-2982.91	13-16
	35.40	9503.69	29.50	4048.52	-4048.52	9-12
	41.54	10023.90	34.62	4750.82	-4750.82	5-8
	44.06	15613.20	36.72	5038.90	-5038.90	1-4

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1583.95	11.63	1595.59	-1595.59	17-20
	26.08	3054.76	21.74	2982.91	-2982.91	13-16
	35.40	6335.79	29.50	4048.52	-4048.52	9-12
	41.54	6682.60	34.62	4750.82	-4750.82	5-8
	44.06	10408.80	36.72	5038.90	-5038.90	1-4

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	791.97	11.63	1595.59	-1595.59	17-20
	26.08	1527.38	21.74	2982.91	-2982.91	13-16
	35.40	3167.90	29.50	4048.52	-4048.52	9-12
	41.54	3341.30	34.62	4750.82	-4750.82	5-8
	44.06	5204.40	36.72	5038.90	-5038.90	1-4

A4.2. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=50\%$

Tabla A31. Columnas modelo de 20 niveles $\alpha=50\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	105 x 105	32 # 12	0.033	6 # 4 @ 15
6-10	95 x 95	24 # 10	0.021	4 # 4 @ 15
11-15	85 x 85	16 # 8	0.011	4 # 3 @ 15
16-20	75 x 75	12 # 8	0.011	2 # 3 @ 20

Tabla A32. Vigas modelo de 20 niveles $\alpha=50\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	70 x 95	6 # 10 + 3 # 8	4 # 10 + 3 # 8	4 # 3 @ 15
6-10	60 x 85	6 # 10 + 2 # 8	5 # 10 + 2 # 6	4 # 3 @ 15
11-15	50 x 70	5 # 10 + 3 # 6	4 # 10 + 2 # 6	3 # 3 @ 20
16-20	40 x 60	5 # 8 + 2 # 6	3 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A33. Diagonales de contraventeo modelo de 20 niveles $\alpha=50\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	55.88	7.62	793.55
5-8	43.18	6.67	531.35
9-12	43.18	5.72	460.89
13-16	35.56	3.18	215.73
17-20	30.48	1.91	112.50

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$

K2= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1315.24	11.63	1267.57	-1267.57	17-20
	26.09	2522.06	21.74	2369.82	-2369.82	13-16
	35.40	5388.25	29.50	3216.13	-3216.13	9-12
	41.54	6212.05	34.62	3773.74	-3773.74	5-8
	44.06	9277.41	36.71	4002.42	-4002.42	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	986.43	11.63	1267.57	-1267.57	17-20
	26.09	1891.55	21.74	2369.82	-2369.82	13-16
	35.40	4041.19	29.50	3216.13	-3216.13	9-12
	41.54	4659.03	34.62	3773.74	-3773.74	5-8
	44.06	6958.06	36.71	4002.42	-4002.42	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	657.62	11.63	1267.57	-1267.57	17-20
	26.09	1261.03	21.74	2369.82	-2369.82	13-16
	35.40	2694.13	29.50	3216.13	-3216.13	9-12
	41.54	3106.02	34.62	3773.74	-3773.74	5-8
	44.06	4638.70	36.71	4002.42	-4002.42	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	328.81	11.63	1267.57	-1267.57	17-20
	26.09	630.52	21.74	2369.82	-2369.82	13-16
	35.40	1347.06	29.50	3216.13	-3216.13	9-12
	41.54	1553.01	34.62	3773.74	-3773.74	5-8
	44.06	2319.35	36.71	4002.42	-4002.42	1-4

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1315.24	11.63	998.09	-998.09	17-20
	26.09	2522.06	21.74	1866.00	-1866.00	13-16
	35.40	5388.25	29.50	2532.38	-2532.38	9-12
	41.54	6212.05	34.62	2971.45	-2971.45	5-8
	44.06	9277.41	36.71	3151.51	-3151.51	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	986.43	11.63	998.09	-998.09	17-20
	26.09	1891.55	21.74	1866.00	-1866.00	13-16
	35.40	4041.19	29.50	2532.38	-2532.38	9-12
	41.54	4659.03	34.62	2971.45	-2971.45	5-8
	44.06	6958.06	36.71	3151.51	-3151.51	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	657.62	11.63	998.09	-998.09	17-20
	26.09	1261.03	21.74	1866.00	-1866.00	13-16
	35.40	2694.13	29.50	2532.38	-2532.38	9-12
	41.54	3106.02	34.62	2971.45	-2971.45	5-8
	44.06	4638.70	36.71	3151.51	-3151.51	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	328.81	11.63	998.09	-998.09	17-20
	26.09	630.52	21.74	1866.00	-1866.00	13-16
	35.40	1347.06	29.50	2532.38	-2532.38	9-12
	41.54	1553.01	34.62	2971.45	-2971.45	5-8
	44.06	2319.35	36.71	3151.51	-3151.51	1-4

K₂ = 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1315.24	11.63	874.19	-874.19	17-20
	26.09	2522.06	21.74	1634.36	-1634.36	13-16
	35.40	5388.25	29.50	2218.02	-2218.02	9-12
	41.54	6212.05	34.62	2602.58	-2602.58	5-8
	44.06	9277.41	36.71	2760.29	-2760.29	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	986.43	11.63	874.19	-874.19	17-20
	26.09	1891.55	21.74	1634.36	-1634.36	13-16
	35.40	4041.19	29.50	2218.02	-2218.02	9-12
	41.54	4659.03	34.62	2602.58	-2602.58	5-8
	44.06	6958.06	36.71	2760.29	-2760.29	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	657.62	11.63	874.19	-874.19	17-20
	26.09	1261.03	21.74	1634.36	-1634.36	13-16
	35.40	2694.13	29.50	2218.02	-2218.02	9-12
	41.54	3106.02	34.62	2602.58	-2602.58	5-8
	44.06	4638.70	36.71	2760.29	-2760.29	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	328.81	11.63	874.19	-874.19	17-20
	26.09	630.52	21.74	1634.36	-1634.36	13-16
	35.40	1347.06	29.50	2218.02	-2218.02	9-12
	41.54	1553.01	34.62	2602.58	-2602.58	5-8
	44.06	2319.35	36.71	2760.29	-2760.29	1-4

A4.3. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=75\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	105 x 105	32 # 10	0.023	4 # 4 @ 15
6-10	95 x 95	20# 10	0.018	4 # 4 @ 15
11-15	85 x 85	16 # 10	0.018	4 # 3 @ 15
16-20	75 x 75	12 # 10	0.017	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	70 x 95	7 # 10 + 4 # 8	5 # 10 + 4 # 8	4 # 4 @ 15
6-10	60 x 85	7 # 10 + 3 # 8	6 # 10 + 2 # 8	4 # 3 @ 15
11-15	50 x 70	6 # 10 + 3 # 6	5 # 10 + 2 # 8	3 # 3 @ 15
16-20	40 x 60	6 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 3 # 6	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	40.64	2.54	200.00
5-8	30.48	2.54	148.39
9-12	25.40	2.54	122.58
13-16	24.13	1.27	59.68
17-20	16.51	0.95	30.54

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$ **K2= 0.00**

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	357.10	11.63	550.86	-550.86	17-20
	26.08	697.69	21.74	1029.81	-1029.81	13-16
	35.40	1433.10	29.50	1397.70	-1397.70	9-12
	41.54	1734.80	34.62	1640.16	-1640.16	5-8
	44.06	2338.21	36.72	1739.62	-1739.62	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	267.82	11.63	550.86	-550.86	17-20
	26.08	523.27	21.74	1029.81	-1029.81	13-16
	35.40	1074.82	29.50	1397.70	-1397.70	9-12
	41.54	1301.10	34.62	1640.16	-1640.16	5-8
	44.06	1753.66	36.72	1739.62	-1739.62	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	178.55	11.63	550.86	-550.86	17-20
	26.08	348.85	21.74	1029.81	-1029.81	13-16
	35.40	716.55	29.50	1397.70	-1397.70	9-12
	41.54	867.40	34.62	1640.16	-1640.16	5-8
	44.06	1169.10	36.72	1739.62	-1739.62	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	89.27	11.63	550.86	-550.86	17-20
	26.08	174.42	21.74	1029.81	-1029.81	13-16
	35.40	358.27	29.50	1397.70	-1397.70	9-12
	41.54	433.70	34.62	1640.16	-1640.16	5-8
	44.06	584.55	36.72	1739.62	-1739.62	1-4

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	357.10	11.63	433.75	-433.75	17-20
	26.08	697.69	21.74	810.88	-810.88	13-16
	35.40	1433.10	29.50	1100.56	-1100.56	9-12
	41.54	1734.80	34.62	1291.47	-1291.47	5-8
	44.06	2338.21	36.72	1369.78	-1369.78	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	267.82	11.63	433.75	-433.75	17-20
	26.08	523.27	21.74	810.88	-810.88	13-16
	35.40	1074.82	29.50	1100.56	-1100.56	9-12
	41.54	1301.10	34.62	1291.47	-1291.47	5-8
	44.06	1753.66	36.72	1369.78	-1369.78	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	178.55	11.63	433.75	-433.75	17-20
	26.08	348.85	21.74	810.88	-810.88	13-16
	35.40	716.55	29.50	1100.56	-1100.56	9-12
	41.54	867.40	34.62	1291.47	-1291.47	5-8
	44.06	1169.10	36.72	1369.78	-1369.78	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	89.27	11.63	433.75	-433.75	17-20
	26.08	174.42	21.74	810.88	-810.88	13-16
	35.40	358.27	29.50	1100.56	-1100.56	9-12
	41.54	433.70	34.62	1291.47	-1291.47	5-8
	44.06	584.55	36.72	1369.78	-1369.78	1-4

K2= 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	357.10	11.63	379.90	-379.90	17-20
	26.08	697.69	21.74	710.22	-710.22	13-16
	35.40	1433.10	29.50	963.93	-963.93	9-12
	41.54	1734.80	34.62	1131.15	-1131.15	5-8
	44.06	2338.21	36.72	1199.74	-1199.74	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	267.82	11.63	379.90	-379.90	17-20
	26.08	523.27	21.74	710.22	-710.22	13-16
	35.40	1074.82	29.50	963.93	-963.93	9-12
	41.54	1301.10	34.62	1131.15	-1131.15	5-8
	44.06	1753.66	36.72	1199.74	-1199.74	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	178.55	11.63	379.90	-379.90	17-20
	26.08	348.85	21.74	710.22	-710.22	13-16
	35.40	716.55	29.50	963.93	-963.93	9-12
	41.54	867.40	34.62	1131.15	-1131.15	5-8
	44.06	1169.10	36.72	1199.74	-1199.74	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	89.27	11.63	379.90	-379.90	17-20
	26.08	174.42	21.74	710.22	-710.22	13-16
	35.40	358.27	29.50	963.93	-963.93	9-12
	41.54	433.70	34.62	1131.15	-1131.15	5-8
	44.06	584.55	36.72	1199.74	-1199.74	1-4

A5. Secciones de diseño de los modelos de 25 niveles y $\theta=40^\circ$ A5.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Tabla A37. Columnas modelo de 25 niveles $\alpha=25\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	130 x 130	48 # 12	0.032	6 # 4 @ 15
6-10	115 x 115	48 # 10	0.029	6 # 4 @ 15
11-15	100 x 100	28 # 10	0.022	4 # 4 @ 15
16-20	85 x 85	20 # 10	0.014	4 # 3 @ 15
21-25	70 x 70	20 # 6	0.012	2 # 3 @ 15

Tabla A38. Vigas modelo de 25 niveles $\alpha=25\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	80 x 110	7 # 8 + 2 # 6	6 # 8 + 2 # 6	6 # 4 @ 15
6-10	65 x 100	7 # 8 + 3 # 6	5 # 8 + 3 # 6	4 # 4 @ 15
11-15	50 x 90	6 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 3 # 6	4 # 3 @ 15
16-20	40 x 80	5 # 8 + 2 # 4	3 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 15
21-25	35 x 70	5 # 6 + 3 # 4	3 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 20

Tabla A39. Diagonales de contraventeo modelo de 25 niveles $\alpha=25\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	82.55	22.86	3251.61
5-8	69.85	15.88	1965.72
9-12	60.96	12.70	1387.09
13-17	46.99	8.89	756.45
18-21	43.18	7.62	600.00
22-25	36.83	5.08	348.39

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$

K2= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4073.01	11.63	2427.81	-2427.81	22-25
	26.58	7014.63	22.15	4624.35	-4624.35	18-21
	39.84	8843.71	33.20	6931.85	-6931.85	13-17
	47.97	16216.61	39.98	8346.93	-8346.93	9-12
	53.44	22981.39	44.53	9297.86	-9297.86	5-8
	55.74	38014.75	46.45	9698.30	-9698.30	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3054.76	11.63	2427.81	-2427.81	22-25
	26.58	5260.97	22.15	4624.35	-4624.35	18-21
	39.84	6632.78	33.20	6931.85	-6931.85	13-17
	47.97	12162.46	39.98	8346.93	-8346.93	9-12
	53.44	17236.04	44.53	9297.86	-9297.86	5-8
	55.74	28511.06	46.45	9698.30	-9698.30	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2036.50	11.63	2427.81	-2427.81	22-25
	26.58	3507.31	22.15	4624.35	-4624.35	18-21
	39.84	4421.85	33.20	6931.85	-6931.85	13-17
	47.97	8108.31	39.98	8346.93	-8346.93	9-12
	53.44	11490.69	44.53	9297.86	-9297.86	5-8
	55.74	19007.38	46.45	9698.30	-9698.30	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1018.25	11.63	2427.81	-2427.81	22-25
	26.58	1753.66	22.15	4624.35	-4624.35	18-21
	39.84	2210.93	33.20	6931.85	-6931.85	13-17
	47.97	4054.15	39.98	8346.93	-8346.93	9-12
	53.44	5745.35	44.53	9297.86	-9297.86	5-8
	55.74	9503.69	46.45	9698.30	-9698.30	1-4

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4073.01	11.63	1911.66	-1911.66	22-25
	26.58	7014.63	22.15	3641.22	-3641.22	18-21
	39.84	8843.71	33.20	5458.15	-5458.15	13-17
	47.97	16216.61	39.98	6572.39	-6572.39	9-12
	53.44	22981.39	44.53	7321.15	-7321.15	5-8
	55.74	38014.75	46.45	7636.46	-7636.46	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3054.76	11.63	1911.66	-1911.66	22-25
	26.58	5260.97	22.15	3641.22	-3641.22	18-21
	39.84	6632.78	33.20	5458.15	-5458.15	13-17
	47.97	12162.46	39.98	6572.39	-6572.39	9-12
	53.44	17236.04	44.53	7321.15	-7321.15	5-8
	55.74	28511.06	46.45	7636.46	-7636.46	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2036.50	11.63	1911.66	-1911.66	22-25
	26.58	3507.31	22.15	3641.22	-3641.22	18-21
	39.84	4421.85	33.20	5458.15	-5458.15	13-17
	47.97	8108.31	39.98	6572.39	-6572.39	9-12
	53.44	11490.69	44.53	7321.15	-7321.15	5-8
	55.74	19007.38	46.45	7636.46	-7636.46	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1018.25	11.63	1911.66	-1911.66	22-25
	26.58	1753.66	22.15	3641.22	-3641.22	18-21
	39.84	2210.93	33.20	5458.15	-5458.15	13-17
	47.97	4054.15	39.98	6572.39	-6572.39	9-12
	53.44	5745.35	44.53	7321.15	-7321.15	5-8
	55.74	9503.69	46.45	7636.46	-7636.46	1-4

K₂ = 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4073.01	11.63	1674.35	-1674.35	22-25
	26.58	7014.63	22.15	3189.21	-3189.21	18-21
	39.84	8843.71	33.20	4780.58	-4780.58	13-17
	47.97	16216.61	39.98	5756.50	-5756.50	9-12
	53.44	22981.39	44.53	6412.32	-6412.32	5-8
	55.74	38014.75	46.45	6688.48	-6688.48	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3054.76	11.63	1674.35	-1674.35	22-25
	26.58	5260.97	22.15	3189.21	-3189.21	18-21
	39.84	6632.78	33.20	4780.58	-4780.58	13-17
	47.97	12162.46	39.98	5756.50	-5756.50	9-12
	53.44	17236.04	44.53	6412.32	-6412.32	5-8
	55.74	28511.06	46.45	6688.48	-6688.48	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2036.50	11.63	1674.35	-1674.35	22-25
	26.58	3507.31	22.15	3189.21	-3189.21	18-21
	39.84	4421.85	33.20	4780.58	-4780.58	13-17
	47.97	8108.31	39.98	5756.50	-5756.50	9-12
	53.44	11490.69	44.53	6412.32	-6412.32	5-8
	55.74	19007.38	46.45	6688.48	-6688.48	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1018.25	11.63	1674.35	-1674.35	22-25
	26.58	1753.66	22.15	3189.21	-3189.21	18-21
	39.84	2210.93	33.20	4780.58	-4780.58	13-17
	47.97	4054.15	39.98	5756.50	-5756.50	9-12
	53.44	5745.35	44.53	6412.32	-6412.32	5-8
	55.74	9503.69	46.45	6688.48	-6688.48	1-4

A5.2. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=50\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	120 x 120	40 # 12	0.032	6 # 4 @ 15
6-10	110 x 110	40 # 10	0.026	6 # 4 @ 15
11-15	100 x 100	24 # 10	0.019	4 # 4 @ 15
16-20	85 x 85	24 # 8	0.017	4 # 3 @ 15
21-25	75 x 75	20 # 6	0.010	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	80 x 110	7 # 10 + 3 # 8	6 # 10 + 3 # 6	6 # 4 @ 15
6-10	65 x 100	7 # 10 + 3 # 6	5 # 10 + 3 # 8	4 # 4 @ 15
11-15	50 x 90	6 # 10 + 3 # 6	5 # 10 + 3 # 6	4 # 3 @ 15
16-20	40 x 80	7 # 8 + 3 # 6	5 # 8 + 4 # 6	2 # 3 @ 15
21-25	35 x 70	5 # 8 + 2 # 4	3 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	62.23	11.43	1291.93
5-8	57.15	7.62	812.90
9-12	49.53	6.67	616.03
13-17	48.26	3.81	353.23
18-21	39.37	3.81	285.48
22-25	27.94	2.86	151.51

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$

$K_2= 0.00$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1771.33	11.63	1354.93	-1354.93	22-25
	26.49	3337.60	22.07	2572.20	-2572.20	18-21
	39.57	4129.58	32.97	3842.54	-3842.54	13-17
	47.53	7202.01	39.61	4615.82	-4615.82	9-12
	55.02	15104.08	45.85	5343.31	-5343.31	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1328.50	11.63	1354.93	-1354.93	22-25
	26.49	2503.20	22.07	2572.20	-2572.20	18-21
	39.57	3097.18	32.97	3842.54	-3842.54	13-17
	47.53	5401.51	39.61	4615.82	-4615.82	9-12
	55.02	11328.06	45.85	5343.31	-5343.31	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	885.67	11.63	1354.93	-1354.93	22-25
	26.49	1668.80	22.07	2572.20	-2572.20	18-21
	39.57	2064.79	32.97	3842.54	-3842.54	13-17
	47.53	3601.01	39.61	4615.82	-4615.82	9-12
	55.02	7552.04	45.85	5343.31	-5343.31	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	442.83	11.63	1354.93	-1354.93	22-25
	26.49	834.40	22.07	2572.20	-2572.20	18-21
	39.57	1032.39	32.97	3842.54	-3842.54	13-17
	47.53	1800.50	39.61	4615.82	-4615.82	9-12
	55.02	3776.02	45.85	5343.31	-5343.31	1-4

$K_2= 0.03$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1771.33	11.63	1066.88	-1066.88	22-25
	26.49	3337.60	22.07	2025.35	-2025.35	18-21
	39.57	4129.58	32.97	3025.62	-3025.62	13-17
	47.53	7202.01	39.61	3634.50	-3634.50	9-12
	55.02	15104.08	45.85	4207.33	-4207.33	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1328.50	11.63	1066.88	-1066.88	22-25
	26.49	2503.20	22.07	2025.35	-2025.35	18-21
	39.57	3097.18	32.97	3025.62	-3025.62	13-17
	47.53	5401.51	39.61	3634.50	-3634.50	9-12
	55.02	11328.06	45.85	4207.33	-4207.33	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	885.67	11.63	1066.88	-1066.88	22-25
	26.49	1668.80	22.07	2025.35	-2025.35	18-21
	39.57	2064.79	32.97	3025.62	-3025.62	13-17
	47.53	3601.01	39.61	3634.50	-3634.50	9-12
	55.02	7552.04	45.85	4207.33	-4207.33	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	442.83	11.63	1066.88	-1066.88	22-25
	26.49	834.40	22.07	2025.35	-2025.35	18-21
	39.57	1032.39	32.97	3025.62	-3025.62	13-17
	47.53	1800.50	39.61	3634.50	-3634.50	9-12
	55.02	3776.02	45.85	4207.33	-4207.33	1-4

K₂= 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1771.33	11.63	934.44	-934.44	22-25
	26.49	3337.60	22.07	1773.93	-1773.93	18-21
	39.57	4129.58	32.97	2650.02	-2650.02	13-17
	47.53	7202.01	39.61	3183.32	-3183.32	9-12
	55.02	15104.08	45.85	3685.04	-3685.04	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1328.50	11.63	934.44	-934.44	22-25
	26.49	2503.20	22.07	1773.93	-1773.93	18-21
	39.57	3097.18	32.97	2650.02	-2650.02	13-17
	47.53	5401.51	39.61	3183.32	-3183.32	9-12
	55.02	7127.77	44.02	3537.65	-3537.65	5-8
55.02	11328.06	45.85	3685.04	-3685.04	1-4	

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	885.67	11.63	934.44	-934.44	22-25
	26.49	1668.80	22.07	1773.93	-1773.93	18-21
	39.57	2064.79	32.97	2650.02	-2650.02	13-17
	47.53	3601.01	39.61	3183.32	-3183.32	9-12
	55.02	7552.04	45.85	3685.04	-3685.04	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	442.83	11.63	934.44	-934.44	22-25
	26.49	834.40	22.07	1773.93	-1773.93	18-21
	39.57	1032.39	32.97	2650.02	-2650.02	13-17
	47.53	1800.50	39.61	3183.32	-3183.32	9-12
	55.02	3776.02	45.85	3685.04	-3685.04	1-4

A5.3. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=75\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	125 x 125	32 # 12	0.023	6 # 4 @ 15
6-10	115 x 115	32 # 10	0.019	4 # 4 @ 15
11-15	105 x 105	20 # 10	0.014	4 # 4 @ 15
16-20	90 x 90	32 # 8	0.018	2 # 3 @ 15
21-25	80 x 80	28 # 6	0.011	2 # 3 @ 15

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	80 x 110	8 # 10 + 4 # 8	6 # 10 + 5 # 8	6 # 4 @ 15
6-10	65 x 100	8 # 10 + 3 # 8	7 # 10 + 6 # 6	4 # 4 @ 15
11-15	55 x 90	7 # 10 + 3 # 8	6 # 10 + 3 # 8	4 # 4 @ 15
16-20	45 x 85	9 # 8 + 3 # 6	7 # 8 + 5 # 6	2 # 3 @ 15
21-25	35 x 70	6 # 8 + 2 # 4	5 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	48.26	3.81	353.23
5-8	33.02	3.49	218.45
9-12	26.67	3.18	159.27
13-17	24.13	1.91	88.31
18-21	22.86	1.59	70.06
22-25	21.59	0.95	40.22

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$

$K_2= 0.00$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	470.23	11.63	589.16	-589.16	22-25
	26.63	819.08	22.19	1124.32	-1124.32	18-21
	39.95	1032.39	33.29	1687.07	-1687.07	13-17
	48.07	1862.08	40.06	2029.77	-2029.77	9-12
	53.46	2553.88	44.55	2257.35	-2257.35	5-8
	55.66	4129.58	46.39	2350.37	-2350.37	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	352.68	11.63	589.16	-589.16	22-25
	26.63	614.31	22.19	1124.32	-1124.32	18-21
	39.95	774.30	33.29	1687.07	-1687.07	13-17
	48.07	1396.56	40.06	2029.77	-2029.77	9-12
	53.46	1915.41	44.55	2257.35	-2257.35	5-8
	55.66	3097.18	46.39	2350.37	-2350.37	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	235.12	11.63	589.16	-589.16	22-25
	26.63	409.54	22.19	1124.32	-1124.32	18-21
	39.95	516.20	33.29	1687.07	-1687.07	13-17
	48.07	931.04	40.06	2029.77	-2029.77	9-12
	53.46	1276.94	44.55	2257.35	-2257.35	5-8
	55.66	2064.79	46.39	2350.37	-2350.37	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	117.56	11.63	589.16	-589.16	22-25
	26.63	204.77	22.19	1124.32	-1124.32	18-21
	39.95	258.10	33.29	1687.07	-1687.07	13-17
	48.07	465.52	40.06	2029.77	-2029.77	9-12
	53.46	638.47	44.55	2257.35	-2257.35	5-8
	55.66	1032.39	46.39	2350.37	-2350.37	1-4

$K_2= 0.03$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	470.23	11.63	463.91	-463.91	22-25
	26.63	819.08	22.19	885.29	-885.29	18-21
	39.95	1032.39	33.29	1328.40	-1328.40	13-17
	48.07	1862.08	40.06	1598.25	-1598.25	9-12
	53.46	2553.88	44.55	1777.44	-1777.44	5-8
	55.66	4129.58	46.39	1850.69	-1850.69	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	352.68	11.63	463.91	-463.91	22-25
	26.63	614.31	22.19	885.29	-885.29	18-21
	39.95	774.30	33.29	1328.40	-1328.40	13-17
	48.07	1396.56	40.06	1598.25	-1598.25	9-12
	53.46	1915.41	44.55	1777.44	-1777.44	5-8
	55.66	3097.18	46.39	1850.69	-1850.69	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	235.12	11.63	463.91	-463.91	22-25
	26.63	409.54	22.19	885.29	-885.29	18-21
	39.95	516.20	33.29	1328.40	-1328.40	13-17
	48.07	931.04	40.06	1598.25	-1598.25	9-12
	53.46	1276.94	44.55	1777.44	-1777.44	5-8
	55.66	2064.79	46.39	1850.69	-1850.69	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	117.56	11.63	463.91	-463.91	22-25
	26.63	204.77	22.19	885.29	-885.29	18-21
	39.95	258.10	33.29	1328.40	-1328.40	13-17
	48.07	465.52	40.06	1598.25	-1598.25	9-12
	53.46	638.47	44.55	1777.44	-1777.44	5-8
	55.66	1032.39	46.39	1850.69	-1850.69	1-4

K2= 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	470.23	11.63	406.32	-406.32	22-25
	26.63	819.08	22.19	775.39	-775.39	18-21
	39.95	1032.39	33.29	1163.49	-1163.49	13-17
	48.07	1862.08	40.06	1399.84	-1399.84	9-12
	53.46	2553.88	44.55	1556.80	-1556.80	5-8
	55.66	4129.58	46.39	1620.94	-1620.94	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	352.68	11.63	406.32	-406.32	22-25
	26.63	614.31	22.19	775.39	-775.39	18-21
	39.95	774.30	33.29	1163.49	-1163.49	13-17
	48.07	1396.56	40.06	1399.84	-1399.84	9-12
	53.46	1915.41	44.55	1556.80	-1556.80	5-8
	55.66	3097.18	46.39	1620.94	-1620.94	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	235.12	11.63	406.32	-406.32	22-25
	26.63	409.54	22.19	775.39	-775.39	18-21
	39.95	516.20	33.29	1163.49	-1163.49	13-17
	48.07	931.04	40.06	1399.84	-1399.84	9-12
	53.46	1276.94	44.55	1556.80	-1556.80	5-8
	55.66	2064.79	46.39	1620.94	-1620.94	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	117.56	11.63	406.32	-406.32	22-25
	26.63	204.77	22.19	775.39	-775.39	18-21
	39.95	258.10	33.29	1163.49	-1163.49	13-17
	48.07	465.52	40.06	1399.84	-1399.84	9-12
	53.46	638.47	44.55	1556.80	-1556.80	5-8
	55.66	1032.39	46.39	1620.94	-1620.94	1-4

A6. Secciones de diseño de los modelos de cinco niveles y $\theta=45^\circ$ A6.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-3	50 x 50	26 # 6	0.025	2 # 3 @ 15
4-5	40 x 40	20 # 6	0.036	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-3	40 x 60	7 # 6	4 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 15
4-5	35 x 55	7 # 4	4 # 4	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-2	15.24	0.79	44.26
3-5	15.24	0.64	36.06

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$

K₂= 0.00

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	736.57	11.63	1147.25	-1147.25	3-5
	17.90	1330.58	14.91	1470.65	-1470.65	1-2

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	552.43	11.63	1147.25	-1147.25	3-5
	17.90	997.93	14.91	1470.65	-1470.65	1-2

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	368.29	11.63	1147.25	-1147.25	3-5
	17.90	665.29	14.91	1470.65	-1470.65	1-2

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	184.14	11.63	1147.25	-1147.25	3-5
	17.90	332.64	14.91	1470.65	-1470.65	1-2

K₂= 0.03

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	736.57	11.63	903.35	-903.35	3-5
	17.90	1330.58	14.91	1157.99	-1157.99	1-2

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	552.43	11.63	903.35	-903.35	3-5
	17.90	997.93	14.91	1157.99	-1157.99	1-2

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	368.29	11.63	903.35	-903.35	3-5
	17.90	665.29	14.91	1157.99	-1157.99	1-2

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	184.14	11.63	903.35	-903.35	3-5
	17.90	332.64	14.91	1157.99	-1157.99	1-2

$K_2 = 0.05$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	736.57	11.63	791.21	-791.21	3-5
	17.90	1330.58	14.91	1014.24	-1014.24	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	552.43	11.63	791.21	-791.21	3-5
	17.90	997.93	14.91	1014.24	-1014.24	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	368.29	11.63	791.21	-791.21	3-5
	17.90	665.29	14.91	1014.24	-1014.24	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	184.14	11.63	791.21	-791.21	3-5
	17.90	332.64	14.91	1014.24	-1014.24	1-2

A6.2. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=50\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-3	55 x 55	22 # 6	0.021	2 # 3 @ 20
4-5	45 x 45	20 # 6	0.028	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-3	40 x 60	4 # 8 + 2 # 4	5 # 6 + 2 # 4	2 # 3 @ 15
4-5	35 x 55	5 # 6	2 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A51. Diagonales de contraventeo modelo de cinco niveles $\alpha=50\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-2	15.24	0.48	27.55
3-5	15.24	0.32	18.71

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$

K2= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	332.05	11.63	632.25	-632.25	3-5
17.92	479.96	14.93	810.18	-810.18	1-2	

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	249.04	11.63	632.25	-632.25	3-5
17.92	359.97	14.93	810.18	-810.18	1-2	

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	166.03	11.63	632.25	-632.25	3-5
17.92	239.98	14.93	810.18	-810.18	1-2	

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	83.01	11.63	632.25	-632.25	3-5
17.92	119.99	14.93	810.18	-810.18	1-2	

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	332.05	11.63	497.83	-497.83	3-5
17.92	479.96	14.93	637.93	-637.93	1-2	

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	249.04	11.63	497.83	-497.83	3-5
17.92	359.97	14.93	637.93	-637.93	1-2	

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	166.03	11.63	497.83	-497.83	3-5
17.92	239.98	14.93	637.93	-637.93	1-2	

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	83.01	11.63	497.83	-497.83	3-5
17.92	119.99	14.93	637.93	-637.93	1-2	

$K_2 = 0.05$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	332.05	11.63	436.03	-436.03	3-5
	17.92	479.96	14.93	558.74	-558.74	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	249.04	11.63	436.03	-436.03	3-5
	17.92	359.97	14.93	558.74	-558.74	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	166.03	11.63	436.03	-436.03	3-5
	17.92	239.98	14.93	558.74	-558.74	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	83.01	11.63	436.03	-436.03	3-5
	17.92	119.99	14.93	558.74	-558.74	1-2

A6.3. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=75\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-3	65 x 65	30 # 6	0.020	2 # 3 @ 15
4-5	55 x 55	24 # 6	0.026	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-3	40 x 70	5 # 8 + 2 # 6	4 # 8	2 # 3 @ 15
4-5	35 x 60	3 # 8	3 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A54. Diagonales de contraventeo modelo de cinco niveles $\alpha=75\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-2	12.7	0.32	15.48
3-5	11.43	0.32	13.87

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$

$K_2=0.00$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	209.09	11.63	287.38	-287.38	3-5
	17.67	272.65	14.73	368.95	-368.95	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	156.82	11.63	287.38	-287.38	3-5
	17.67	204.49	14.73	368.95	-368.95	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	104.55	11.63	287.38	-287.38	3-5
	17.67	136.32	14.73	368.95	-368.95	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	52.27	11.63	287.38	-287.38	3-5
	17.67	68.16	14.73	368.95	-368.95	1-2

$K_2=0.03$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	209.09	11.63	226.28	-226.28	3-5
	17.67	272.65	14.73	290.51	-290.51	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	156.82	11.63	226.28	-226.28	3-5
	17.67	204.49	14.73	290.51	-290.51	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	104.55	11.63	226.28	-226.28	3-5
	17.67	136.32	14.73	290.51	-290.51	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	52.27	11.63	226.28	-226.28	3-5
	17.67	68.16	14.73	290.51	-290.51	1-2

$K_2 = 0.05$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	209.09	11.63	198.19	-198.19	3-5
	17.67	272.65	14.73	254.45	-254.45	1-2

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	156.82	11.63	198.19	-198.19	3-5
	17.67	204.49	14.73	254.45	-254.45	1-2

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	104.55	11.63	198.19	-198.19	3-5
	17.67	136.32	14.73	254.45	-254.45	1-2

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	52.27	11.63	198.19	-198.19	3-5
	17.67	68.16	14.73	254.45	-254.45	1-2

A7. Secciones de diseño de los modelos de 10 niveles y $\theta=45^\circ$

A7.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-4	70 x 70	24 # 8	0.025	4 # 4 @ 15
5-7	60 x 60	26 # 6	0.021	2 # 3 @ 15
8-10	50 x 50	16 # 6	0.018	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-4	60 x 90	7 # 6 + 2 # 4	5 # 6	3 # 3 @ 15
5-7	50 x 75	7 # 6	5 # 6	2 # 3 @ 20
8-10	40 x 60	5 # 6	3 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A57. Diagonales de contraventeo modelo de 10 niveles $\alpha=25\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	55.88	6.35	669.35
4-6	35.56	5.08	335.48
7-10	30.48	2.54	148.39

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$

K₂ = 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1,366.22	11.63	1,942.03	-1942.03	7-10
	21.08	3,088.85	17.56	2,933.52	-2933.52	4-6
	24.11	6,162.84	20.10	3,356.30	-3356.30	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1,024.67	11.63	1,942.03	-1942.03	7-10
	21.08	2,316.63	17.56	2,933.52	-2933.52	4-6
	24.11	4,622.13	20.10	3,356.30	-3356.30	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	683.11	11.63	1,942.03	-1942.03	7-10
	21.08	1,544.42	17.56	2,933.52	-2933.52	4-6
	24.11	3,081.42	20.10	3,356.30	-3356.30	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	341.56	11.63	1,942.03	-1942.03	7-10
	21.08	772.21	17.56	2,933.52	-2933.52	4-6
	24.11	1,540.71	20.10	3,356.30	-3356.30	1-3

K₂ = 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1,366.22	11.63	1,529.16	-1529.16	7-10
	21.08	3,088.85	17.56	2,309.86	-2309.86	4-6
	24.11	6,162.84	20.10	2,642.76	-2642.76	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1,024.67	11.63	1,529.16	-1529.16	7-10
	21.08	2,316.63	17.56	2,309.86	-2309.86	4-6
	24.11	4,622.13	20.10	2,642.76	-2642.76	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	683.11	11.63	1,529.16	-1529.16	7-10
	21.08	1,544.42	17.56	2,309.86	-2309.86	4-6
	24.11	3,081.42	20.10	2,642.76	-2642.76	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	341.56	11.63	1,529.16	-1529.16	7-10
	21.08	772.21	17.56	2,309.86	-2309.86	4-6
	24.11	1,540.71	20.10	2,642.76	-2642.76	1-3

K₂ = 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1,366.22	11.63	1,339.33	-1339.33	7-10
	21.08	3,088.85	17.56	2,023.12	-2023.12	4-6
	24.11	6,162.84	20.10	2,314.69	-2314.69	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1,024.67	11.63	1,339.33	-1339.33	7-10
	21.08	2,316.63	17.56	2,023.12	-2023.12	4-6
	24.11	4,622.13	20.10	2,314.69	-2314.69	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	683.11	11.63	1,339.33	-1339.33	7-10
	21.08	1,544.42	17.56	2,023.12	-2023.12	4-6
	24.11	3,081.42	20.10	2,314.69	-2314.69	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	341.56	11.63	1,339.33	-1339.33	7-10
	21.08	772.21	17.56	2,023.12	-2023.12	4-6
	24.11	1,540.71	20.10	2,314.69	-2314.69	1-3

A7.2. Secciones de diseño de los modelos α=50%

Tabla A58. Columnas modelo de 10 niveles α=50%				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-4	70 x 70	28 # 8	0.029	2 # 3 @ 15
5-7	60 x 60	28 # 8	0.039	2 # 3 @ 20
8-10	50 x 50	20 # 8	0.040	2 # 3 @ 20

Tabla A59. Vigas modelo de 10 niveles $\alpha=50\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-4	60 x 90	6 # 8 + 3 # 6	4 # 8 + 2 # 6	3 # 3 @ 15
5-7	50 x 75	6 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 2 # 4	2 # 3 @ 20
8-10	40 x 60	6 # 6 + 2 # 4	4 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A60. Diagonales de contraventeo modelo de 10 niveles $\alpha=50\%$

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	36.83	3.18	223.79
4-6	34.29	1.71	114.64
7-10	15.24	1.71	49.32

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$

K₂ = 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	454.08	11.63	1,078.91	-1078.91	7-10
	21.08	1,055.52	17.56	1,629.73	-1629.73	4-6
	24.44	2,060.47	20.36	1,864.61	-1864.61	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	340.56	11.63	1,078.91	-1078.91	7-10
	21.08	791.64	17.56	1,629.73	-1629.73	4-6
	24.44	1,545.35	20.36	1,864.61	-1864.61	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	227.04	11.63	1,078.91	-1078.91	7-10
	21.08	527.76	17.56	1,629.73	-1629.73	4-6
	24.44	1,030.23	20.36	1,864.61	-1864.61	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	113.52	11.63	1,078.91	-1078.91	7-10
	21.08	263.88	17.56	1,629.73	-1629.73	4-6
	24.44	515.12	20.36	1,864.61	-1864.61	1-3

K₂ = 0.03

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	454.08	11.63	849.53	-849.53	7-10
	21.08	1,055.52	17.56	1,283.25	-1283.25	4-6
	24.44	2,060.47	20.36	1,468.20	-1468.20	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	340.56	11.63	849.53	-849.53	7-10
	21.08	791.64	17.56	1,283.25	-1283.25	4-6
	24.44	1,545.35	20.36	1,468.20	-1468.20	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	227.04	11.63	849.53	-849.53	7-10
	21.08	527.76	17.56	1,283.25	-1283.25	4-6
	24.44	1,030.23	20.36	1,468.20	-1468.20	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	113.52	11.63	849.53	-849.53	7-10
	21.08	263.88	17.56	1,283.25	-1283.25	4-6
	24.44	515.12	20.36	1,468.20	-1468.20	1-3

K₂ = 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	454.08	11.63	744.07	-744.07	7-10
	21.08	1,055.52	17.56	1,123.95	-1123.95	4-6
	24.44	2,060.47	20.36	1,285.94	-1285.94	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	340.56	11.63	744.07	-744.07	7-10
	21.08	791.64	17.56	1,123.95	-1123.95	4-6
	24.44	1,545.35	20.36	1,285.94	-1285.94	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	227.04	11.63	744.07	-744.07	7-10
	21.08	527.76	17.56	1,123.95	-1123.95	4-6
	24.44	1,030.23	20.36	1,285.94	-1285.94	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	113.52	11.63	744.07	-744.07	7-10
	21.08	263.88	17.56	1,123.95	-1123.95	4-6
	24.44	515.12	20.36	1,285.94	-1285.94	1-3

A7.3. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=75\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-4	75 x 75	28 # 10	0.039	4 # 3 @ 15
5-7	65 x 65	32 # 8	0.038	2 # 3 @ 20
8-10	55 x 55	20 # 8	0.034	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-4	60 x 90	5 # 10 + 3 # 6	5 # 8 + 4 # 6	3 # 3 @ 15
5-7	50 x 75	5 # 10 + 3 # 4	5 # 8 + 4 # 4	2 # 3 @ 20
8-10	40 x 60	5 # 8	6 # 6	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	33.02	1.27	82.26
4-6	16.51	1.27	40.32
7-10	13.97	0.64	17.34

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$

K₂ = 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	159.64	11.63	468.38	-468.38	7-10
	21.08	371.26	17.56	707.61	-707.61	4-6
	24.12	757.36	20.10	809.68	-809.68	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	119.73	11.63	468.38	-468.38	7-10
	21.08	278.44	17.56	707.61	-707.61	4-6
	24.12	568.02	20.10	809.68	-809.68	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	79.82	11.63	468.38	-468.38	7-10
	21.08	185.63	17.56	707.61	-707.61	4-6
	24.12	378.68	20.10	809.68	-809.68	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	39.91	11.63	468.38	-468.38	7-10
	21.08	92.81	17.56	707.61	-707.61	4-6
	24.12	189.34	20.10	809.68	-809.68	1-3

K₂ = 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	159.64	11.63	368.81	-368.81	7-10
	21.08	371.26	17.56	557.17	-557.17	4-6
	24.12	757.36	20.10	637.54	-637.54	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	119.73	11.63	368.81	-368.81	7-10
	21.08	278.44	17.56	557.17	-557.17	4-6
	24.12	568.02	20.10	637.54	-637.54	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	79.82	11.63	368.81	-368.81	7-10
	21.08	185.63	17.56	557.17	-557.17	4-6
	24.12	378.68	20.10	637.54	-637.54	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	39.91	11.63	368.81	-368.81	7-10
	21.08	92.81	17.56	557.17	-557.17	4-6
	24.12	189.34	20.10	637.54	-637.54	1-3

K₂ = 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	159.64	11.63	323.02	-323.02	7-10
	21.08	371.26	17.56	488.01	-488.01	4-6
	24.12	757.36	20.10	558.40	-558.40	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	119.73	11.63	323.02	-323.02	7-10
	21.08	278.44	17.56	488.01	-488.01	4-6
	24.12	568.02	20.10	558.40	-558.40	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	79.82	11.63	323.02	-323.02	7-10
	21.08	185.63	17.56	488.01	-488.01	4-6
	24.12	378.68	20.10	558.40	-558.40	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	39.91	11.63	323.02	-323.02	7-10
	21.08	92.81	17.56	488.01	-488.01	4-6
	24.12	189.34	20.10	558.40	-558.40	1-3

A8. Secciones de diseño de los modelos de 15 niveles y θ=45°

A8.1. Secciones de diseño de los modelos α=25%

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	90 x 90	30 # 10	0.029	4 # 4 @ 15
6-10	80 x 80	18 # 8	0.022	4 # 3 @ 15
11-15	70 x 70	18 # 6	0.010	2 # 3 @ 15

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	70 x 100	6 # 8 + 3 # 6	3 # 8 + 3 # 6	4 # 3 @ 15
6-10	60 x 90	6 # 8 + 2 # 4	4 # 8	2 # 3 @ 20
11-15	50 x 70	6 # 6 + 3 # 4	3 # 6 + 3 # 4	2 # 3 @ 20

Tabla A66. Diagonales de contraventeo modelo de 15 niveles $\alpha=25\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	63.50	10.8	1254.43
4-6	55.88	8.89	914.51
7-9	52.07	8.26	791.53
10-12	46.99	5.08	451.61
13-15	40.64	4.45	341.53

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$

K2= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3144.53	11.63	1766.50	-1766.50	13-15
	26.06	4158.06	21.71	3298.48	-3298.48	10-12
	35.48	7287.74	29.57	4492.11	-4492.11	7-9
	41.68	8420.07	34.74	5277.01	-5277.01	4-6
	44.25	11549.76	36.87	5601.34	-5601.34	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2358.40	11.63	1766.50	-1766.50	13-15
	26.06	3118.55	21.71	3298.48	-3298.48	10-12
	35.48	5465.81	29.57	4492.11	-4492.11	7-9
	41.68	6315.06	34.74	5277.01	-5277.01	4-6
	44.25	8662.32	36.87	5601.34	-5601.34	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1572.27	11.63	1766.50	-1766.50	13-15
	26.06	2079.03	21.71	3298.48	-3298.48	10-12
	35.48	3643.87	29.57	4492.11	-4492.11	7-9
	41.68	4210.04	34.74	5277.01	-5277.01	4-6
	44.25	5774.88	36.87	5601.34	-5601.34	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	786.13	11.63	1766.50	-1766.50	13-15
	26.06	1039.52	21.71	3298.48	-3298.48	10-12
	35.48	1821.94	29.57	4492.11	-4492.11	7-9
	41.68	2105.02	34.74	5277.01	-5277.01	4-6
	44.25	2887.44	36.87	5601.34	-5601.34	1-3

K2= 0.03

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3144.53	11.63	1390.94	-1390.94	13-15
	26.06	4158.06	21.71	2597.23	-2597.23	10-12
	35.48	7287.74	29.57	3537.09	-3537.09	7-9
	41.68	8420.07	34.74	4155.12	-4155.12	4-6
	44.25	11549.76	36.87	4410.50	-4410.50	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2358.40	11.63	1390.94	-1390.94	13-15
	26.06	3118.55	21.71	2597.23	-2597.23	10-12
	35.48	5465.81	29.57	3537.09	-3537.09	7-9
	41.68	6315.06	34.74	4155.12	-4155.12	4-6
	44.25	8662.32	36.87	4410.50	-4410.50	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1572.27	11.63	1390.94	-1390.94	13-15
	26.06	2079.03	21.71	2597.23	-2597.23	10-12
	35.48	3643.87	29.57	3537.09	-3537.09	7-9
	41.68	4210.04	34.74	4155.12	-4155.12	4-6
	44.25	5774.88	36.87	4410.50	-4410.50	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	786.13	11.63	1390.94	-1390.94	13-15
	26.06	1039.52	21.71	2597.23	-2597.23	10-12
	35.48	1821.94	29.57	3537.09	-3537.09	7-9
	41.68	2105.02	34.74	4155.12	-4155.12	4-6
	44.25	2887.44	36.87	4410.50	-4410.50	1-3

K2= 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3144.53	11.63	1218.27	-1218.27	13-15
	26.06	4158.06	21.71	2274.81	-2274.81	10-12
	35.48	7287.74	29.57	3098.00	-3098.00	7-9
	41.68	8420.07	34.74	3639.32	-3639.32	4-6
	44.25	11549.76	36.87	3862.99	-3862.99	1-3

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2358.40	11.63	1218.27	-1218.27	13-15
	26.06	3118.55	21.71	2274.81	-2274.81	10-12
	35.48	5465.81	29.57	3098.00	-3098.00	7-9
	41.68	6315.06	34.74	3639.32	-3639.32	4-6
	44.25	8662.32	36.87	3862.99	-3862.99	1-3

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1572.27	11.63	1218.27	-1218.27	13-15
	26.06	2079.03	21.71	2274.81	-2274.81	10-12
	35.48	3643.87	29.57	3098.00	-3098.00	7-9
	41.68	4210.04	34.74	3639.32	-3639.32	4-6
	44.25	5774.88	36.87	3862.99	-3862.99	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	786.13	11.63	1218.27	-1218.27	13-15
	26.06	1039.52	21.71	2274.81	-2274.81	10-12
	35.48	1821.94	29.57	3098.00	-3098.00	7-9
	41.68	2105.02	34.74	3639.32	-3639.32	4-6
	44.25	2887.44	36.87	3862.99	-3862.99	1-3

A8.2. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=50\%$

Tabla A67. Columnas modelo de 15 niveles $\alpha=50\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	85 x 85	30 # 10	0.033	4 # 4 @ 15
6-10	75 x 75	32 # 10	0.038	4 # 3 @ 15
11-15	65 x 65	20 # 8	0.024	2 # 3 @ 20

Tabla A68. Vigas modelo de 15 niveles $\alpha=50\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	70 x 100	6 # 10 + 3 # 6	4 # 10 + 3 # 6	4 # 3 @ 15
6-10	60 x 90	6 # 10 + 3 # 6	4 # 10 + 2 # 6	3 # 3 @ 20
11-15	50 x 70	6 # 8 + 2 # 4	4 # 8 + 2 # 4	2 # 3 @ 20

Tabla A69. Diagonales de contraventeo modelo de 15 niveles $\alpha=50\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	41.91	5.08	400.00
4-6	38.10	3.81	275.81
7-9	34.29	3.81	246.77
10-12	22.86	3.18	135.08
13-15	22.86	2.54	109.68

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$

K2= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1009.81	11.63	966.86	-966.86	13-15
	26.06	1243.71	21.72	1806.03	-1806.03	10-12
	35.49	2272.08	29.58	2459.62	-2459.62	7-9
	41.69	2539.39	34.75	2889.26	-2889.26	4-6
	44.26	3682.85	36.88	3066.75	-3066.75	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	757.36	11.63	966.86	-966.86	13-15
	26.06	932.78	21.72	1806.03	-1806.03	10-12
	35.49	1704.06	29.58	2459.62	-2459.62	7-9
	41.69	1904.54	34.75	2889.26	-2889.26	4-6
	44.26	2762.14	36.88	3066.75	-3066.75	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	504.91	11.63	966.86	-966.86	13-15
	26.06	621.85	21.72	1806.03	-1806.03	10-12
	35.49	1136.04	29.58	2459.62	-2459.62	7-9
	41.69	1269.69	34.75	2889.26	-2889.26	4-6
	44.26	1841.43	36.88	3066.75	-3066.75	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	252.45	11.63	966.86	-966.86	13-15
	26.06	310.93	21.72	1806.03	-1806.03	10-12
	35.49	568.02	29.58	2459.62	-2459.62	7-9
	41.69	634.85	34.75	2889.26	-2889.26	4-6
	44.26	920.71	36.88	3066.75	-3066.75	1-3

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1009.81	11.63	761.31	-761.31	13-15
	26.06	1243.71	21.72	1422.07	-1422.07	10-12
	35.49	2272.08	29.58	1936.71	-1936.71	7-9
	41.69	2539.39	34.75	2275.01	-2275.01	4-6
	44.26	3682.85	36.88	2414.76	-2414.76	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	757.36	11.63	761.31	-761.31	13-15
	26.06	932.78	21.72	1422.07	-1422.07	10-12
	35.49	1704.06	29.58	1936.71	-1936.71	7-9
	41.69	1904.54	34.75	2275.01	-2275.01	4-6
	44.26	2762.14	36.88	2414.76	-2414.76	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	504.91	11.63	761.31	-761.31	13-15
	26.06	621.85	21.72	1422.07	-1422.07	10-12
	35.49	1136.04	29.58	1936.71	-1936.71	7-9
	41.69	1269.69	34.75	2275.01	-2275.01	4-6
	44.26	1841.43	36.88	2414.76	-2414.76	1-3

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	252.45	11.63	761.31	-761.31	13-15
	26.06	310.93	21.72	1422.07	-1422.07	10-12
	35.49	568.02	29.58	1936.71	-1936.71	7-9
	41.69	634.85	34.75	2275.01	-2275.01	4-6
44.26	920.71	36.88	2414.76	-2414.76	1-3	

Kz= 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1009.81	11.63	666.80	-666.80	13-15
	26.06	1243.71	21.72	1245.54	-1245.54	10-12
	35.49	2272.08	29.58	1696.29	-1696.29	7-9
	41.69	2539.39	34.75	1992.59	-1992.59	4-6
44.26	3682.85	36.88	2115.00	-2115.00	1-3	

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	757.36	11.63	666.80	-666.80	13-15
	26.06	932.78	21.72	1245.54	-1245.54	10-12
	35.49	1704.06	29.58	1696.29	-1696.29	7-9
	41.69	1904.54	34.75	1992.59	-1992.59	4-6
44.26	2762.14	36.88	2115.00	-2115.00	1-3	

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	504.91	11.63	666.80	-666.80	13-15
	26.06	621.85	21.72	1245.54	-1245.54	10-12
	35.49	1136.04	29.58	1696.29	-1696.29	7-9
	41.69	1269.69	34.75	1992.59	-1992.59	4-6
44.26	1841.43	36.88	2115.00	-2115.00	1-3	

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	252.45	11.63	666.80	-666.80	13-15
	26.06	310.93	21.72	1245.54	-1245.54	10-12
	35.49	568.02	29.58	1696.29	-1696.29	7-9
	41.69	634.85	34.75	1992.59	-1992.59	4-6
44.26	920.71	36.88	2115.00	-2115.00	1-3	

A8.3. Secciones de diseño de los modelos α=75%

Tabla A70. Columnas modelo de 15 niveles α=75%				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	90 x 90	30 # 10	0.029	4 # 4 @ 15
6-10	80 x 80	28 # 10	0.030	4 # 3 @ 15
11-15	70 x70	18 # 10	0.029	2 # 3 @ 20

Tabla A71. Vigas modelo de 15 niveles $\alpha=75\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	70 x 100	6 # 10 + 3 # 8	5 # 10 + 3 # 8	4 # 3 @ 15
6-10	60 x 90	6 # 10 + 3 # 8	5 # 10 + 3 # 6	3 # 3 @ 15
11-15	50 x 70	6 # 8 + 3 # 6	4 # 8 + 3 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A72. Diagonales de contraventeo modelo de 15 niveles $\alpha=75\%$

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-3	45.72	1.59	142.64
4-6	33.02	1.59	102.32
7-9	27.94	1.59	86.19
10-12	20.32	1.27	50.00
13-15	15.24	1.27	37.10

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$

K2= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	341.56	11.63	420.59	-420.59	13-15
	26.06	460.36	21.71	785.35	-785.35	10-12
	35.48	793.56	29.57	1069.55	-1069.55	7-9
	41.68	942.06	34.74	1256.43	-1256.43	4-6
	44.24	1313.32	36.87	1333.65	-1333.65	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	256.17	11.63	420.59	-420.59	13-15
	26.06	345.27	21.71	785.35	-785.35	10-12
	35.48	595.17	29.57	1069.55	-1069.55	7-9
	41.68	706.55	34.74	1256.43	-1256.43	4-6
	44.24	984.99	36.87	1333.65	-1333.65	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	170.78	11.63	420.59	-420.59	13-15
	26.06	230.18	21.71	785.35	-785.35	10-12
	35.48	396.78	29.57	1069.55	-1069.55	7-9
	41.68	471.03	34.74	1256.43	-1256.43	4-6
	44.24	656.66	36.87	1333.65	-1333.65	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	85.39	11.63	420.59	-420.59	13-15
	26.06	115.09	21.71	785.35	-785.35	10-12
	35.48	198.39	29.57	1069.55	-1069.55	7-9
	41.68	235.52	34.74	1256.43	-1256.43	4-6
	44.24	328.33	36.87	1333.65	-1333.65	1-3

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	341.56	11.63	331.18	-331.18	13-15
	26.06	460.36	21.71	618.39	-618.39	10-12
	35.48	793.56	29.57	842.16	-842.16	7-9
	41.68	942.06	34.74	989.32	-989.32	4-6
	44.24	1313.32	36.87	1050.12	-1050.12	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	256.17	11.63	331.18	-331.18	13-15
	26.06	345.27	21.71	618.39	-618.39	10-12
	35.48	595.17	29.57	842.16	-842.16	7-9
	41.68	706.55	34.74	989.32	-989.32	4-6
	44.24	984.99	36.87	1050.12	-1050.12	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	170.78	11.63	331.18	-331.18	13-15
	26.06	230.18	21.71	618.39	-618.39	10-12
	35.48	396.78	29.57	842.16	-842.16	7-9
	41.68	471.03	34.74	989.32	-989.32	4-6
	44.24	656.66	36.87	1050.12	-1050.12	1-3

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	85.39	11.63	331.18	-331.18	13-15
	26.06	115.09	21.71	618.39	-618.39	10-12
	35.48	198.39	29.57	842.16	-842.16	7-9
	41.68	235.52	34.74	989.32	-989.32	4-6
	44.24	328.33	36.87	1050.12	-1050.12	1-3

K2= 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	341.56	11.63	290.07	-290.07	13-15
	26.06	460.36	21.71	541.62	-541.62	10-12
	35.48	793.56	29.57	737.62	-737.62	7-9
	41.68	942.06	34.74	866.50	-866.50	4-6
	44.24	1313.32	36.87	919.76	-919.76	1-3

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	256.17	11.63	290.07	-290.07	13-15
	26.06	345.27	21.71	541.62	-541.62	10-12
	35.48	595.17	29.57	737.62	-737.62	7-9
	41.68	706.55	34.74	866.50	-866.50	4-6
	44.24	984.99	36.87	919.76	-919.76	1-3

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	170.78	11.63	290.07	-290.07	13-15
	26.06	230.18	21.71	541.62	-541.62	10-12
	35.48	396.78	29.57	737.62	-737.62	7-9
	41.68	471.03	34.74	866.50	-866.50	4-6
44.24	656.66	36.87	919.76	-919.76	1-3	

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	85.39	11.63	290.07	-290.07	13-15
	26.06	115.09	21.71	541.62	-541.62	10-12
	35.48	198.39	29.57	737.62	-737.62	7-9
	41.68	235.52	34.74	866.50	-866.50	4-6
44.24	328.33	36.87	919.76	-919.76	1-3	

A9. Secciones de diseño de los modelos de 20 niveles y $\theta=45^\circ$

A9.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Tabla A73. Columnas modelo de 20 niveles $\alpha=25\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	120 x 120	42 # 12	0.033	6 # 4 @ 15
6-10	110 x 110	32 # 10	0.021	6 # 4 @ 15
11-15	100 x 100	20 # 8	0.010	4 # 4 @ 15
16-20	90 x 90	16 # 8	0.010	2 # 3 @ 15

Tabla A74. Vigas modelo de 20 niveles $\alpha=25\%$				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	80 x 120	7 # 8 + 4 # 6	4 # 8 + 4 # 6	6 # 4 @ 15
6-10	70 x 100	7 # 8 + 3 # 6	4 # 8 + 4 # 6	4 # 4 @ 15
11-15	60 x 90	6 # 8 + 3 # 6	4 # 8 + 2 # 6	4 # 3 @ 20
16-20	50 x 75	5 # 8 + 2 # 4	2 # 8 + 3 # 4	2 # 3 @ 20

Tabla A75. Diagonales de contraventeo modelo de 20 niveles $\alpha=25\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	77.47	21.59	2879.03
5-8	71.12	15.24	1935.48
9-12	67.31	12.70	1548.38
13-16	57.15	9.21	967.64
17-20	40.64	6.35	475.81

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$

K2= 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4380.81	11.63	2646.04	-2646.04	17-20
	26.21	8909.20	21.84	4970.07	-4970.07	13-16
	35.66	14256.21	29.72	6763.52	-6763.52	9-12
	41.93	17820.26	34.94	7951.46	-7951.46	5-8
	44.56	26507.64	37.13	8450.43	-8450.43	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3285.61	11.63	2646.04	-2646.04	17-20
	26.21	6681.90	21.84	4970.07	-4970.07	13-16
	35.66	10692.16	29.72	6763.52	-6763.52	9-12
	41.93	13365.20	34.94	7951.46	-7951.46	5-8
	44.56	19880.73	37.13	8450.43	-8450.43	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2190.41	11.63	2646.04	-2646.04	17-20
	26.21	4454.60	21.84	4970.07	-4970.07	13-16
	35.66	7128.10	29.72	6763.52	-6763.52	9-12
	41.93	8910.13	34.94	7951.46	-7951.46	5-8
	44.56	13253.82	37.13	8450.43	-8450.43	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1095.20	11.63	2646.04	-2646.04	17-20
	26.21	2227.30	21.84	4970.07	-4970.07	13-16
	35.66	3564.05	29.72	6763.52	-6763.52	9-12
	41.93	4455.07	34.94	7951.46	-7951.46	5-8
	44.56	6626.91	37.13	8450.43	-8450.43	1-4

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4380.81	11.63	2083.50	-2083.50	17-20
	26.21	8909.20	21.84	3913.44	-3913.44	13-16
	35.66	14256.21	29.72	5325.61	-5325.61	9-12
	41.93	17820.26	34.94	6260.99	-6260.99	5-8
	44.56	26507.64	37.13	6653.88	-6653.88	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3285.61	11.63	2083.50	-2083.50	17-20
	26.21	6681.90	21.84	3913.44	-3913.44	13-16
	35.66	10692.16	29.72	5325.61	-5325.61	9-12
	41.93	13365.20	34.94	6260.99	-6260.99	5-8
	44.56	19880.73	37.13	6653.88	-6653.88	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2190.41	11.63	2083.50	-2083.50	17-20
	26.21	4454.60	21.84	3913.44	-3913.44	13-16
	35.66	7128.10	29.72	5325.61	-5325.61	9-12
	41.93	8910.13	34.94	6260.99	-6260.99	5-8
	44.56	13253.82	37.13	6653.88	-6653.88	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1095.20	11.63	2083.50	-2083.50	17-20
	26.21	2227.30	21.84	3913.44	-3913.44	13-16
	35.66	3564.05	29.72	5325.61	-5325.61	9-12
	41.93	4455.07	34.94	6260.99	-6260.99	5-8
	44.56	6626.91	37.13	6653.88	-6653.88	1-4

K2= 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4380.81	11.63	1824.86	-1824.86	17-20
	26.21	8909.20	21.84	3427.64	-3427.64	13-16
	35.66	14256.21	29.72	4664.50	-4664.50	9-12
	41.93	17820.26	34.94	5483.77	-5483.77	5-8
	44.56	26507.64	37.13	5827.88	-5827.88	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3285.61	11.63	1824.86	-1824.86	17-20
	26.21	6681.90	21.84	3427.64	-3427.64	13-16
	35.66	10692.16	29.72	4664.50	-4664.50	9-12
	41.93	13365.20	34.94	5483.77	-5483.77	5-8
	44.56	19880.73	37.13	5827.88	-5827.88	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2190.41	11.63	1824.86	-1824.86	17-20
	26.21	4454.60	21.84	3427.64	-3427.64	13-16
	35.66	7128.10	29.72	4664.50	-4664.50	9-12
	41.93	8910.13	34.94	5483.77	-5483.77	5-8
	44.56	13253.82	37.13	5827.88	-5827.88	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1095.20	11.63	1824.86	-1824.86	17-20
	26.21	2227.30	21.84	3427.64	-3427.64	13-16
	35.66	3564.05	29.72	4664.50	-4664.50	9-12
	41.93	4455.07	34.94	5483.77	-5483.77	5-8
	44.56	6626.91	37.13	5827.88	-5827.88	1-4

A9.2. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=50\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	110 x 110	32 # 12	0.030	6 # 4 @ 15
6-10	100 x 100	32 # 10	0.025	4 # 4 @ 15
11-15	90 x 90	28 # 8	0.015	4 # 4 @ 15
16-20	80 x 80	16 # 8	0.011	2 # 3 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	80 x 120	6 # 10 + 4 # 8	4 # 10 + 4 # 8	4 # 4 @ 15
6-10	70 x 100	6 # 10 + 4 # 8	5 # 10 + 4 # 6	4 # 4 @ 15
11-15	60 x 90	5 # 10 + 3 # 8	4 # 10 + 4 # 6	4 # 3 @ 20
16-20	50 x 75	6 # 8 + 2 # 4	4 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	68.58	8.89	1140.32
5-8	53.34	7.62	754.84
9-12	44.45	7.62	619.35
13-16	38.10	5.72	402.82
17-20	33.02	3.18	199.60

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$ **K2= 0.00**

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1837.71	11.63	1420.59	-1420.59	17-20
	26.22	3708.84	21.85	2669.68	-2669.68	13-16
	35.68	5702.48	29.74	3633.19	-3633.19	9-12
	41.95	6949.90	34.96	4271.32	-4271.32	5-8
	44.59	10499.10	37.15	4539.48	-4539.48	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1378.29	11.63	1420.59	-1420.59	17-20
	26.22	2781.63	21.85	2669.68	-2669.68	13-16
	35.68	4276.86	29.74	3633.19	-3633.19	9-12
	41.95	5212.43	34.96	4271.32	-4271.32	5-8
	44.59	7874.33	37.15	4539.48	-4539.48	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	918.86	11.63	1420.59	-1420.59	17-20
	26.22	1854.42	21.85	2669.68	-2669.68	13-16
	35.68	2851.24	29.74	3633.19	-3633.19	9-12
	41.95	3474.95	34.96	4271.32	-4271.32	5-8
	44.59	5249.55	37.15	4539.48	-4539.48	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	459.43	11.63	1420.59	-1420.59	17-20
	26.22	927.21	21.85	2669.68	-2669.68	13-16
	35.68	1425.62	29.74	3633.19	-3633.19	9-12
	41.95	1737.48	34.96	4271.32	-4271.32	5-8
	44.59	2624.78	37.15	4539.48	-4539.48	1-4

K2= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1837.71	11.63	1118.58	-1118.58	17-20
	26.22	3708.84	21.85	2102.11	-2102.11	13-16
	35.68	5702.48	29.74	2860.78	-2860.78	9-12
	41.95	6949.90	34.96	3363.24	-3363.24	5-8
	44.59	10499.10	37.15	3574.40	-3574.40	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1378.29	11.63	1118.58	-1118.58	17-20
	26.22	2781.63	21.85	2102.11	-2102.11	13-16
	35.68	4276.86	29.74	2860.78	-2860.78	9-12
	41.95	5212.43	34.96	3363.24	-3363.24	5-8
	44.59	7874.33	37.15	3574.40	-3574.40	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	918.86	11.63	1118.58	-1118.58	17-20
	26.22	1854.42	21.85	2102.11	-2102.11	13-16
	35.68	2851.24	29.74	2860.78	-2860.78	9-12
	41.95	3474.95	34.96	3363.24	-3363.24	5-8
	44.59	5249.55	37.15	3574.40	-3574.40	1-4

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	459.43	11.63	1118.58	-1118.58	17-20
	26.22	927.21	21.85	2102.11	-2102.11	13-16
	35.68	1425.62	29.74	2860.78	-2860.78	9-12
	41.95	1737.48	34.96	3363.24	-3363.24	5-8
44.59	2624.78	37.15	3574.40	-3574.40	1-4	

K2= 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1837.71	11.63	979.72	-979.72	17-20
	26.22	3708.84	21.85	1841.16	-1841.16	13-16
	35.68	5702.48	29.74	2505.65	-2505.65	9-12
	41.95	6949.90	34.96	2945.74	-2945.74	5-8
44.59	10499.10	37.15	3130.68	-3130.68	1-4	

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1378.29	11.63	979.72	-979.72	17-20
	26.22	2781.63	21.85	1841.16	-1841.16	13-16
	35.68	4276.86	29.74	2505.65	-2505.65	9-12
	41.95	5212.43	34.96	2945.74	-2945.74	5-8
44.59	7874.33	37.15	3130.68	-3130.68	1-4	

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	918.86	11.63	979.72	-979.72	17-20
	26.22	1854.42	21.85	1841.16	-1841.16	13-16
	35.68	2851.24	29.74	2505.65	-2505.65	9-12
	41.95	3474.95	34.96	2945.74	-2945.74	5-8
44.59	5249.55	37.15	3130.68	-3130.68	1-4	

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	459.43	11.63	979.72	-979.72	17-20
	26.22	927.21	21.85	1841.16	-1841.16	13-16
	35.68	1425.62	29.74	2505.65	-2505.65	9-12
	41.95	1737.48	34.96	2945.74	-2945.74	5-8
44.59	2624.78	37.15	3130.68	-3130.68	1-4	

A9.3. Secciones de diseño de los modelos α=75%

Tabla A79. Columnas modelo de 20 niveles α=75%				
Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	115 x 115	38 # 10	0.023	6 # 4 @ 15
6-10	105 x 105	24# 10	0.017	6 # 4 @ 15
11-15	95 x 95	20 # 10	0.018	4 # 4 @ 15
16-20	85 x 85	14 # 10	0.015	2 # 4 @ 20

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	80 x 120	7 # 10 + 4 # 8	5 # 10 + 4 # 8	6 # 4 @ 15
6-10	70 x 100	7 # 10 + 3 # 8	6 # 10 + 2 # 8	4 # 4 @ 15
11-15	60 x 90	6 # 10 + 3 # 6	5 # 10 + 2 # 8	4 # 3 @ 15
16-20	50 x 75	6 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 3 # 6	2 # 3 @ 20

Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	41.91	3.81	304.84
5-8	33.02	3.18	199.60
9-12	25.40	3.49	165.22
13-16	21.59	2.54	103.23
17-20	21.59	1.27	53.23

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$

$K_2 = 0.00$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	490.06	11.63	619.12	-619.12	17-20
	26.21	950.41	21.84	1163.23	-1163.23	13-16
	35.68	1521.22	29.73	1583.03	-1583.03	9-12
	41.94	1837.71	34.95	1861.09	-1861.09	5-8
	44.58	2806.69	37.15	1977.92	-1977.92	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	367.54	11.63	619.12	-619.12	17-20
	26.21	712.81	21.84	1163.23	-1163.23	13-16
	35.68	1140.91	29.73	1583.03	-1583.03	9-12
	41.94	1378.29	34.95	1861.09	-1861.09	5-8
	44.58	2105.02	37.15	1977.92	-1977.92	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	245.03	11.63	619.12	-619.12	17-20
	26.21	475.21	21.84	1163.23	-1163.23	13-16
	35.68	760.61	29.73	1583.03	-1583.03	9-12
	41.94	918.86	34.95	1861.09	-1861.09	5-8
	44.58	1403.35	37.15	1977.92	-1977.92	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	122.51	11.63	619.12	-619.12	17-20
	26.21	237.60	21.84	1163.23	-1163.23	13-16
	35.68	380.30	29.73	1583.03	-1583.03	9-12
	41.94	459.43	34.95	1861.09	-1861.09	5-8
	44.58	701.67	37.15	1977.92	-1977.92	1-4

K₂= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	490.06	11.63	487.50	-487.50	17-20
	26.21	950.41	21.84	915.93	-915.93	13-16
	35.68	1521.22	29.73	1246.48	-1246.48	9-12
	41.94	1837.71	34.95	1465.43	-1465.43	5-8
	44.58	2806.69	37.15	1557.42	-1557.42	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	367.54	11.63	487.50	-487.50	17-20
	26.21	712.81	21.84	915.93	-915.93	13-16
	35.68	1140.91	29.73	1246.48	-1246.48	9-12
	41.94	1378.29	34.95	1465.43	-1465.43	5-8
	44.58	2105.02	37.15	1557.42	-1557.42	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	245.03	11.63	487.50	-487.50	17-20
	26.21	475.21	21.84	915.93	-915.93	13-16
	35.68	760.61	29.73	1246.48	-1246.48	9-12
	41.94	918.86	34.95	1465.43	-1465.43	5-8
	44.58	1403.35	37.15	1557.42	-1557.42	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	122.51	11.63	487.50	-487.50	17-20
	26.21	237.60	21.84	915.93	-915.93	13-16
	35.68	380.30	29.73	1246.48	-1246.48	9-12
	41.94	459.43	34.95	1465.43	-1465.43	5-8
	44.58	701.67	37.15	1557.42	-1557.42	1-4

K₂= 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	490.06	11.63	426.98	-426.98	17-20
	26.21	950.41	21.84	802.22	-802.22	13-16
	35.68	1521.22	29.73	1091.75	-1091.75	9-12
	41.94	1837.71	34.95	1283.51	-1283.51	5-8
	44.58	2806.69	37.15	1364.08	-1364.08	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	367.54	11.63	426.98	-426.98	17-20
	26.21	712.81	21.84	802.22	-802.22	13-16
	35.68	1140.91	29.73	1091.75	-1091.75	9-12
	41.94	1378.29	34.95	1283.51	-1283.51	5-8
	44.58	2105.02	37.15	1364.08	-1364.08	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	245.03	11.63	426.98	-426.98	17-20
	26.21	475.21	21.84	802.22	-802.22	13-16
	35.68	760.61	29.73	1091.75	-1091.75	9-12
	41.94	918.86	34.95	1283.51	-1283.51	5-8
	44.58	1403.35	37.15	1364.08	-1364.08	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	122.51	11.63	426.98	-426.98	17-20
	26.21	237.60	21.84	802.22	-802.22	13-16
	35.68	380.30	29.73	1091.75	-1091.75	9-12
	41.94	459.43	34.95	1283.51	-1283.51	5-8
	44.58	701.67	37.15	1364.08	-1364.08	1-4

A10. Secciones de diseño de los modelos de 25 niveles y $\theta=45^\circ$

A10.1. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=25\%$

Tabla A82. Columnas modelo de 25 niveles $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	150 x 150	52 # 12	0.026	6 # 4 @ 15
6-10	135 x 135	44 # 12	0.028	6 # 4 @ 15
11-15	120 x 120	28 # 10	0.015	6 # 4 @ 15
16-20	105 x 105	16 # 10	0.011	4 # 4 @ 15
21-25	90 x 90	16 # 8	0.010	2 # 3 @ 15

Tabla A83. Vigas modelo de 25 niveles $\alpha=25\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	90 x 130	8 # 8 + 2 # 6	6 # 8 + 3 # 6	6 # 4 @ 15
6-10	80 x 120	7 # 8 + 3 # 6	6 # 8 + 3 # 6	6 # 4 @ 15
11-15	70 x 100	8 # 8 + 2 # 4	6 # 8 + 2 # 6	4 # 4 @ 15
16-20	60 x 90	6 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 3 # 6	4 # 3 @ 15
21-25	50 x 75	4 # 8	3 # 8	2 # 3 @ 15

Tabla A84. Diagonales de contraventeo modelo de 25 niveles $\alpha=25\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	88.90	30.48	4490.31
5-8	76.20	24.77	3160.88
9-12	66.04	18.42	2093.14
13-17	53.34	12.70	1193.55
18-21	48.26	11.43	972.58
22-25	45.72	5.72	489.92

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=25\%$

K₂ = 0.00

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4510.75	11.63	2807.38	-2807.38	22-25
	26.74	8954.68	22.28	5379.96	-5379.96	18-21
	40.53	10989.16	33.77	8154.57	-8154.57	13-17
	49.09	19271.87	40.91	9878.05	-9878.05	9-12
	54.89	29102.71	45.74	11044.08	-11044.08	5-8
	57.31	41343.01	47.76	11531.90	-11531.90	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3383.07	11.63	2807.38	-2807.38	22-25
	26.74	6716.01	22.28	5379.96	-5379.96	18-21
	40.53	8241.87	33.77	8154.57	-8154.57	13-17
	49.09	14453.90	40.91	9878.05	-9878.05	9-12
	54.89	21827.04	45.74	11044.08	-11044.08	5-8
	57.31	31007.25	47.76	11531.90	-11531.90	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2255.38	11.63	2807.38	-2807.38	22-25
	26.74	4477.34	22.28	5379.96	-5379.96	18-21
	40.53	5494.58	33.77	8154.57	-8154.57	13-17
	49.09	9635.93	40.91	9878.05	-9878.05	9-12
	54.89	14551.36	45.74	11044.08	-11044.08	5-8
	57.31	20671.50	47.76	11531.90	-11531.90	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1127.69	11.63	2807.38	-2807.38	22-25
	26.74	2238.67	22.28	5379.96	-5379.96	18-21
	40.53	2747.29	33.77	8154.57	-8154.57	13-17
	49.09	4817.97	40.91	9878.05	-9878.05	9-12
	54.89	7275.68	45.74	11044.08	-11044.08	5-8
	57.31	10335.75	47.76	11531.90	-11531.90	1-4

K₂ = 0.03

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4510.75	11.63	2210.53	-2210.53	22-25
	26.74	8954.68	22.28	4236.19	-4236.19	18-21
	40.53	10989.16	33.77	6420.92	-6420.92	13-17
	49.09	19271.87	40.91	7777.99	-7777.99	9-12
	54.89	29102.71	45.74	8696.12	-8696.12	5-8
	57.31	41343.01	47.76	9080.24	-9080.24	1-4

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3383.07	11.63	2210.53	-2210.53	22-25
	26.74	6716.01	22.28	4236.19	-4236.19	18-21
	40.53	8241.87	33.77	6420.92	-6420.92	13-17
	49.09	14453.90	40.91	7777.99	-7777.99	9-12
	54.89	21827.04	45.74	8696.12	-8696.12	5-8
	57.31	31007.25	47.76	9080.24	-9080.24	1-4

β=50%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2255.38	11.63	2210.53	-2210.53	22-25
	26.74	4477.34	22.28	4236.19	-4236.19	18-21
	40.53	5494.58	33.77	6420.92	-6420.92	13-17
	49.09	9635.93	40.91	7777.99	-7777.99	9-12
	54.89	14551.36	45.74	8696.12	-8696.12	5-8
	57.31	20671.50	47.76	9080.24	-9080.24	1-4

β=25%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1127.69	11.63	2210.53	-2210.53	22-25
	26.74	2238.67	22.28	4236.19	-4236.19	18-21
	40.53	2747.29	33.77	6420.92	-6420.92	13-17
	49.09	4817.97	40.91	7777.99	-7777.99	9-12
	54.89	7275.68	45.74	8696.12	-8696.12	5-8
	57.31	10335.75	47.76	9080.24	-9080.24	1-4

K₂ = 0.05

β=100%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	4510.75	11.63	1936.12	-1936.12	22-25
	26.74	8954.68	22.28	3710.32	-3710.32	18-21
	40.53	10989.16	33.77	5623.84	-5623.84	13-17
	49.09	19271.87	40.91	6812.45	-6812.45	9-12
	54.89	29102.71	45.74	7616.61	-7616.61	5-8
	57.31	41343.01	47.76	7953.04	-7953.04	1-4

β=75%	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	3383.07	11.63	1936.12	-1936.12	22-25
	26.74	6716.01	22.28	3710.32	-3710.32	18-21
	40.53	8241.87	33.77	5623.84	-5623.84	13-17
	49.09	14453.90	40.91	6812.45	-6812.45	9-12
	54.89	21827.04	45.74	7616.61	-7616.61	5-8
	57.31	31007.25	47.76	7953.04	-7953.04	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	2255.38	11.63	1936.12	-1936.12	22-25
	26.74	4477.34	22.28	3710.32	-3710.32	18-21
	40.53	5494.58	33.77	5623.84	-5623.84	13-17
	49.09	9635.93	40.91	6812.45	-6812.45	9-12
	54.89	14551.36	45.74	7616.61	-7616.61	5-8
	57.31	20671.50	47.76	7953.04	-7953.04	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1127.69	11.63	1936.12	-1936.12	22-25
	26.74	2238.67	22.28	3710.32	-3710.32	18-21
	40.53	2747.29	33.77	5623.84	-5623.84	13-17
	49.09	4817.97	40.91	6812.45	-6812.45	9-12
	54.89	7275.68	45.74	7616.61	-7616.61	5-8
	57.31	10335.75	47.76	7953.04	-7953.04	1-4

A10.2. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=50\%$

Tabla A85. Columnas modelo de 25 niveles $\alpha=50\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	140 x 140	52 # 12	0.030	6 # 4 @ 15
6-10	125 x 125	32 # 12	0.023	6 # 4 @ 15
11-15	115 x 115	28 # 10	0.017	4 # 4 @ 15
16-20	100 x 100	24 # 8	0.010	4 # 4 @ 15
21-25	90 x 90	20 # 6	0.010	2 # 4 @ 20

Tabla A86. Vigas modelo de 25 niveles $\alpha=50\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	90 x 130	7 # 10 + 4 # 8	5 # 10 + 5 # 8	6 # 4 @ 15
6-10	80 x 120	8 # 10 + 3 # 8	6 # 10 + 4 # 8	4 # 4 @ 15
11-15	70 x 100	8 # 10 + 2 # 8	6 # 10 + 3 # 8	4 # 3 @ 15
16-20	60 x 90	6 # 10 + 3 # 8	4 # 10 + 4 # 8	2 # 3 @ 15
21-25	50 x 75	6 # 8 + 2 # 6	4 # 8 + 2 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A87. Diagonales de contraventeo modelo de 25 niveles $\alpha=50\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	76.20	13.34	1854.43
5-8	66.04	31.40	1238.71
9-12	50.80	8.89	824.19
13-17	50.80	5.08	490.32
18-21	43.18	5.08	412.90
22-25	30.48	3.49	200.71

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=50\%$

$K_2 = 0.00$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1847.92	11.63	1547.77	-1547.77	22-25
	26.63	3801.66	22.19	2953.71	-2953.71	18-21
	40.17	4514.47	33.48	4456.24	-4456.24	13-17
	48.51	7588.46	40.43	5381.46	-5381.46	9-12
	54.10	11404.97	45.09	6001.74	-6001.74	5-8
	56.44	17074.04	47.04	6261.21	-6261.21	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1385.94	11.63	1547.77	-1547.77	22-25
	26.63	2851.24	22.19	2953.71	-2953.71	18-21
	40.17	3385.85	33.48	4456.24	-4456.24	13-17
	48.51	5691.35	40.43	5381.46	-5381.46	9-12
	54.10	8553.73	45.09	6001.74	-6001.74	5-8
	56.44	12805.53	47.04	6261.21	-6261.21	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	923.96	11.63	1547.77	-1547.77	22-25
	26.63	1900.83	22.19	2953.71	-2953.71	18-21
	40.17	2257.23	33.48	4456.24	-4456.24	13-17
	48.51	3794.23	40.43	5381.46	-5381.46	9-12
	54.10	5702.48	45.09	6001.74	-6001.74	5-8
	56.44	8537.02	47.04	6261.21	-6261.21	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	461.98	11.63	1547.77	-1547.77	22-25
	26.63	950.41	22.19	2953.71	-2953.71	18-21
	40.17	1128.62	33.48	4456.24	-4456.24	13-17
	48.51	1897.12	40.43	5381.46	-5381.46	9-12
	54.10	2851.24	45.09	6001.74	-6001.74	5-8
	56.44	4268.51	47.04	6261.21	-6261.21	1-4

K2= 0.03

β=100%	Área (cm²)	Inercia (cm⁴)	Av (cm²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1847.92	11.63	1218.72	-1218.72	22-25
	26.63	3801.66	22.19	2325.75	-2325.75	18-21
	40.17	4514.47	33.48	3508.85	-3508.85	13-17
	48.51	7588.46	40.43	4237.37	-4237.37	9-12
	54.10	11404.97	45.09	4725.78	-4725.78	5-8
	56.44	17074.04	47.04	4930.09	-4930.09	1-4

β=75%	Área (cm²)	Inercia (cm⁴)	Av (cm²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1385.94	11.63	1218.72	-1218.72	22-25
	26.63	2851.24	22.19	2325.75	-2325.75	18-21
	40.17	3385.85	33.48	3508.85	-3508.85	13-17
	48.51	5691.35	40.43	4237.37	-4237.37	9-12
	54.10	8553.73	45.09	4725.78	-4725.78	5-8
	56.44	12805.53	47.04	4930.09	-4930.09	1-4

β=50%	Área (cm²)	Inercia (cm⁴)	Av (cm²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	923.96	11.63	1218.72	-1218.72	22-25
	26.63	1900.83	22.19	2325.75	-2325.75	18-21
	40.17	2257.23	33.48	3508.85	-3508.85	13-17
	48.51	3794.23	40.43	4237.37	-4237.37	9-12
	54.10	5702.48	45.09	4725.78	-4725.78	5-8
	56.44	8537.02	47.04	4930.09	-4930.09	1-4

β=25%	Área (cm²)	Inercia (cm⁴)	Av (cm²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	461.98	11.63	1218.72	-1218.72	22-25
	26.63	950.41	22.19	2325.75	-2325.75	18-21
	40.17	1128.62	33.48	3508.85	-3508.85	13-17
	48.51	1897.12	40.43	4237.37	-4237.37	9-12
	54.10	2851.24	45.09	4725.78	-4725.78	5-8
	56.44	4268.51	47.04	4930.09	-4930.09	1-4

K2= 0.05

β=100%	Área (cm²)	Inercia (cm⁴)	Av (cm²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1847.92	11.63	1067.43	-1067.43	22-25
	26.63	3801.66	22.19	2037.04	-2037.04	18-21
	40.17	4514.47	33.48	3073.27	-3073.27	13-17
	48.51	7588.46	40.43	3711.35	-3711.35	9-12
	54.10	11404.97	45.09	4139.13	-4139.13	5-8
	56.44	17074.04	47.04	4318.08	-4318.08	1-4

β=75%	Área (cm²)	Inercia (cm⁴)	Av (cm²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	1385.94	11.63	1067.43	-1067.43	22-25
	26.63	2851.24	22.19	2037.04	-2037.04	18-21
	40.17	3385.85	33.48	3073.27	-3073.27	13-17
	48.51	5691.35	40.43	3711.35	-3711.35	9-12
	54.10	8553.73	45.09	4139.13	-4139.13	5-8
	56.44	12805.53	47.04	4318.08	-4318.08	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	923.96	11.63	1067.43	-1067.43	22-25
	26.63	1900.83	22.19	2037.04	-2037.04	18-21
	40.17	2257.23	33.48	3073.27	-3073.27	13-17
	48.51	3794.23	40.43	3711.35	-3711.35	9-12
	54.10	5702.48	45.09	4139.13	-4139.13	5-8
	56.44	8537.02	47.04	4318.08	-4318.08	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	461.98	11.63	1067.43	-1067.43	22-25
	26.63	950.41	22.19	2037.04	-2037.04	18-21
	40.17	1128.62	33.48	3073.27	-3073.27	13-17
	48.51	1897.12	40.43	3711.35	-3711.35	9-12
	54.10	2851.24	45.09	4139.13	-4139.13	5-8
	56.44	4268.51	47.04	4318.08	-4318.08	1-4

A10.3. Secciones de diseño de los modelos $\alpha=75\%$

Tabla A88. Columnas modelo de 25 niveles $\alpha=75\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Barras	Cuantía (ρ)	
1-5	145 x 145	28 # 12	0.015	6 # 4 @ 15
6-10	130 x 130	32 # 10	0.015	6 # 4 @ 15
11-15	120 x 120	24 # 10	0.013	4 # 4 @ 15
16-20	105 x 105	32 # 8	0.013	4 # 4 @ 15
21-25	95 x 95	28 # 8	0.013	2 # 4 @ 15

Tabla A89. Vigas modelo de 25 niveles $\alpha=75\%$

Sección		Refuerzo a flexión		Refuerzo a cortante (en ramas de estribos)
Entrepisos	Dimensiones (cm)	Lecho superior	Lecho inferior	
1-5	90 x 130	8 # 12 + 2 # 8	6 # 12 + 3 # 8	6 # 4 @ 15
6-10	80 x 120	7 # 12 + 3 # 8	6 # 12 + 4 # 8	6 # 4 @ 15
11-15	70 x 100	7 # 12 + 2 # 8	6 # 12 + 2 # 8	4 # 4 @ 15
16-20	60 x 90	6 # 12 + 2 # 8	5 # 12 + 2 # 8	4 # 3 @ 15
21-25	50 x 75	6 # 10	4 # 10 + 2 # 6	2 # 3 @ 20

Tabla A90. Diagonales de contraventeo modelo de 25 niveles $\alpha=75\%$			
Entrepisos	Dimensiones (cm)		Área (cm ²)
	Ancho	Espesor	
1-4	50.80	5.08	490.32
5-8	43.18	4.13	339.41
9-12	31.75	3.81	227.42
13-17	25.40	2.54	122.58
18-21	22.86	2.54	109.68
22-25	21.59	1.27	53.23

➤ Propiedades de los disipadores de energía para los modelos $\alpha=75\%$

$K_2 = 0.00$

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	490.06	11.63	675.48	-675.48	22-25
	26.62	1009.81	22.19	1288.62	-1288.62	18-21
	40.17	1128.62	33.47	1944.19	-1944.19	13-17
	48.51	2093.88	40.42	2347.87	-2347.87	9-12
	54.10	3125.04	45.08	2618.45	-2618.45	5-8
	56.44	4514.47	47.03	2731.64	-2731.64	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	367.54	11.63	675.48	-675.48	22-25
	26.62	757.36	22.19	1288.62	-1288.62	18-21
	40.17	846.46	33.47	1944.19	-1944.19	13-17
	48.51	1570.41	40.42	2347.87	-2347.87	9-12
	54.10	2343.78	45.08	2618.45	-2618.45	5-8
	56.44	3385.85	47.03	2731.64	-2731.64	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	245.03	11.63	675.48	-675.48	22-25
	26.62	504.91	22.19	1288.62	-1288.62	18-21
	40.17	564.31	33.47	1944.19	-1944.19	13-17
	48.51	1046.94	40.42	2347.87	-2347.87	9-12
	54.10	1562.52	45.08	2618.45	-2618.45	5-8
	56.44	2257.23	47.03	2731.64	-2731.64	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	122.51	11.63	675.48	-675.48	22-25
	26.62	252.45	22.19	1288.62	-1288.62	18-21
	40.17	282.15	33.47	1944.19	-1944.19	13-17
	48.51	523.47	40.42	2347.87	-2347.87	9-12
	54.10	781.26	45.08	2618.45	-2618.45	5-8
	56.44	1128.62	47.03	2731.64	-2731.64	1-4

K₂= 0.03

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	490.06	11.63	531.88	-531.88	22-25
	26.62	1009.81	22.19	1014.67	-1014.67	18-21
	40.17	1128.62	33.47	1530.86	-1530.86	13-17
	48.51	2093.88	40.42	1848.72	-1848.72	9-12
	54.10	3125.04	45.08	2061.77	-2061.77	5-8
	56.44	4514.47	47.03	2150.90	-2150.90	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	367.54	11.63	531.88	-531.88	22-25
	26.62	757.36	22.19	1014.67	-1014.67	18-21
	40.17	846.46	33.47	1530.86	-1530.86	13-17
	48.51	1570.41	40.42	1848.72	-1848.72	9-12
	54.10	2343.78	45.08	2061.77	-2061.77	5-8
	56.44	3385.85	47.03	2150.90	-2150.90	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	245.03	11.63	531.88	-531.88	22-25
	26.62	504.91	22.19	1014.67	-1014.67	18-21
	40.17	564.31	33.47	1530.86	-1530.86	13-17
	48.51	1046.94	40.42	1848.72	-1848.72	9-12
	54.10	1562.52	45.08	2061.77	-2061.77	5-8
	56.44	2257.23	47.03	2150.90	-2150.90	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	122.51	11.63	531.88	-531.88	22-25
	26.62	252.45	22.19	1014.67	-1014.67	18-21
	40.17	282.15	33.47	1530.86	-1530.86	13-17
	48.51	523.47	40.42	1848.72	-1848.72	9-12
	54.10	781.26	45.08	2061.77	-2061.77	5-8
	56.44	1128.62	47.03	2150.90	-2150.90	1-4

K₂= 0.05

$\beta=100\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	490.06	11.63	465.85	-465.85	22-25
	26.62	1009.81	22.19	888.71	-888.71	18-21
	40.17	1128.62	33.47	1340.82	-1340.82	13-17
	48.51	2093.88	40.42	1619.22	-1619.22	9-12
	54.10	3125.04	45.08	1805.82	-1805.82	5-8
	56.44	4514.47	47.03	1883.89	-1883.89	1-4

$\beta=75\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	367.54	11.63	465.85	-465.85	22-25
	26.62	757.36	22.19	888.71	-888.71	18-21
	40.17	846.46	33.47	1340.82	-1340.82	13-17
	48.51	1570.41	40.42	1619.22	-1619.22	9-12
	54.10	2343.78	45.08	1805.82	-1805.82	5-8
	56.44	3385.85	47.03	1883.89	-1883.89	1-4

$\beta=50\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	245.03	11.63	465.85	-465.85	22-25
	26.62	504.91	22.19	888.71	-888.71	18-21
	40.17	564.31	33.47	1340.82	-1340.82	13-17
	48.51	1046.94	40.42	1619.22	-1619.22	9-12
	54.10	1562.52	45.08	1805.82	-1805.82	5-8
	56.44	2257.23	47.03	1883.89	-1883.89	1-4

$\beta=25\%$	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Av (cm ²)	My (+)	My (-)	Entrepiso
	13.95	122.51	11.63	465.85	-465.85	22-25
	26.62	252.45	22.19	888.71	-888.71	18-21
	40.17	282.15	33.47	1340.82	-1340.82	13-17
	48.51	523.47	40.42	1619.22	-1619.22	9-12
	54.10	781.26	45.08	1805.82	-1805.82	5-8
	56.44	1128.62	47.03	1883.89	-1883.89	1-4

APÉNDICE B. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CORTANTES SÍSMICOS BASADO EN LA RIGIDEZ LATERAL INICIAL.

Realizando un diagrama de cuerpo libre en la dirección en la que se analizaron todos los modelos, las rigideces elásticas que aportan cada uno de los marcos se señalan con la letra “K” (figura B.1). Siendo K_E los marcos externos que cuentan con el sistema de contraviento y de disipación de energía, y K_I los marcos internos donde el sistema del marco es el único actuando.

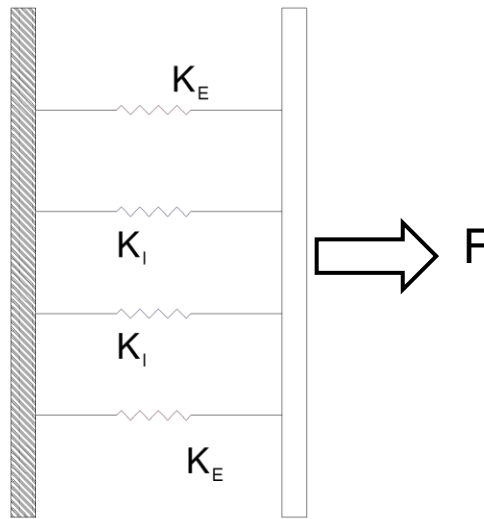


Figura B1. Diagrama de cuerpo libre de la estructura global en la dirección X

Lo anterior puede expresarse en forma de ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{V}{W} = F = 2K_E + 2K_I \quad (\text{B.1})$$

Las rigideces de los marcos exteriores e interiores, también pueden reescribirse de tal manera que expresen el uso de contravientos o exclusivamente del sistema del marco, por ejemplo:

$$K_I = K_M \quad (\text{B.2})$$

$$K_E = K_M + K_C \quad (\text{B.3})$$

donde:

K_M : es la rigidez que aporta el sistema del marco (vigas y columnas)

K_C : es la rigidez que aporta el sistema contraviento-disipador

Se debe recordar que en esta investigación se utilizó el parámetro “ α ”, para valorar el balance de rigidez que debía aportar el sistema del marco con respecto al del sistema global, es decir:

$$\alpha K_E = K_M \quad (\text{B.4})$$

$$K_E = \frac{K_M}{\alpha} \quad (\text{B.5})$$

Si sustituimos las ecuaciones B.2 y B.5 en la ecuación B.1, podemos hacer una simplificación de ésta con el objetivo de expresarla en función del parámetro α :

$$\frac{V}{W} = 2 \frac{K_M}{\alpha} + 2K_M \quad (\text{B.6})$$

$$0.5 \frac{V}{W} = \frac{K_M}{\alpha} + K_M \quad (\text{B.7})$$

Con la ecuación B.7 se puede conocer la resistencia que debe aportar cada marco en función del balance de rigidez α , por ejemplo:

➤ Si $\alpha=25\%$

$$0.5 \frac{V}{W} = \frac{K_M}{0.25} + K_M \quad (\text{B.8})$$

$$0.5 \frac{V}{W} = 5K_M \quad (\text{B.9})$$

$$K_I = K_M = 0.1 \frac{V}{W} \quad (\text{B.10})$$

La ecuación B.10 representa el valor que deberá aportar el marco interno exclusivamente, es decir, sin presencia del dispositivo disipador de energía, si se quiere conocer el valor correspondiente al marco externo se sustituye la ecuación resultante B.10 en la ecuación B.5:

$$K_E = \frac{0.1 \frac{V}{W}}{0.25} \quad (\text{B.11})$$

$$K_E = 0.4 \frac{V}{W} \quad (\text{B.12})$$

El procedimiento anterior se realizó para los distintos balances de α utilizados como se describe a continuación.

➤ Si $\alpha=50\%$

$$0.5 \frac{V}{W} = \frac{K_M}{0.50} + K_M \quad (\text{B.13})$$

$$0.5 \frac{V}{W} = 3K_M \quad (\text{B.14})$$

$$K_I = K_M = \frac{V}{6W} \quad (\text{B.15})$$

Sustituyendo B.15 en B.5

$$K_E = \frac{V}{3W} \quad (\text{B.16})$$

➤ Si $\alpha=75\%$

$$0.5 \frac{V}{W} = \frac{K_M}{0.75} + K_M \quad (\text{B.17})$$

$$0.5 \frac{V}{W} = \frac{7K_M}{3} \quad (\text{B.18})$$

$$K_I = K_M = \frac{3V}{14W} \quad (\text{B.19})$$

Sustituyendo B.20 en B.5

$$K_E = \frac{2V}{7W} \quad (\text{B.20})$$

En la tabla B.1 se resumen los resultados del aporte de resistencia tanto de los marcos externos como internos.

α	K_{INTERNO}	K_{EXTERNO}	Si $V/W = 0.10$ W_{TOTAL}
0.25	$0.1 V/W$	$0.4 V/W$	$0.04 W_{\text{TOTAL}}$
0.5	$V/ 6W$	$V/ 3W$	$0.03 W_{\text{TOTAL}}$
0.75	$3V/ 14W$	$2V/ 7W$	$0.0286 W_{\text{TOTAL}}$

Tabla B.1. Resumen del aporte de resistencia de los marcos internos y externos