



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

APLICACIÓN DE DISPOSICIONES DE NORMA CHILENA EN ESTUDIO PARA DISEÑO DE EDIFICIOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RAMIRO IGNACIO VILLAGRA GONZÁLEZ

Profesor Guía:

Mauricio Sarrazín Arellano

Miembros de la Comisión:

María Ofelia Moroni Yadlin

Diego López-García González

Santiago, Chile

2011

Resumen

El objetivo de este trabajo de título es evaluar la aplicabilidad de los métodos simplificados de análisis, propuestos en la norma chilena de diseño de edificios con disipadores actualmente en estudio. Se desea saber si estas metodologías son prácticas de aplicar para predecir el comportamiento global de estructuras con disipadores, sometidas a sismos chilenos, y comprobar si las estimaciones que entregan son lo suficientemente precisas cuando se analiza una estructura real.

Se eligieron tres estructuras altas de hormigón armado, una real y dos ficticias. Se construyó un modelo en ETABS® de las estructuras sismorresistentes y de los sistemas disipadores, representando la distribución espacial de las propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento. Las estructuras y los disipadores se diseñaron con el método modal espectral, para ser luego verificadas con el método dinámico no-lineal, considerando la no-linealidad de los disipadores.

Se observó que los diseños resultaron conservadores y que la capacidad de predicción del método estudiado es baja. Sin embargo, se constató que existen algunas limitaciones importantes del software utilizado que pudieran explicar, al menos en parte, la baja precisión de esta metodología. La más importante es la imposibilidad de ingresar los valores de amortiguamiento, según el cálculo establecido en la propuesta de norma, cuando se realizan análisis modales espectrales.

Finalmente, se proponen algunos caminos para evaluar, en primer lugar, el efecto de la mencionada imposibilidad de definir uno a uno los amortiguamientos modales y, en segundo, la diferencia en los resultados obtenidos con el método modal espectral y no-lineal de respuesta en el tiempo, producto de la concentración del amortiguamiento en algunos puntos de la estructura.

Mis mayores agradecimientos
a Tamara por su valiosa ayuda y apoyo incondicional,
a mi madre y madrina que me han guiado y acompañado,
y a todos quienes se han hecho parte de mi formación.

Índice general

1.	6
1.1. Introducción	6
1.2. Objetivos	7
1.3. Metodología	7
2. Disposiciones de la Propuesta de Norma	9
2.1. Procedimiento de Diseño	9
2.2. Procedimientos No-Lineales	15
2.3. Modificación de la Respuesta Amortiguada	16
3. Caracterización de Estructuras y Elementos Disipadores	21
3.1. Edificio de Marcos (Aldunate, 2009)	21
3.2. Edificio de Marco-Muro (Aldunate, 2009)	23
3.3. Edificio Titanium (Nuñez 2009)	25
3.4. Elección del Tipo de Disipador	27
3.5. Características de los Elementos Disipadores del Edificio Titanium	31
3.6. Ubicación de los Elementos Disipadores en Edificios de Marco y Marco-Muro	32
3.7. Ubicación de los Elementos Disipadores del Edificio Titanium	33
4. Modelación de Estructuras Sismorresistentes	35
4.1. Modelo Lineal Equivalente de los Disipadores	35
4.2. Modelamiento en ETABS®	40
4.3. Espectro de Respuesta	41
4.4. Análisis en el Tiempo	42
4.5. Registros Sísmicos Utilizados	43
5. Aplicación de Procedimientos de Análisis	48
5.1. Diseño por Análisis Modales Espectrales	49
5.2. Análisis de Edificio Titanium	63
5.3. Análisis de Resultados	71
6. Conclusión	75
6.1. Complejidad de la Metodología Estudiada	75
6.2. Aplicación a Otros Sistemas Disipadores	77

6.3. Análisis de Valores y Vectores Propios Complejos 77

Capítulo 1

1.1. Introducción

Se ha observado experimentalmente que el amortiguamiento intrínseco en las estructuras se reduce a medida que aumenta la altura de éstas (Willford 2008). Incluir disipadores de energía en edificios altos que eviten daños producto de sismos parece de suma importancia; sin embargo, el diseño y análisis de estos edificios no es sencillo.

En el capítulo 18 de la norma ASCE 7-05 se detallan métodos de análisis para estructuras con disipadores de energía que van desde análisis modales espectrales hasta análisis dinámicos no-lineales y las condiciones en que se aplica cada uno. Un comité relacionado con ACHISINA está preparando una normativa nacional, para lo cual ha traducido el documento anterior y propuesto algunas variantes a los métodos de análisis.

Los métodos permitidos en la norma ASCE 7-05 son:

Procedimiento de la respuesta espectral, procedimiento de carga lateral equivalente, procedimiento estático no-lineal y procedimiento no-lineal de respuesta en el tiempo. Este último se considera el más preciso para predecir el comportamiento de la estructura, para lo cual se requiere preparar un modelo matemático de la estructura sismorresistente y del sistema disipador. Dicho modelo debe considerar de manera directa el comportamiento no lineal de la estructura y de los disipadores.

Para aplicar los dos primeros métodos se necesita al menos un par de disipadores por piso, lo cual no siempre se justifica y no hay certeza que sus resultados se parezcan a los del análisis dinámico no-lineal. Estos métodos se originan en análisis de estructuras regulares en planta y altura (Ramirez et al 2002a). Schachter (2003) lo aplicó a una estructura industrial de acero dando buenos resultados pero con muy poca incursión en el campo no-lineal. Otra objeción a los métodos simplificados es que no consideran que el amortiguamiento de estas estructuras es no clásico, al estar concentrado en los disipadores. Existe cuantiosa literatura sobre la ubicación óptima de estos disipadores, sin embargo, un problema importante es determinar el amortiguamiento real de la estructura.

En la proposición del comité de ACHISINA se sugiere lo siguiente:

- Realizar un análisis modal espectral de la estructura sin disipadores para estimar desplazamientos posibles.

- Realizar un análisis modal espectral equivalente: análisis dinámico en que la estructura y los disipadores tienen comportamiento lineal. Estos últimos se representan por un amortiguador y un resorte equivalente cuyas propiedades dependen de los desplazamientos máximos alcanzados y/o de la frecuencia. Si el desplazamiento lineal resulta diferente de lo supuesto se debe iterar.
- Dimensionar los disipadores.
- Realizar un análisis no lineal de respuesta en el tiempo con los elementos definitivos.

1.2. Objetivos

Objetivo General:

- Estudiar la aplicabilidad de los procedimientos propuestos en la norma chilena de diseño de edificios con disipadores.

Objetivos Específicos:

- Entender los procedimientos de análisis de estructuras con disipadores de energía.
- Estudiar los supuestos y simplificaciones y validarlos mediante el análisis teórico de un edificio real.
- Aplicar la metodología de análisis a una estructura alta de hormigón armado, verificar que ésta permite dimensionar los disipadores y que genera un diseño seguro de la estructura.

1.3. Metodología

- Se eligieron tres estructuras altas de hormigón armado, una real y dos ficticias. El edificio TITANIUM ha sido elegido por ser el edificio más alto construido en Chile y contar, además, con disipadores de energía (Nuñez 2009). Por otro lado, se seleccionaron dos estructuras ficticias de 40 pisos (Aldunate 2009).
- Se consideró que las estructuras estuviesen localizadas en Santiago (zona sísmica 2) sobre suelos tipo II.
- Se seleccionaron disipadores tipo ADAS para las dos estructuras ficticias, mientras que para el edificio Titanium se utilizaron dispositivos U-shaped steel plates, idénticos a los que posee el edificio real.
- El dimensionamiento de los disipadores se realizó con el método modal espectral, usando el espectro de la norma NCh2745 of 2003. La propuesta de norma habla de dimensionar usando el espectro de la NCh 433, sin embargo, a la fecha de este estudio se encuentra en trámite el reemplazo de dicho espectro por el de la mencionada NCh2745 of 2003.
- Para la verificación del diseño se efectuaron análisis no-lineales de respuesta en el tiempo, utilizando registros reales obtenidos en los sismos de marzo de 1985 y de febrero de 2010.

- Finalmente se comparan los resultados obtenidos por el método simplificado y el modelo dinámico no-lineal, con el fin de evaluar la aplicabilidad de la metodología propuesta.

Capítulo 2

Disposiciones de la Propuesta de Norma

En este capítulo se describen las disposiciones que el proyecto de norma establece para el diseño de edificios con disipadores de energía, las cuales han sido tomadas de ASCE 7-05.

2.1. Procedimiento de Diseño

La estructura y los disipadores se deberán diseñar con el método modal espectral y verificar con el método dinámico no-lineal, considerando la no-linealidad de los disipadores.

Deberá construirse un modelo matemático de la estructura sismorresistente y del sistema disipador que represente la distribución espacial de las propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento. Las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los disipadores usadas en los modelos deberán estar basadas en (o verificadas mediante) ensayos de los disipadores.

2.1.1. Procedimiento de Espectro de Respuesta

2.1.1.1. Corte Basal Sísmico

El corte basal sísmico, V , de la estructura en una dirección dada deberá ser determinado como la combinación de las componentes modales, V_m , sujeto a los límites de la Ec. 2.1:

$$V \geq V_{min} \quad (2.1)$$

El corte basal sísmico, V , de la estructura deberá ser determinado por el método de la combinación cuadrática completa (CQC) de las componentes modales, V_m .

2.1.1.2. Corte Basal Mínimo

El corte basal usado para el diseño de la estructura sismorresistente no debe ser menor que V_{min} , donde V_{min} se determina como el mayor valor que resulte de las ec. 2.2 y 2.3, salvo que se verifique que si los disipadores dejan de trabajar la estructura sismorresistente satisface los desplazamientos de la norma NCh 433, caso en que se acepta usar valores menores que 0.6 V .

$$V_{min} = \frac{V}{B_{V+1}} \quad (2.2)$$

$$V_{min} = 0,6 V \quad (2.3)$$

donde:

- V : corte sísmico basal en la dirección de interés obtenido de aplicar la norma NCh 433, incluyendo los factores de reducción (sin disipadores).
- B_{V+1} : coeficiente numérico establecido en Tabla 2.1 para un amortiguamiento efectivo igual a la suma del amortiguamiento viscoso equivalente en el modo fundamental de vibración de la estructura en la dirección de interés, β_{vm} ($m=1$), más el amortiguamiento inherente, β_I , y período de la estructura igual a T_1 (sin disipadores).

2.1.1.3. Corte Basal Modal

El corte basal correspondiente al m -ésimo modo de vibración, V_m , de la estructura en la dirección de interés deberá determinarse según la Ec. 2.4 de la siguiente manera:

$$V_m = C_{Sm} \cdot \hat{W}_m \quad (2.4)$$

$$\hat{W}_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^{ns} W_{(s)i} \cdot \phi_{(s)im} \right)^2}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \phi_{im}^2} \quad (2.5)$$

en donde:

- n : Número total de grados de libertad de la estructura.
- ns : Número parcial de grados de libertad de la estructura, correspondiente a aquellos que se identifican con la dirección de análisis.
- ϕ_{im} : Amplitud de la i -ésima componente del m -ésimo modo de vibración de la estructura.
- $\phi_{(s)im}$: Amplitud de la i -ésima componente de la fracción del m -ésimo modo de vibración de la estructura, que contiene, exclusivamente, los grados de libertad en la dirección de interés.
- W_i : Peso sísmico asociado al i -ésimo grado de libertad de la estructura.
- $W_{(s)i}$: Peso sísmico asociado al i -ésimo grado de libertad de la estructura, en la dirección de interés.
- C_{Sm} : Coeficiente de respuesta sísmica correspondiente al m -ésimo modo de vibración de la estructura en la dirección de interés, determinado de acuerdo a lo indicado en la Sección 2.1.1.5 ($m = 1$) ó en la Sección 2.1.1.7 ($m > 1$).
- \hat{W}_m : Peso sísmico efectivo correspondiente al m -ésimo modo de vibración de la estructura.

2.1.1.4. Factores de Participación Modal

El factor de participación modal correspondiente al m-ésimo modo de vibración, Γ_m , de la estructura en la dirección de interés, deberá determinarse según la Ec. 2.6 de la siguiente manera:

$$\Gamma_m = \frac{\sum_{i=1}^{ns} W_{(s)i} \cdot \phi_{(s)im}}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \phi_{im}^2} \quad (2.6)$$

2.1.1.5. Coeficiente de Respuesta Sísmica del Modo Fundamental

El coeficiente de respuesta sísmica correspondiente al modo fundamental ($m = 1$), C_{S1} , en la dirección de interés deberá determinarse según las Ec. 2.7 y 2.8 de la siguiente manera:

Para $T_{1D} < T_S$

$$C_{S1} = \frac{R}{C_d} \frac{S_{DS}}{\Omega_0 B_{1D}} \quad (2.7)$$

Para $T_{1D} \geq T_S$

$$C_{S1} = \frac{R}{C_d} \frac{S_{D1}}{T_{1D}(\Omega_0 B_{1D})} \quad (2.8)$$

2.1.1.6. Determinación del Período Fundamental Efectivo

El período fundamental efectivo ($m = 1$) para el sismo de diseño, T_{1D} , y para el sismo máximo considerado, T_{1M} , deberá calcularse teniendo en cuenta explícitamente la relación no-lineal fuerza-desplazamiento de la estructura, ó según las Ecs. 2.9 y 2.10 de la siguiente manera:

$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu_D} \quad (2.9)$$

$$T_{1M} = T_1 \sqrt{\mu_M} \quad (2.10)$$

2.1.1.7. Coeficiente de Respuesta Sísmica de los Modos Superiores

El coeficiente de respuesta sísmica, C_{Sm} , correspondiente al m-ésimo modo superior de vibración ($m > 1$) de la estructura en la dirección de interés deberá determinarse según las Ecs. 2.11 y 2.12 de la siguiente manera:

Para $T_M < T_S$

$$C_{Sm} = \frac{R}{C_d} \frac{S_{DS}}{\Omega_0 B_{mD}} \quad (2.11)$$

Para $T_M \geq T_S$

$$C_{Sm} = \frac{R}{C_d} \frac{S_{D1}}{T_m(\Omega_0 B_{mD})} \quad (2.12)$$

en donde:

- T_m : período (en segundos) del m-ésimo modo de vibración de la estructura en la dirección considerada.
- B_{mD} : coeficiente numérico indicado en la Tabla 2.1 para un amortiguamiento efectivo igual a β_{mD} y un período de la estructura igual a T_m .

2.1.1.8. Factor de Reducción por Amortiguamiento

Tabla 2.1: Coeficiente de Reducción por Amortiguamiento (Ver nota al pie)

Amortiguamiento Efectivo	$B_{V+1}, B_{1D}, B_A, B_{1M}, B_{mD}, B_{1E}, o B_{mM}$
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.8
40	2.1
50	2.4
60	2.7
70	3.0
80	3.3
90	3.6
≥ 100	4.0

1

2.1.1.9. Fuerza Lateral de Diseño

La fuerza lateral de diseño en el nivel i debida al m -ésimo modo de vibración, F_{im}^i , de la estructura en la dirección de interés deberá determinarse según la Ec. 2.13 de la siguiente manera:

$$F_{im} = w_i \phi_{im} \frac{\Gamma_m}{\hat{W}_m} V_m \quad (2.13)$$

con: w_i = peso sísmico del piso i .

Las fuerzas de diseño en los elementos de la estructura sismorresistente deberán determinarse a través de la combinación CQC de las fuerzas modales de diseño.

¹Tabla tomada directamente de la norma ASCE 7-05. La actual propuesta de norma no incluye de manera explícita estos coeficientes de reducción, aunque hace mención a ellos. Estos valores no están en concordancia con los establecidos por la NCh 2745 of 2003, razón por la cuál se considerarán en este estudio los valores indicados en la normativa chilena.

2.1.2. Sistema Disipador

Las fuerzas de diseño en los disipadores y en los demás elementos del sistema disipador deberán determinarse considerando el desplazamiento lateral del piso, la deriva y la velocidad del piso descritos en las secciones siguientes.

Los desplazamientos y velocidades usados para determinar las fuerzas máximas en los disipadores de cada piso deberán considerar: (a) el ángulo entre la orientación del disipador y la horizontal; y (b) el incremento de respuesta debido a la torsión.

Los desplazamientos de piso en el nivel i , δ_{iD} y δ_{iM} , las derivas de diseño, Δ_{iD} y Δ_{iM} , y las velocidades de diseño de piso, ∇_{iD} y ∇_{iM} , deberán calcularse tanto para el sismo de diseño como para el sismo máximo considerado, de acuerdo a lo indicado en esta sección.

2.1.2.1. Desplazamiento de Piso para el Sismo de Diseño

El desplazamiento relativo de la estructura debido al sismo de diseño en el nivel i correspondiente al m -ésimo modo de vibración, δ_{imD} , de la estructura en la dirección de interés deberá determinarse según la Ec. 2.14 de la siguiente manera:

$$\delta_{im} = D_{mD}\phi_{im} \quad (2.14)$$

El desplazamiento total de cada piso de la estructura debido al sismo de diseño deberá calcularse a través de la combinación CQC de los desplazamientos modales debidos al sismo de diseño.

2.1.2.2. Desplazamiento de Techo para el Sismo de Diseño

Los desplazamientos de techo correspondientes al modo fundamental ($m = 1$) y a los modos superiores ($m > 1$) debidos al sismo de diseño, D_{1D} y D_{mD} , de la estructura en la dirección de interés deberán determinarse según las Ecs. 2.15, 2.16 y 2.17 de la siguiente manera:

Para $m = 1$,

$$D_{1D} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{DS}T_{1D}^2}{B_{1D}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{DS}T_1^2}{B_{1E}}, T_{1D} < T_S \quad (2.15)$$

$$D_{1D} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{D1}T_{1D}^2}{B_{1D}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{D1}T_1^2}{B_{1E}}, T_{1D} \geq T_S \quad (2.16)$$

Para $m > 1$,

$$D_{mD} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_m \frac{S_{D1}T_m}{B_{mD}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{DS}T_m^2}{B_{mD}} \quad (2.17)$$

2.1.2.3. Deformación de Entrepiso para el Sismo de Diseño

Las deformaciones de entrepiso debidas al sismo de diseño correspondientes a los modos fundamentales, Δ_{1D} , y superiores, Δ_{mD} , de la estructura en la dirección de interés deberán calcularse usando los desplazamientos de techo modales indicados.

La deformación de entrepiso total de cada piso de la estructura debida al sismo de diseño, Δ_D , deberá calcularse a través de la combinación CQC de las deformaciones modales de entrepiso debidas al sismo de diseño.

2.1.2.4. Velocidad de Piso para el Sismo de Diseño

Las velocidades de piso debidas al sismo de diseño correspondientes a los modos fundamentales, ∇_{1D} , y superiores, ∇_{mD} ($m > 1$), de la estructura en la dirección de interés deberán calcularse según las Ecs. 2.18 y 2.19 de la siguiente manera:

Para $m = 1$,

$$\nabla_{1D} = 2\pi \frac{\Delta_{1D}}{T_{1D}} \quad (2.18)$$

Para $m > 1$,

$$\nabla_{mD} = 2\pi \frac{\Delta_{mD}}{T_{mD}} \quad (2.19)$$

Donde:

Δ_{iD} = Deformación de entrepiso debida al sismo de diseño correspondiente al modo i .

La velocidad de piso total debida al sismo de diseño deberá determinarse a través de las combinaciones SRSS ó CQC de las velocidades modales debidas al sismo de diseño.

2.1.2.5. Respuesta para el Sismo Máximo

El desplazamiento de piso en el nivel i , los valores de diseño de deformación de entrepiso y los valores de diseño de velocidad de piso modales y totales debidos al sismo máximo deberán calcularse según lo indicado en las Secciones 2.1.2.1, 2.1.2.3 y 2.1.2.4, respectivamente, reemplazando el desplazamiento de techo para el sismo de diseño por el desplazamiento de techo para el sismo máximo. El desplazamiento de techo para el sismo máximo, en la dirección de interés, deberá calcularse según las Ecs. 2.20, 2.21 y 2.22 de la siguiente manera:

Para $m = 1$,

$$D_{1M} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{MS} T_{1M}^2}{B_{1M}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{MS} T_1^2}{B_{1E}}, T_{1M} < T_S \quad (2.20)$$

$$D_{1M} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \Gamma_1 \frac{S_{M1} T_{1M}}{B_{1M}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \frac{S_{M1} T_1}{B_{1E}}, T_{1M} \geq T_S \quad (2.21)$$

Para $m > 1$,

$$D_{mD} = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_m \frac{S_{M1} T_m}{B_{mM}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{MS} T_m^2}{B_{mM}} \quad (2.22)$$

en donde:

B_{mM} = coeficiente numérico indicado en la Tabla 2.1 para un amortiguamiento efectivo igual a β_{mM} y un período de la estructura igual a T_m .

2.2. Procedimientos No-Lineales

Las características no-lineales de la relación fuerza-deformación de los disipadores deberán ser modeladas teniendo en cuenta explícitamente la dependencia del disipador del contenido de frecuencia, la amplitud y la duración de la carga sísmica.

2.2.1. Procedimiento No-Linear de Respuesta en el Tiempo

Un análisis no-linear de respuesta en el tiempo deberá utilizar un modelo matemático de la estructura sismorresistente y del sistema disipador que se ajuste a lo indicado en la norma NCh433. El modelo de integración numérica deberá considerar de manera directa el comportamiento no-linear de los disipadores. Se emplearán conjuntos de excitaciones sísmicas compatibles con el espectro de respuesta de diseño correspondiente al sitio de emplazamiento.

En el análisis se deberá considerar una estructura lineal con amortiguamiento inherente de 5 % del crítico si ésta es de hormigón armado o de 3 % si es de acero.

2.2.1.1. Modelamiento del Disipador

Los modelos matemáticos de disipadores dependientes del desplazamiento deberán representar el comportamiento histerético de los disipadores de manera consistente con datos experimentales, y deberán tomar en cuenta todo cambio significativo de resistencia, rigidez, y forma del lazo histerético. Los modelos matemáticos de disipadores dependientes de la velocidad deberán incluir un coeficiente de velocidad que sea consistente con datos experimentales. Los elementos de los disipadores, que conectan partes del disipador con la estructura, deberán ser incluidos en el modelo.

2.2.1.2. Parámetros de Respuesta

Para cada excitación sísmica considerada en el análisis de respuesta en el tiempo deberán determinarse los siguientes parámetros de respuesta: valores máximos de las fuerzas y desplazamientos en cada disipador, y valores máximos de las velocidades en cada disipador dependiente de la velocidad.

Si se consideran al menos 7 excitaciones sísmicas para el análisis de la respuesta en el tiempo, los valores de diseño correspondientes a las fuerzas, desplazamientos y velocidades en los disipadores podrán considerarse iguales al promedio de los valores correspondientes a cada excitación sísmica.

Si se consideran menos de 7 excitaciones sísmicas para el análisis de la respuesta en el tiempo, los valores de diseño correspondientes a las fuerzas, desplazamientos y velocidades en los disipadores deberán ser iguales al máximo valor obtenido en los análisis. Deberán considerarse como mínimo tres excitaciones sísmicas.

2.2.2. Procedimiento Estático No-Lineal

La modelación no-lineal y las fuerzas laterales deberán ser aplicadas a la estructura sismorresistente. La curva fuerza-desplazamiento resultante deberá usarse en lugar del desplazamiento efectivo de fluencia asumido D_Y indicado por la Ec. 2.32 para calcular la demanda de ductilidad efectiva correspondiente al sismo de diseño μ_D y la demanda de ductilidad efectiva correspondiente al máximo sismo considerado μ_M en las Ecs. 2.30 y 2.31, respectivamente. El valor de (R/Cd) deberá ser igual a 1.0 en las Ecs. 2.7, 2.8, 2.11, y 2.12 (procedimiento de respuesta espectral).

2.3. Modificación de la Respuesta Amortiguada

Como lo requiere la Sección 2.1.1, la respuesta de la estructura deberá modificarse considerando los efectos del sistema de disipación.

2.3.1. Amortiguamiento Efectivo

El amortiguamiento efectivo para el desplazamiento de diseño, β_{mD} , y para el desplazamiento máximo, β_{mM} , correspondiente al modo m de vibración de la estructura en la dirección que se está considerando, deberá ser calculado usando las ecuaciones 2.23 y 2.24 siguientes:

$$\beta_{mD} = \beta_{I+} + \beta_{Vm} \sqrt{\mu_D} + \beta_{HD} \quad (2.23)$$

$$\beta_{mM} = \beta_{I+} + \beta_{Vm} \sqrt{\mu_M} + \beta_{HM} \quad (2.24)$$

Donde:

- β_{HD} : componente de amortiguamiento efectivo de la estructura en la dirección de interés debido al comportamiento histerético post-fluencia de la estructura sismorresistente y de los elementos del sistema de disipación, para la demanda de ductilidad efectiva, μ_D .
- β_{HM} : componente de amortiguamiento efectivo de la estructura en la dirección de interés debido al comportamiento histerético post-fluencia de la estructura sismorresistente y de los elementos del sistema de disipación, para la demanda de ductilidad efectiva, μ_M .
- β_I : componente de amortiguamiento de la estructura debido a la disipación de energía interna de los elementos de la estructura, para o por debajo del desplazamiento de fluencia efectivo de la estructura sismorresistente.
- β_{Vm} : componente de amortiguamiento efectivo del modo de vibración m de la estructura en la dirección de interés debido a la disipación viscosa equivalente de energía del sistema de disipación, para o por debajo del desplazamiento efectivo de fluencia de la estructura sismorresistente.
- μ_D : demanda de ductilidad efectiva del sistema resistente de las fuerzas sísmicas en la dirección de interés para el terremoto de diseño, según se define en Sección 2.3.2.
- μ_M : demanda de ductilidad efectiva de la estructura sismorresistente en la dirección de interés para el máximo terremoto considerado, según se define en Sección 2.3.2.

A no ser que el análisis o los datos experimentales justifiquen otros valores, la demanda de ductilidad efectiva de modos superiores de vibración en la dirección de interés deberá tomarse como 1.0.

2.3.1.1. Amortiguamiento Interno

El amortiguamiento interno, β_I , deberá basarse en el tipo de material, configuración y comportamiento de la estructura y de los componentes no estructurales que responden dinámicamente para o por debajo de la fluencia de la estructura sismorresistente. A no ser que el análisis o los datos experimentales justifiquen otros valores, el amortiguamiento interno no deberá tomarse mayor que 5 % del crítico para todos los modos de vibración.²

2.3.1.2. Amortiguamiento histerético

El amortiguamiento histerético del sistema sismorresistente (estructura sismorresistente más sistema amortiguador) deberá basarse ya sea en experimentación o análisis, o bien deberá calcularse usando las fórmulas 2.25 y 2.26 siguientes (basadas en comportamiento elasto-plástico):

$$\beta_{HD} = q_H (0,64 - \beta_I) \left(1 - \frac{1}{\mu_D}\right) \quad (2.25)$$

$$\beta_{HM} = q_H (0,64 - \beta_I) \left(1 - \frac{1}{\mu_M}\right) \quad (2.26)$$

q_H :factor de ajuste del ciclo de histéresis, según se define en la Sección 2.3.1.2.1

²Según el punto 2.2.1 en el análisis no-lineal se deberá considerar una estructura lineal con amortiguamiento interno de 5% del crítico si ésta es de hormigón armado o de 3% si es de acero.

A no ser que el análisis o los datos experimentales justifiquen otros valores, el amortiguamiento histerético de modos superiores de vibración en la dirección de interés deberá tomarse como cero.

2.3.1.2.1. Factor de ajuste de los ciclos de histéresis El cálculo del amortiguamiento histerético de la estructura sismorresistente y de los elementos del sistema disipador debe considerar degradación y otros efectos que reducen el área del ciclo de histéresis durante ciclos repetidos de demanda sísmica. A no ser que el análisis o los resultados experimentales sustenten otros valores, la fracción del área de un ciclo completo de histéresis del sistema resistente de las fuerzas sísmicas usado para el diseño deberá tomarse igual al factor, q_H , usando la ecuación 2.27 siguiente (considerando comportamiento elasto-plástico):

$$q_H = 0,67 \frac{T_S}{T_1} \quad (2.27)$$

donde:

T_S : período definido por la razón $\frac{S_{D1}}{S_{DS}}$.

T_1 : período del modo fundamental de vibración de la estructura en la dirección de interés.

El valor de q_H no deberá ser mayor que 1.0 y no es necesario que sea menor que 0.5.

2.3.1.3. Amortiguamiento Viscoso

El amortiguamiento viscoso del modo m de vibración de la estructura, β_{Vm} , deberá calcularse usando las ecuaciones 2.28 y 2.29 siguientes:

$$\beta_{Vm} = \frac{\sum_j W_{mj}}{4\pi W_m} \quad (2.28)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_i F_{im} \delta_{im} \quad (2.29)$$

W_{mj} : trabajo realizado por el disipador j en un ciclo completo de respuesta dinámica correspondiente al modo m de vibración de la estructura en la dirección de interés para el desplazamiento modal δ_{jm} .

W_m : energía de deformación máxima de la estructura en el modo m de vibración en la dirección de interés para el desplazamiento modal δ_{im} .

F_{im} : fuerza inercial del modo m en el Nivel i.

δ_{im} : desplazamiento del Nivel i para el modo m de vibración en el centro de rigidez de la estructura en la dirección considerada.

El amortiguamiento viscoso modal de dispositivos dependientes del desplazamiento deberá basarse en una amplitud de respuesta igual al desplazamiento efectivo de fluencia de la estructura.

El cálculo del trabajo realizado por los disipadores individuales deberá reducirse para tomar en cuenta la flexibilidad de los elementos, incluyendo pasadores, pernos, placas gusset, extensiones de las diagonales y otras componentes que conectan el aislador a otros elementos de la estructura.

2.3.2. Demanda de ductilidad efectiva

La demanda de ductilidad efectiva sobre la estructura sismorresistente debida al terremoto de diseño, μ_D , y debida al máximo terremoto considerado, μ_M , deberá calcularse mediante las ecuaciones 2.30, 2.31 y 2.32 siguientes:

$$\mu_D = \frac{D_{1D}}{D_Y} \geq 1,0 \quad (2.30)$$

$$\mu_M = \frac{D_{1M}}{D_Y} \geq 1,0 \quad (2.31)$$

$$D_Y = \frac{g}{4\pi^2} \frac{\Omega_0 C_d}{R} \Gamma_1 C_{S1} T_1^2 \quad (2.32)$$

donde:

- D_{1D} : desplazamiento de diseño del modo fundamental en el centro de rigidez de nivel de techo de la estructura en la dirección considerada. Sección 2.1.2.2
- D_{1M} : desplazamiento máximo del modo fundamental en el centro de rigidez de nivel de techo de la estructura en la dirección considerada. Sección 2.1.2.2
- D_Y : desplazamiento en el centro de rigidez del nivel de techo de la estructura para el punto de fluencia efectiva de la estructura sismorresistente.
- R : coeficiente de modificación de la respuesta.
- C_d : factor de amplificación de la deflexión.
- Ω_0 : factor de sobre-resistencia.
- Γ_1 : factor de participación del modo fundamental de la estructura en la dirección de interés. Sección 2.1.1.4(m=1).
- C_{S1} : coeficiente de respuesta sísmica del modo fundamental de vibración de la estructura en la dirección de interés. Sección 2.1.1.5(m=1).
- T_1 : período del modo fundamental de vibración de la estructura en la dirección de interés.

La demanda de ductilidad del terremoto de diseño, μ_D , no deberá exceder el máximo valor de la demanda de ductilidad efectiva, μ_M , dada en la Sección 2.3.3.

2.3.3. Demanda de Ductilidad Efectiva Máxima

Para determinar el factor de ajuste del ciclo de histéresis, el amortiguamiento hysterético y otros parámetros, el valor máximo de la demanda de ductilidad efectiva, μ_{max} , deberá calcularse mediante las ecuaciones 2.33 y 2.34 siguientes:

Para $T_{1D} \leq T_S$

$$\mu_{max} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{R}{\Omega_0 I} \right)^2 + 1 \right) \quad (2.33)$$

Para $T_1 \geq T_S$

$$\mu_{max} = \left(\frac{R}{\Omega_0 I} \right) \quad (2.34)$$

La demanda de ductilidad efectiva establecida en las ecuaciones 2.30 y 2.31 deberá tomarse igual a 1, puesto que el diseño considera que la estructura se mantendrá siempre en el rango elástico, permitiendo deformaciones plásticas sólo a los elementos disipadores. Por otra parte, en este estudio el amortiguamiento hysterético de los disipadores fue calculado en base a resultados experimentales, no siendo necesario utilizar las expresiones 2.33 y 2.34.

Capítulo 3

Caracterización de Estructuras y Elementos Disipadores

En esta sección se detallan las principales características estructurales de los edificios a analizar, tales como: dimensión de elementos estructurales, distribución en planta y elevación, características principales del material, cargas de diseño, entre otras. Además, se establecen las particularidades de los elementos disipadores, tales como: dimensiones físicas, características del material y curvas de histéresis.

3.1. Edificio de Marcos (Aldunate, 2009)

Las dimensiones de este edificio se detallan en las tablas 3.1 y 3.2:

Tabla 3.1: Dimensiones Generales de Edificio de Marcos

Espesor Losa	0.12 m
Largo Planta	30 m
Ancho Planta	20 m
Altura Entre Pisos	2.75 m

Tabla 3.2: Dimensiones de Elementos de Edificio de Marcos

Pisos	Viga Invertida V1		Viga V2		Columna	
	B[cm]	H[cm]	B[cm]	H[cm]	B[cm]	L[cm]
1-5	30	90	30	60	70	70
6-10	30	90	30	60	65	65
11-15	30	90	30	60	60	60
16-20	30	90	30	60	55	55
21-25	30	90	30	60	50	50
26-30	30	90	30	60	45	45
31-35	30	90	30	60	40	40
36-40	30	90	30	60	35	35

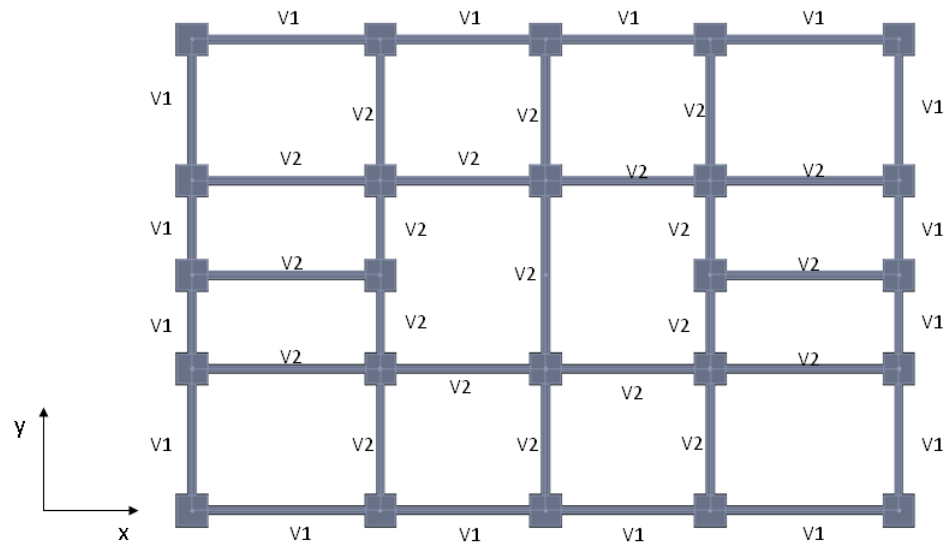


Figura 3.1: Planta de Edificio de Marcos

Los pesos y las propiedades mecánicas se indican en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Pesos y Propiedades Mecánicas Edificio de Marcos

Material	Hormigón Armado
Módulo de Elasticidad	3.000.000 tonf/m ²
Módulo de Poison	0.2
Peso Propio	2.4 tonf/m ³
Sobrecarga de uso	250 kgf/m ²
Cargas Muertas	200 kgf/m ²
Rango Pesos Sísmicos por Piso	471 tonf - 536 tonf

En la tabla 3.4 se presentan los períodos de los primeros 12 modos del edificio de marco.

Tabla 3.4: Períodos Naturales Edificio Marco

Modo	Período [s]
1	3.965
2	3.703
3	1.358
4	1.348
5	0.795
6	0.765
7	0.563
8	0.540
9	0.398
10	0.381
11	0.207
12	0.200

3.2. Edificio de Marco-Muro (Aldunate, 2009)

Las dimensiones de este edificio se detallan a continuación:

Tabla 3.5: Dimensiones Generales de Edificio de Marco-Muro

Espesor Losa	0.12 m
Largo Planta	30 m
Ancho Planta	20 m
Altura Entre Pisos	2.75 m

Tabla 3.6: Dimensiones de Elementos de Edificio de Marco-Muro

Pisos	Muro M1	Viga Invertida V1		Viga V2		Viga V3		Columna	
	e[cm]	B[cm]	H[cm]	B[cm]	H[cm]	B[cm]	H[cm]	B[cm]	L[cm]
1-5	55	55	90	55	60	55	45	140	140
6-10	50	50	90	50	60	50	45	130	130
11-15	45	45	90	45	60	45	45	120	120
16-20	40	40	90	40	60	40	45	110	110
21-25	35	35	90	35	60	35	45	100	100
26-30	30	30	90	30	60	30	45	90	90
31-35	25	25	90	25	60	25	45	80	80
36-40	20	20	90	20	60	20	45	70	70

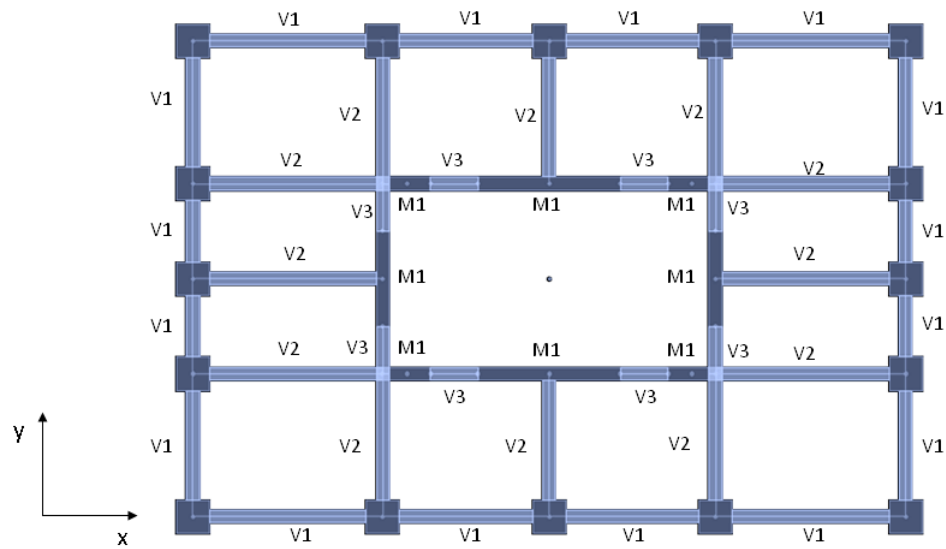


Figura 3.2: Planta de Edificio de Marco-Muro

Los pesos y las propiedades mecánicas se indican en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Pesos y Propiedades Mecánicas de Edificio de Marco-Muro

Material	Hormigón Armado
Módulo de Elasticidad	3.000.000 tonf/m ²
Módulo de Poison	0.2
Peso Propio	2.4 tonf/m ³
Sobrecarga de uso	250 kgf/m ²
Cargas Muertas	200 kgf/m ²
Rango Pesos Sísmicos por Piso	489 tonf - 840 tonf

En la tabla 3.8 se presentan los períodos de los primeros 12 modos del edificio de marco-muro.

Tabla 3.8: Períodos Naturales Edificio Marco-Muro

Modo	Período [s]
1	2.264
2	1.946
3	0.794
4	0.696
5	0.439
6	0.385
7	0.353
8	0.339
9	0.269
10	0.237
11	0.134
12	0.117

3.3. Edificio Titanium (Nuñez 2009)

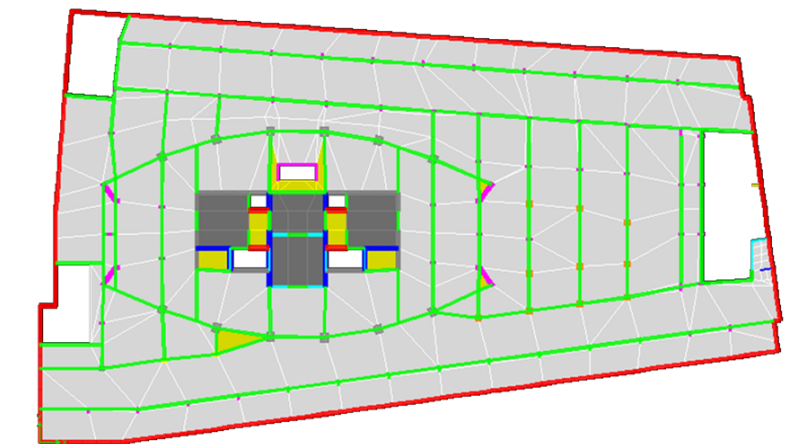


Figura 3.3: Planta de Subterráneo de Edificio Titanium

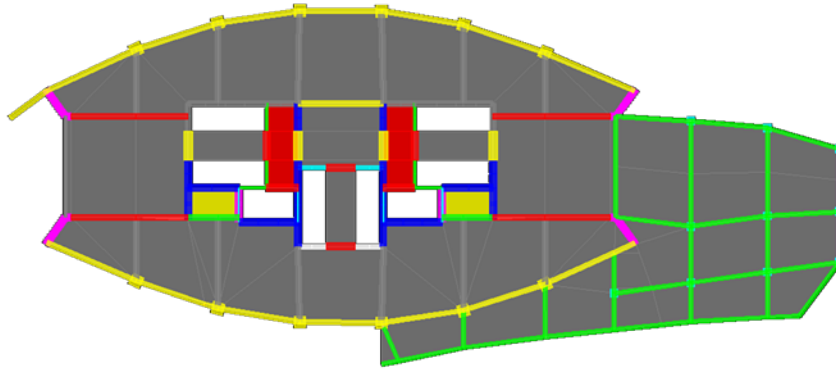


Figura 3.4: Planta de Pisos 1 al 15 de Edificio Titanium

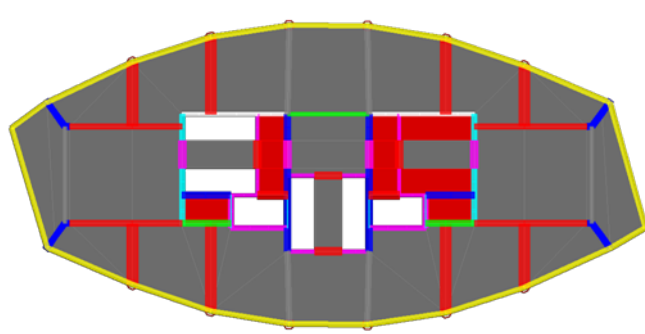


Figura 3.5: Planta de Pisos 16 al 52 de Edificio Titanium

Tabla 3.9: Dimensiones de Elementos de Edificio Titanium

Pisos	Muro Longitudinal	Muro Transversal	Columnas Centrales		Columnas Perimetrales	
	e[cm]	e[cm]	B[cm]	L[cm]	B[cm]	L[cm]
S7-S4	60	70	100	140	100	140
S3-S1	60	70	100	120	100	120
1-5	60	70	115	115	110	110
6-15	55	65	110	110	110	110
16-20	55	65	110	110	105	105
21-25	50	60	105	105	100	100
26-30	45	55	100	100	95	95
31-35	40	50	95	95	90	90
36-46	35	40	90	90	85	85
47-52	30	35	85	85	80	80

En la tabla 3.10 se presentan los períodos de los primeros 20 modos del edificio de marco-muro.

Tabla 3.10: Períodos Naturales Edificio Titanium

Modo	Período [s]
1	5.605
2	4.285
3	3.784
4	1.505
5	1.311
6	1.024
7	0.694
8	0.626
9	0.459
10	0.411
11	0.376
12	0.291
13	0.267
14	0.258
15	0.221
16	0.196
17	0.180
18	0.174
19	0.160
20	0.141

3.4. Elección del Tipo de Disipador

La elección de disipadores tipo ADAS obedece a una serie de consideraciones técnicas y prácticas, tanto para fines de este estudio como para su aplicación real, entre las que podemos mencionar:

- Su uso está ampliamente difundido en el mundo, incluso en Chile el edificio Titanium cuenta con dispositivos de fluencia similares a los tipo ADAS.
- Son más efectivos en la reducción de daño estructural que disipadores del tipo viscoso (Symans et al. 2008)
- La demanda de corte basal aumenta significativamente al aumentar la capacidad del disipador (Symans et al. 2008). Si bien estos esfuerzos deben ser acomodados en el diseño, para edificios altos este incremento de demanda puede ser absorbido en buena medida por el exceso de capacidad al corte establecido en la disposición 6.3.7 de la norma NCh433 Of96, produciendo una utilización más eficiente de la capacidad instalada en la estructura.

- Su comportamiento depende de la deformación alcanzada, no de la velocidad a la que alcance dicha deformación.

Entre las desventajas más importantes se puede mencionar que un aumento excesivo de la cantidad de disipadores en la estructura puede provocar un incremento en las aceleraciones experimentadas bajo carga sísmica. Por otro lado, como la energía disipada es el resultado del comportamiento inelástico del material los disipadores se dañan después de un terremoto y puede ser necesario reemplazarlos.

Los disipadores metálicos tipo ADAS, consisten en una serie de placas conectadas por medio de riostras tipo K o tipo X con las vigas de las estructuras. Cuando el nivel superior se desplaza lateralmente con respecto al piso inferior, las placas metálicas quedan sujetas al esfuerzo cortante. Las fuerzas de corte inducen momentos flectores sobre toda la altura de las placas en el eje débil de su sección transversal. La configuración geométrica de las placas es tal que el momento flector produce una distribución uniforme de las tensiones sobre la altura de ellas. Por lo tanto, una acción inelástica ocurre uniformemente sobre toda la altura de las placas. En el caso donde las placas tienen apoyo fijo-rotulado, la geometría es triangular. En el caso donde las placas tienen apoyos fijo-fijo, la geometría es similar a la de un reloj de arena. Para asegurar que la deformación relativa del dispositivo ADAS sea aproximadamente igual a la del piso donde está instalado, el sistema de arriostramiento debe ser suficientemente rígido.

Durante la respuesta elástica inicial del disipador ADAS, el dispositivo proporciona sólo rigidez. En la medida que éste fluye, la rigidez se reduce y ocurre la disipación de energía debido a la respuesta histerética inelástica. El comportamiento histerético del disipador ADAS puede ser representado por varios modelos matemáticos que describen el comportamiento en fluencia de los metales. Un ejemplo es el Bouc-Wen model (Wen 1976), el cual es descrito por Black et al. (2004) y es comparado con datos de pruebas experimentales. El modelo se define como:

$$P(t) = \beta K u(t) + (1 - \beta) K u_y Z(t) \quad (3.1)$$

Donde

β = razón de rigidez post-pre fluencia

K = rigidez pre fluencia

u_y = desplazamiento de fluencia

$Z(t)$ = variable evolutiva que está definida por:

$$u_y \dot{Z}(t) + \gamma |\dot{u}(t)| |Z(t)| |Z(t)|^{\delta-1} + \eta \dot{u}(t) |Z(t)|^\delta - \dot{u}(t) = 0 \quad (3.2)$$

Donde γ , δ , y η son parámetros adimensionales que definen la forma de la curva histerética. Por ejemplo, para valores grandes de δ , la transición del comportamiento elástico al inelástico es abrupta y la curva de histéresis se asocia a un modelo bilineal. Para análisis preliminares simplificados, un modelo idealizado bilineal puede ser suficiente para capturar las características globales de un disipador ADAS. Para análisis más detallados, existen otros modelos disponibles que capturan fenómenos como el endurecimiento isotrópico y cinético (ver Fahnestock et al. 2003). Como indica

la forma de la curva de histéresis ilustrada en la Figura 3.6, el comportamiento de los disipadores tipo ADAS es bastante bueno en términos de la capacidad de disipación de energía.

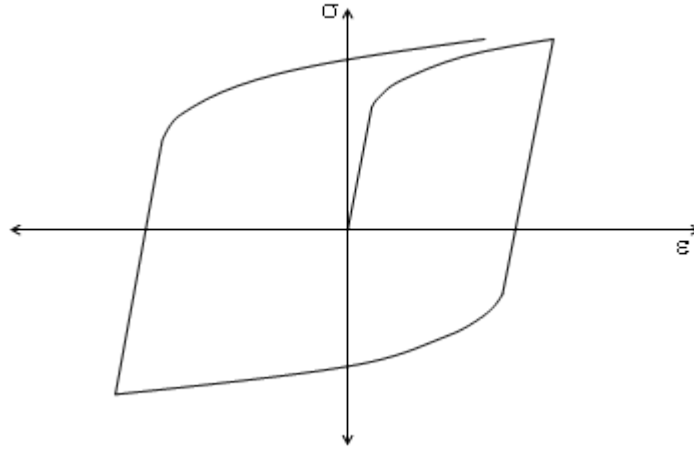


Figura 3.6: Curva de Histéresis de Disipadores ADAS
Symans (2008)

3.4.1. Características del Disipador Utilizado en Edificios de Marco y Marco Muro

En este trabajo se utilizan las propiedades de las placas disipadoras estudiadas por Vargas (2007) para el diseño del edificio de marco y de marco-muro, porque se ajustan al tipo de disipador escogido y por la detallada información que se dispone para fines de simulación.

Las placas ensayadas por J. Vargas corresponden a una aleación de cobre, zinc y aluminio, en las composiciones siguientes:

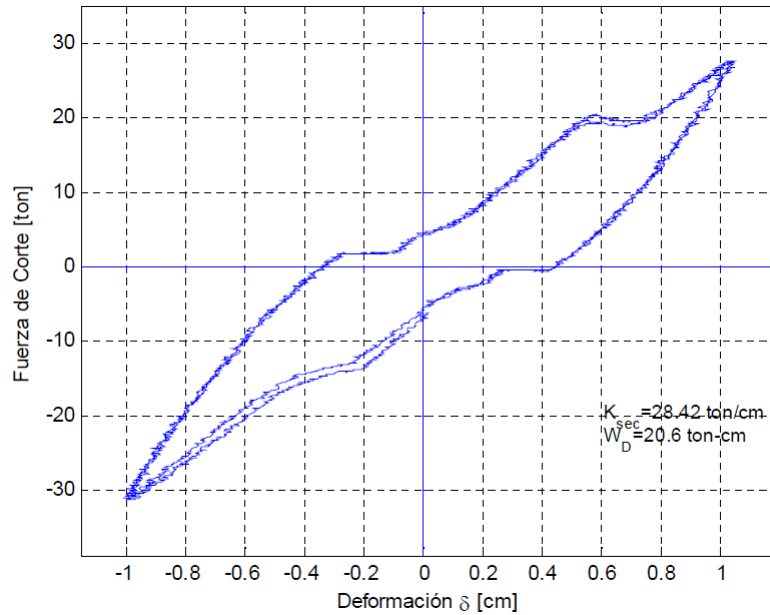
Tabla 3.11: Composición Química Placas Disipadoras

Colada	Cu	Zn	Al
1	73 %	21 %	6 %
2	74 %	20 %	6 %
3	74 %	20 %	6 %
4	73 %	21 %	6 %
5	74 %	20 %	6 %

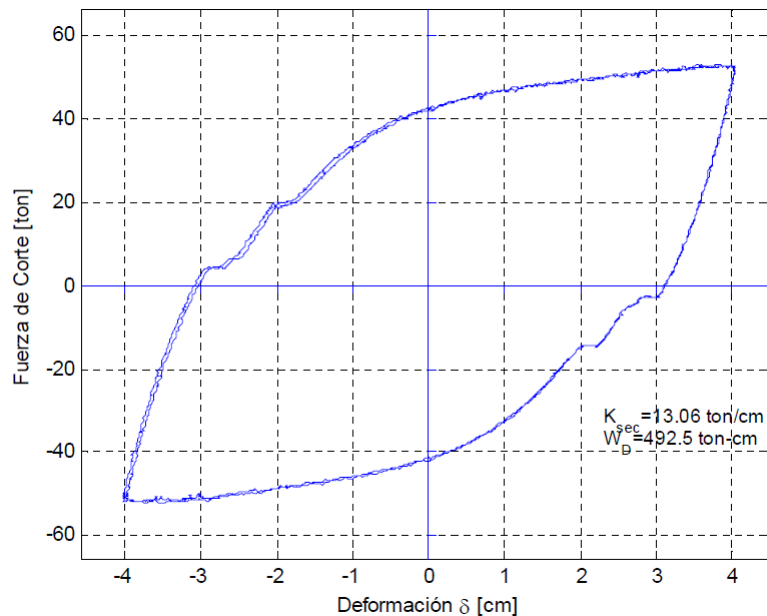
Las placas resultantes tienen una densidad $\rho = 8218 \text{ kg/m}^3$ y fueron confeccionadas con un espesor $e = 8 \text{ mm}$. En la figura 3.7 se esquematizan las principales dimensiones físicas de las placas disipadoras.

3.5. Características de los Elementos Disipadores del Edificio Titanium

En la figura 3.9 se muestra el resultado del ensayo de carga dinámica de corte con deformación controlada pseudo-estática (a 1 cm y 4 cm) a una probeta conformada por 12 placas U-Shape (velocidad de aplicación de la deformación: 120 mm/min, aprox.). La probeta está formada por dos módulos típicos de 6 placas (12 placas en total). El módulo de 6 placas es usado para ensamblar los disipadores presentes en las direcciones longitudinal y transversal del edificio Titanium.



Ensayo de Carga Dinámica con Deformación Controlada a 1 cm



Ensayo de Carga Dinámica con Deformación Controlada a 4 cm

Figura 3.9: Ensayos Seudoestáticos de Probeta de 12 Placas DICTUC

3.6. Ubicación de los Elementos Disipadores en Edificios de Marco y Marco-Muro

Existe mucha literatura sobre la ubicación óptima de los disipadores en una estructura, la que varía principalmente según el tipo de disipador y el tipo de estructura. Para fines de este estudio se considera una localización típica de los disipadores de energía, la cual consiste en la instalación cada 3 pisos de un set de placas disipadoras conectadas a un arriostramiento tipo X.

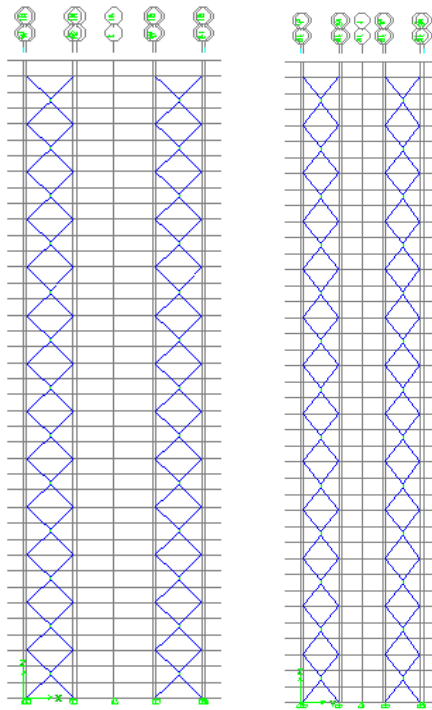


Figura 3.10: Vista en Elevación del Sistema Disipador - Ejes X e Y

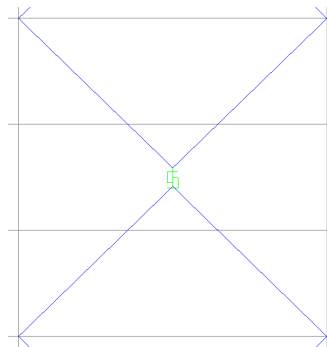


Figura 3.11: Detalle Arriostramiento - Disipador

Los arriostramientos son elementos tubulares de acero con diámetro exterior de 50cm y un espesor de 3cm. Es de vital importancia que los mencionados elementos sean suficientemente rígidos y resistentes para permitir que la deformación se localice en el disipador. Si este no fuera el caso, el arriostramiento podría sufrir pandeo o una falla local durante el evento sísmico que inutilizaría los disipadores en lo sucesivo.

3.7. Ubicación de los Elementos Disipadores del Edificio Titanium

Los disipadores de energía se encuentran colocados en riostras tipo X, tanto en la dirección transversal como longitudinal, y trabajan por fluencia. Los disipadores transversales (Figura 3.14) se distribuyen desde el piso 14 hacia arriba en el sector poniente (izquierda) y desde el piso 17 hacia arriba en el sector oriente (derecha), ambos cada tres pisos. Los disipadores longitudinales (Figura 3.14) se encuentran en el sector del núcleo, soportados por muros dilatados, a partir del piso 23 y distribuidos cada tres pisos.

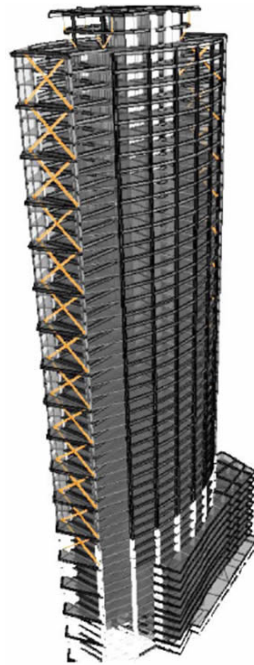


Figura 3.12: Ubicación Disipadores Edificio Titanium

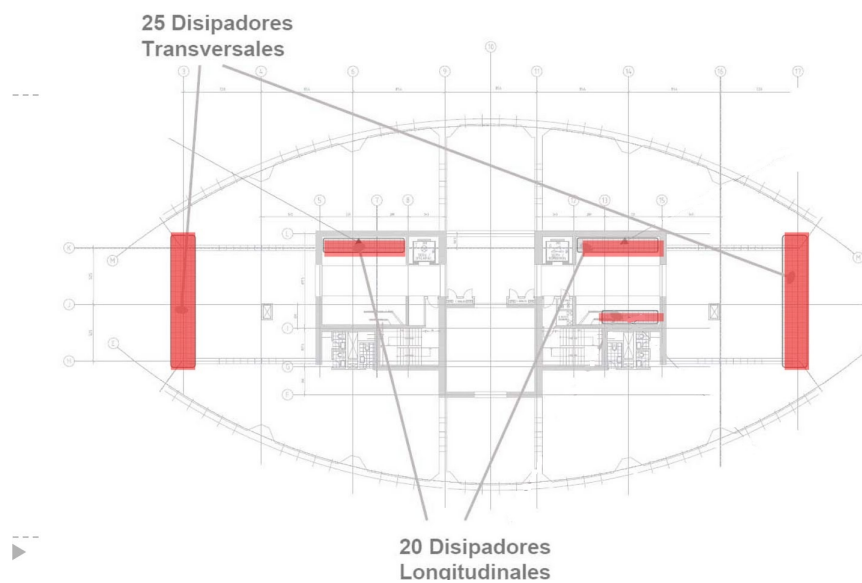


Figura 3.13: Ubicación Disipadores Edificio Titanium - Vista en Planta
Contreras, Soto (2009)



Figura 3.14: Disipadores Titanium (Izq.: Elementos Longitudinales; Der: Elementos Transversales)
Nuñez (2009)

Capítulo 4

Modelación de Estructuras Sismorresistentes

En el presente capítulo se detallan los principales supuestos y parámetros relevantes utilizados en la simulación. Además, se ilustra la manera de materializar en ETABS el modelo conceptual de la estructura sismorresistente.

4.1. Modelo Lineal Equivalente de los Disipadores

La metodología establecida en la propuesta de norma sugiere el diseño por medio de un proceso iterativo de análisis dinámicos lineales de la estructura sin y con elementos disipadores. Es decir, se reemplaza el comportamiento histérico de los disipadores por una rigidez y amortiguamiento efectivo equivalente. Cuando se modela en ETABS® este amortiguamiento equivalente debe ser de tipo viscoso.

En este tipo de análisis, el software convierte automáticamente el amortiguamiento concentrado en los disipadores en un amortiguamiento modal. El amortiguamiento es posteriormente sumado al intrínseco de la estructura, el que fue considerado como 2 % para todos los análisis. Este procedimiento no es bueno cuando el amortiguamiento está concentrado en sólo algunos puntos de la estructura sismorresistente, sin embargo, la forma de representarlo correctamente sigue siendo un problema abierto de la ingeniería estructural y los software comerciales disponibles no permiten utilizar ninguno de los procedimientos propuestos hoy en día por la literatura especializada.

4.1.1. Modelo Bilineal de Disipadores de Edificios de Marco y Marco-Muro

Como primer paso, se decidió simplificar la curva de histéresis de los disipadores escogidos, reemplazándola por un modelo bilineal. Esto para simplificar los cálculos de propiedades lineales equivalentes y para que dichas propiedades sean consistentes con aquellas calculadas por el análisis no lineal en el tiempo, debido a que ETABS® sólo admite el uso de curvas bilineales en elementos disipadores.

Se encontró una relación cuadrática entre el desplazamiento máximo y el trabajo real realizado. Por otra parte, los modelos bilineales tienen una relación lineal entre dichos parámetros. Para ajustar el modelo se optó por minimizar el error de cálculo de energía disipada para los desplazamientos superiores a 15mm. El ajuste resultante se ilustra en la figura 4.1.

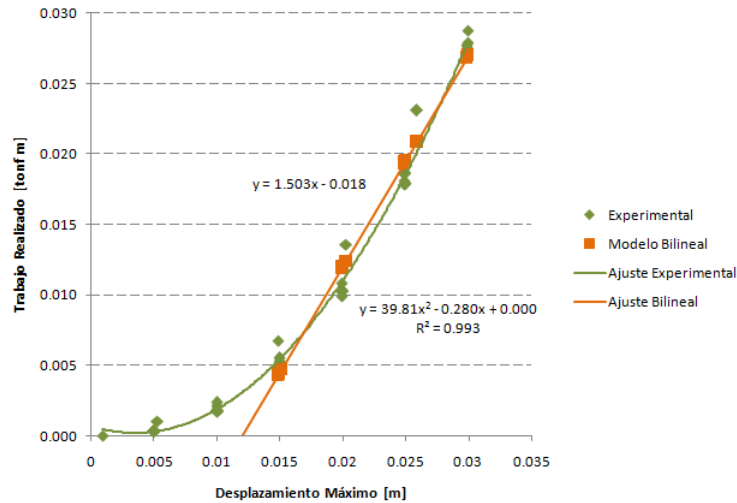


Figura 4.1: Curva de Ajuste Modelo Bilineal - 1 Placa

El modelo bilineal que conduce a la mejor aproximación de energía disipada para el rango de deformaciones entre los 15 mm y los 30 mm viene dado por la ecuación 4.1 y tiene su representación gráfica según la figura 4.2.

$$F(d) = \begin{cases} 62,1 d & d \leq 0,012m \\ 30,8 d + 0,38 & d > 0,012m \end{cases} \quad (4.1)$$

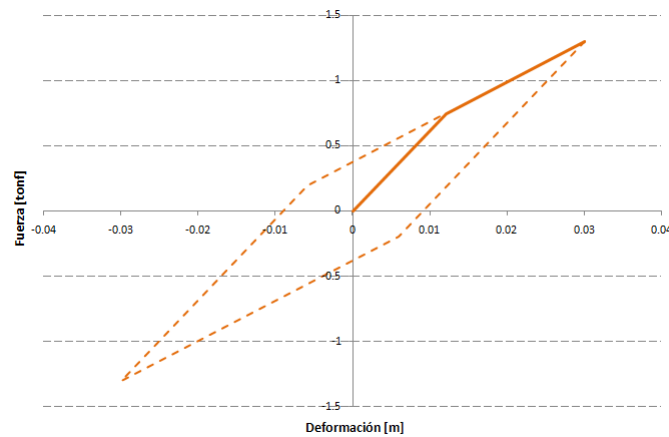


Figura 4.2: Modelo Bilineal

4.1.2. Modelo Bilineal de Disipadores del Edificio Titanium

En el caso de los disipadores instalados en el edificio Titanium, la cantidad de energía disipada es proporcional al desplazamiento máximo alcanzado, por lo que puede ser representada fácilmente por un modelo bilineal.

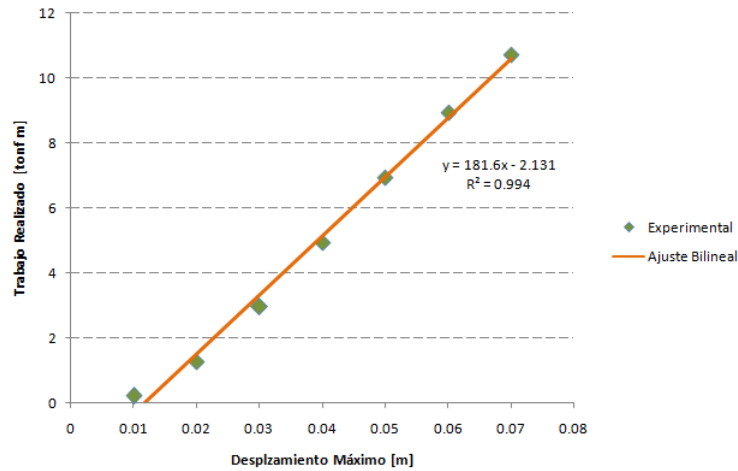


Figura 4.3: Curva de Ajuste Modelo Bilineal - 1 Placa

El modelo bilineal que conduce a la mejor aproximación de energía disipada viene dado por la ecuación 4.2 y tiene su representación gráfica según la figura 4.4.

$$F(d) = \begin{cases} 278 d & d \leq 0,006m \\ 18,5 d + 1,54 & d > 0,006m \end{cases} \quad (4.2)$$

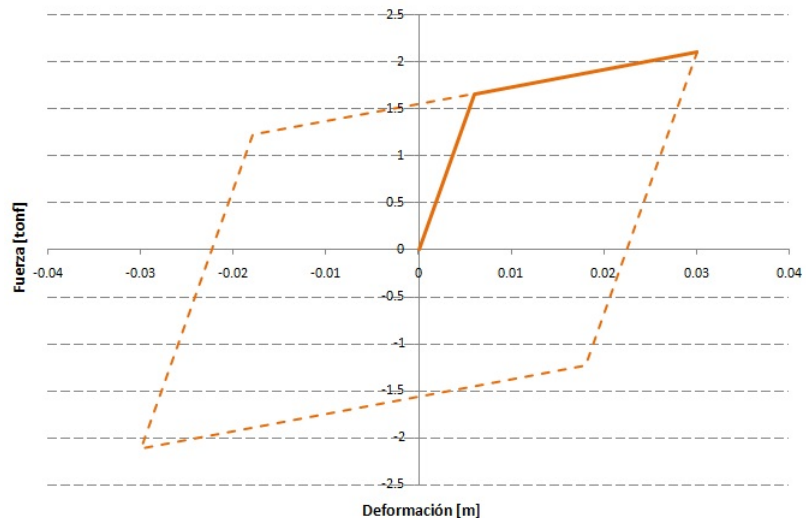


Figura 4.4: Modelo Bilineal - 1 Placa

4.1.3. Rigidez Equivalente

La literatura recomienda ampliamente el uso de la rigidez secante como rigidez efectiva de los elementos disipadores de energía.

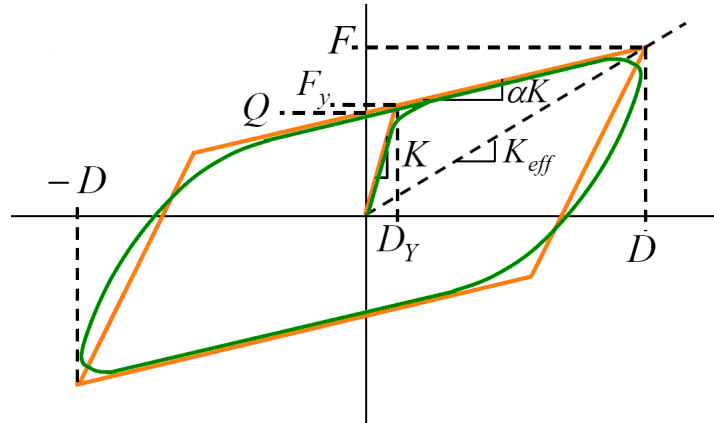


Figura 4.5: Esquema de Determinación de Rigidez Efectiva
Fuente: Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

$$K_{eff} = \frac{F}{D} \quad (4.3)$$

Por simplicidad se utiliza la misma rigidez equivalente para todos los elementos disipadores en una dirección de análisis, definida de la manera siguiente:

$$K_{eq} = \max_i \{K_{eff}^i\} \quad (4.4)$$

Donde el índice i indica cada uno de los disipadores instalados en la dirección de interés.

Esta simplificación es discutible desde el punto de vista teórico, debido a que los disipadores experimentan muy diversos niveles de deformación y, por lo tanto, una rigidez secante diferente a la que se ha definido. No obstante, esta consideración tiene un asidero práctico, puesto que en el ejercicio profesional es inviable definir propiedades individuales para cada elemento instalado en la estructura en cada una de las iteraciones de diseño.

4.1.4. Amortiguamiento Equivalente

Se entiende por amortiguamiento viscoso equivalente aquel valor de C que está asociado a un amortiguador viscoso virtual, y que al ser sometido a un desplazamiento, disipa la misma cantidad de energía que el disipador real al inducirle el mismo nivel de desplazamiento.

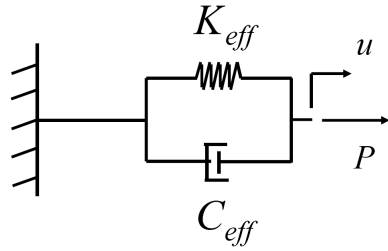


Figura 4.6

Si se considera la respuesta del disipador viscoso como $u = A \cos(\omega t - \phi)$ y la fuerza ejercida por el disipador como $F_d = C\dot{u}$, el diferencial de energía disipada se puede calcular según la ecuación (4.5).

$$dE_D = F_d du \quad (4.5)$$

La energía disipada durante un ciclo completo puede escribirse como:

$$E_D = \oint F_d du = \oint C\dot{u} \frac{du}{dt} dt = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} C\dot{u}^2 dt \quad (4.6)$$

$$\dot{u} = -A\omega \sin(\omega t - \phi) \quad (4.7)$$

$$E_D = CA^2\omega^2 \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sin^2(\omega t - \phi) dt \quad (4.8)$$

$$E_D = \pi CA^2\omega \quad (4.9)$$

Finalmente, el coeficiente viscoso se puede despejar de la expresión (4.9).

$$C = \frac{E_D}{\pi A^2\omega} \quad (4.10)$$

Donde:

A : Desplazamiento máximo del ciclo de histéresis.

E_D : Trabajo realizado por el disipador para el nivel de deformación A .

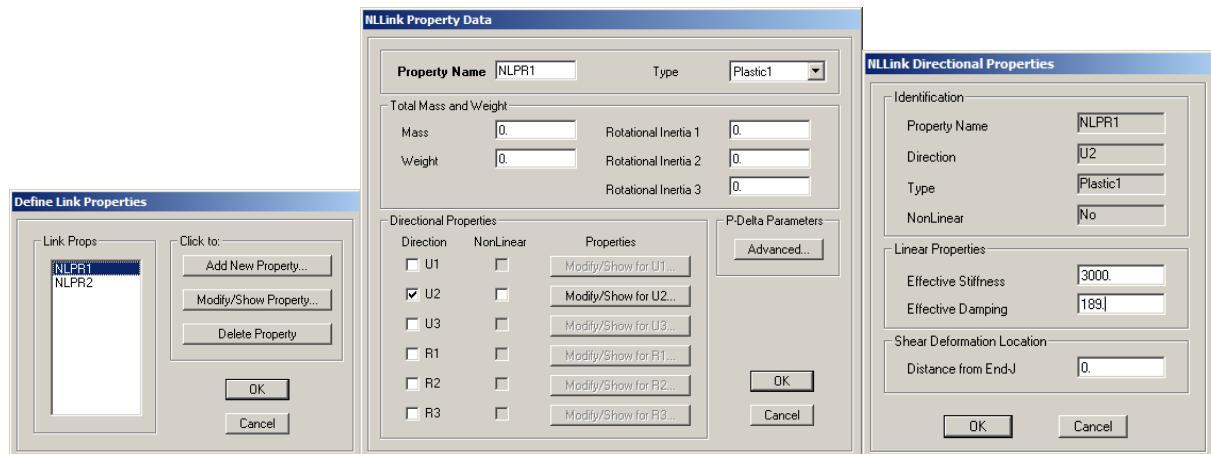
ω : Frecuencia del movimiento forzante.

Al realizar análisis dinámicos con registros reales no se puede identificar una frecuencia única de sollicitación, sin embargo, resulta razonable usar ω como la frecuencia del modo principal de la estructura en la dirección de interés, puesto que éste es principalmente el modo de vibrar que se desea amortiguar.

4.2. Modelamiento en ETABS®

La propuesta de norma en estudio propone realizar iteraciones sucesivas de análisis lineales de la estructura y los disipadores. En dichos análisis los dispositivos deben ser modelados con propiedades equivalentes a su comportamiento no-lineal al nivel de deformaciones estimadas, es decir, con una rigidez secante y un amortiguamiento efectivo que son función del desplazamiento máximo esperado.

ETABS® permite la modelación de dispositivos de fluencia como los ADAS mediante una propiedad NLLINK de tipo PLASTIC1, que puede ser asignada a una barra. Es importante conocer la orientación exacta de los ejes locales de la barra para poder asignar las propiedades en la dirección adecuada. En el ejemplo ilustrado a continuación, la dirección U2 coincide con el eje X en que están instalados los disipadores y es donde se espera que ejerzan trabajo mecánico.



(a) Creación de Propiedad

(b) Tipo y Dirección

(c) Asignación de Parámetros

Figura 4.7: Creación de Propiedades Lineales de Disipadores

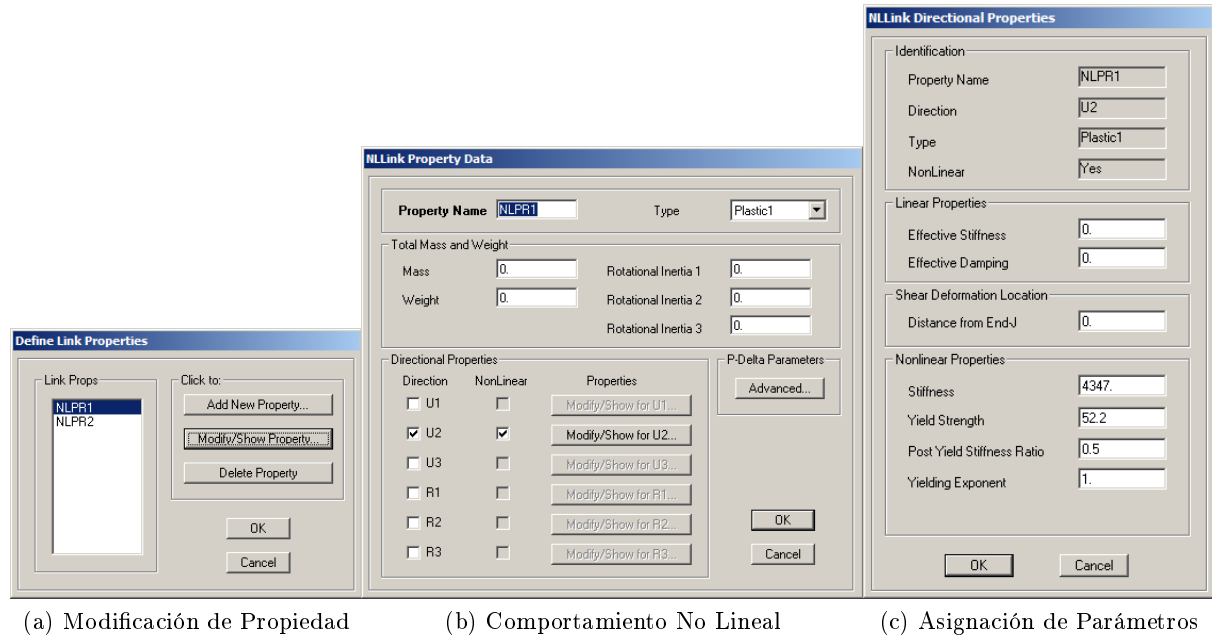


Figura 4.8: Creación de Propiedades No-Lineales de Disipadores

4.3. Espectro de Respuesta

El espectro de respuesta a utilizar será el de la norma de aislación sísmica NCh2745 of. 2003, debido a que este espectro entrega como resultado desplazamientos más acordes con la realidad, especialmente para períodos largos.

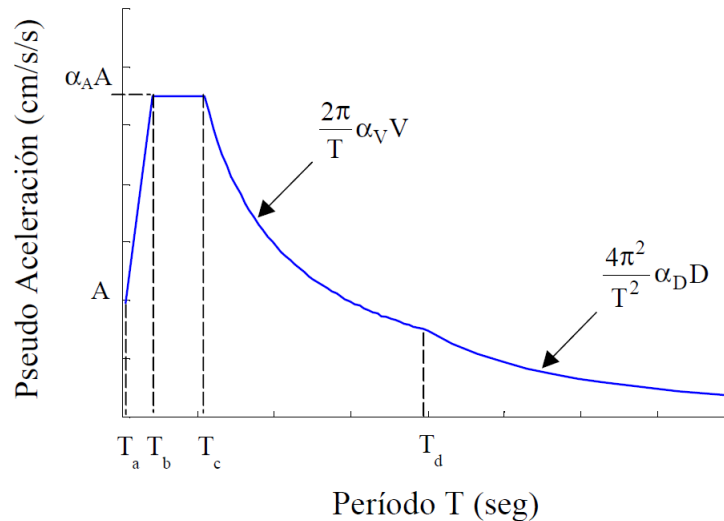


Figura 4.9: Definición del Espectro de Diseño de Pseudo-aceleración
Fuente: NCh2745 Of 2003 Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica

Los parámetros de la estructura que se desprenden de la clasificación establecida en la norma NCh433 se detallan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros de la Estructura

Parámetro	Valor
Categoría	C
Zona Sísmica	2
Tipo de Suelo	II

En la tabla 4.2 se establecen los parámetros que definen el espectro de respuesta y que dependen de los valores establecidos en la tabla 4.1.

Tabla 4.2: Parámetros Espectro de Diseño

Parámetro	Valor
T_a	0.03
T_b	0.2
T_c	0.54
T_d	2
$\alpha_A A$	1100
$\alpha_D D$	30
$\alpha_V V$	94
Factor de Modificación (Z)	1

Además del factor de modificación Z (que afecta a todo el espectro), la norma NCh2745 establece un factor de modificación dependiente del amortiguamiento que debe aplicarse por tramos. En este trabajo se establecieron 4 tramos con modos de períodos y amortiguamientos semejantes y se aplicó un valor representativo de B_D a cada tramo. Estos valores debieron ser actualizados en cada iteración, por cuanto el amortiguamiento efectivo modal varía de una iteración a otra. Los valores establecidos se detallan en la tabla 4.3¹.

Tabla 4.3: Factor de Modificación de la Respuesta por Amortiguamiento

Amortiguamiento Efectivo	B_D o B_M
≤ 2	0.65
5	1
10	1.37
15	1.67
20	1.94
25	2.17
30	2.38
≥ 50	3.02

4.4. Análisis en el Tiempo

Las investigaciones han indicado que las formas modales en vibración libre no son las mejores bases para el análisis de superposición modal de estructuras sujetas a cargas dinámicas. Ha sido

¹Estos coeficientes son los establecidos en la NCh 2745 of 2003 y serán utilizados en reemplazo de los indicados en la tabla 2.1, debido a la contradicción aún no resuelta entre estos últimos y la normativa chilena.

demostrado (Wilson, Yuan, y Dickens, 1982) que el análisis dinámico basado en un juego especial de vectores de Ritz dependientes de carga, proporcionan resultados más exactos que el uso del mismo número de formas modales naturales.

La razón por la cual los vectores de Ritz dan excelentes resultados, es que son generados tomando en cuenta la distribución espacial de la carga dinámica. Por esta razón, los análisis modales espectrales fueron realizados con vectores de Ritz en lugar del tradicional análisis por valores y vectores propios.

4.5. Registros Sísmicos Utilizados

Se consideraron para los análisis tres registros sísmicos: Llolleo 1985, Andalucía 2010 y Marga-Marga 2010, los cuales fueron aplicados paralelos a las dos direcciones principales de cada estructura. Todos los registros tienen componentes en las dos direcciones horizontales y en la dirección vertical, permitiendo una reproducción realista de la sollicitación que afecta a una estructura durante un evento sísmico. Los acelerogramas correspondientes se detallan en las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 y los espectros correspondientes a 5 % de amortiguamiento se comparan con el espectro de la norma NCh 2745 en figuras 4.13 a 4.15.

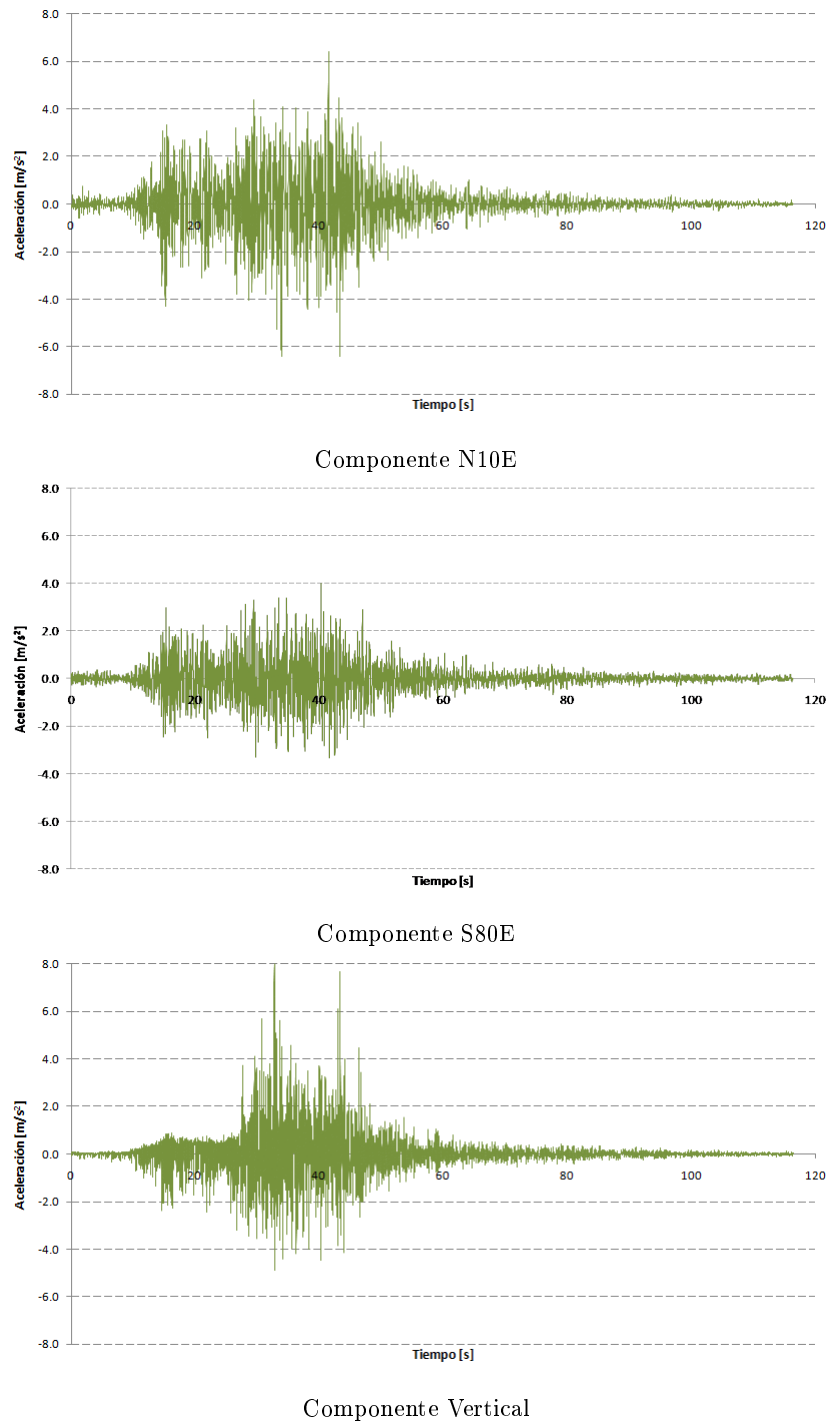


Figura 4.10: Acelerogramas del Registro de Lloleo de 1985

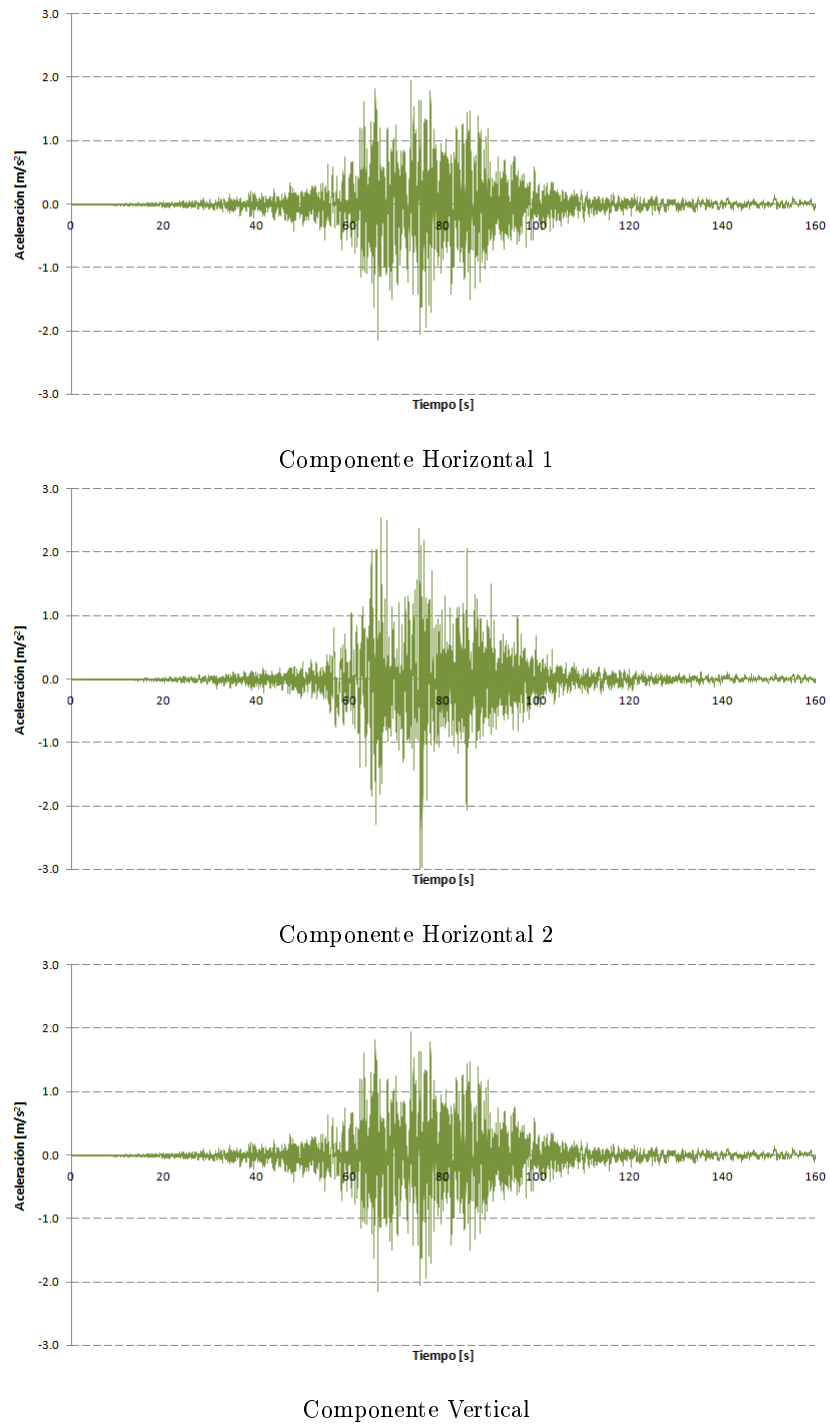


Figura 4.11: Acelerogramas del Registro del Conjunto Comunidad Andalucía - Santiago 2010

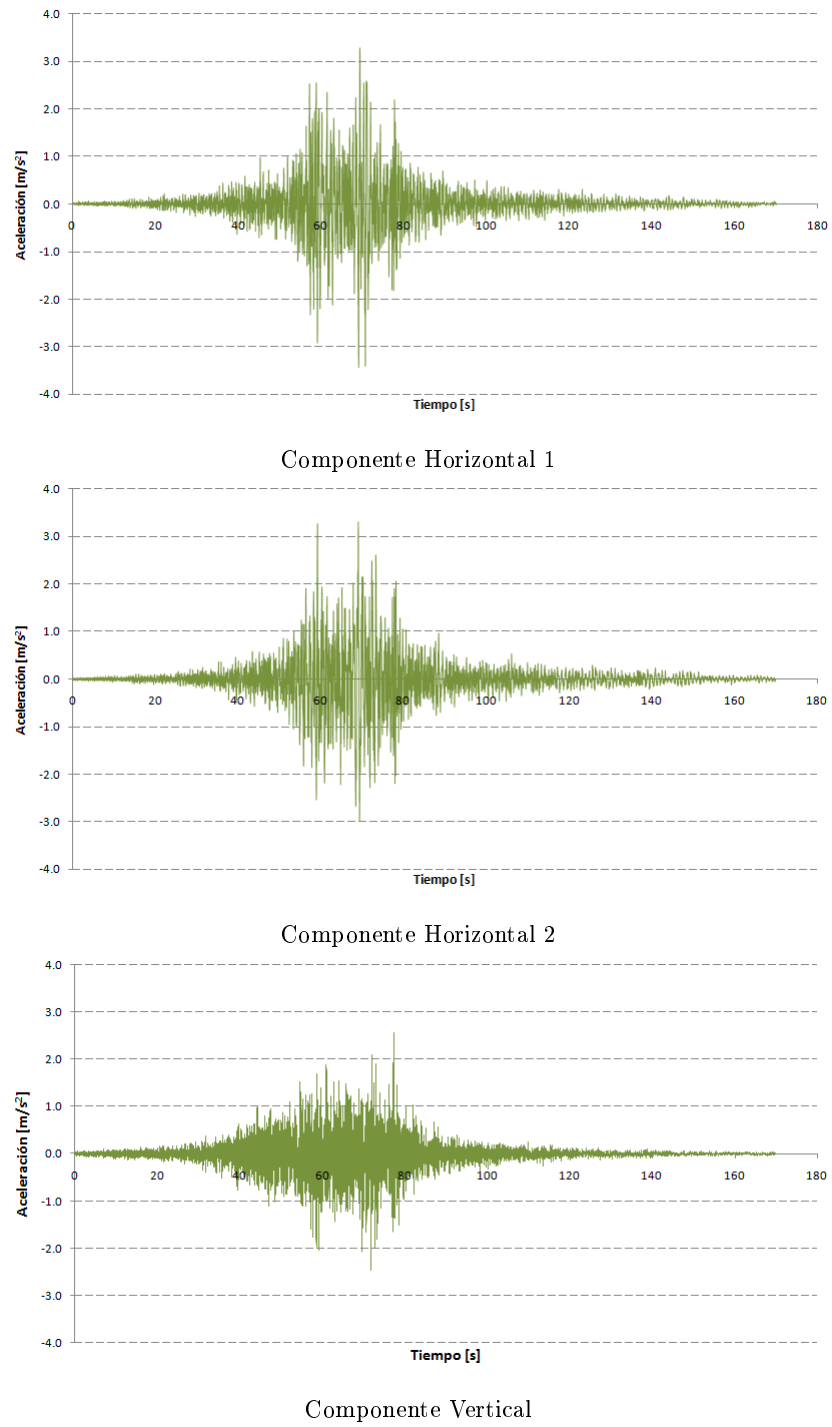


Figura 4.12: Acelerogramas del Registro Marga-Marga 2010

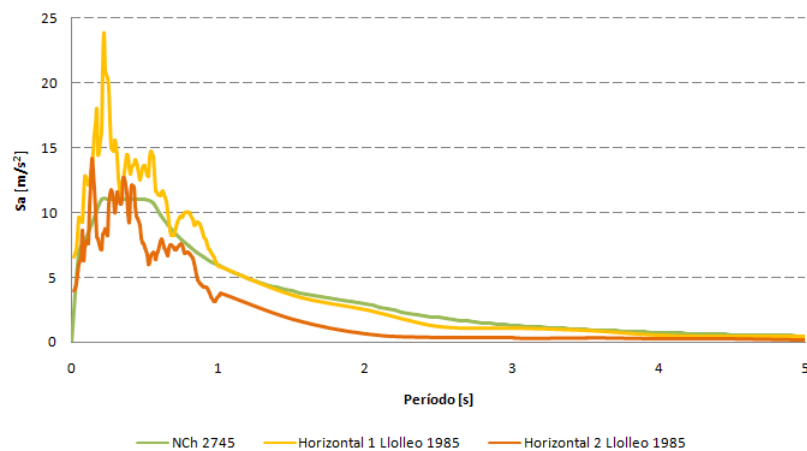


Figura 4.13: Comparación de Espectros de Lolloo para 5 % Amortiguamiento

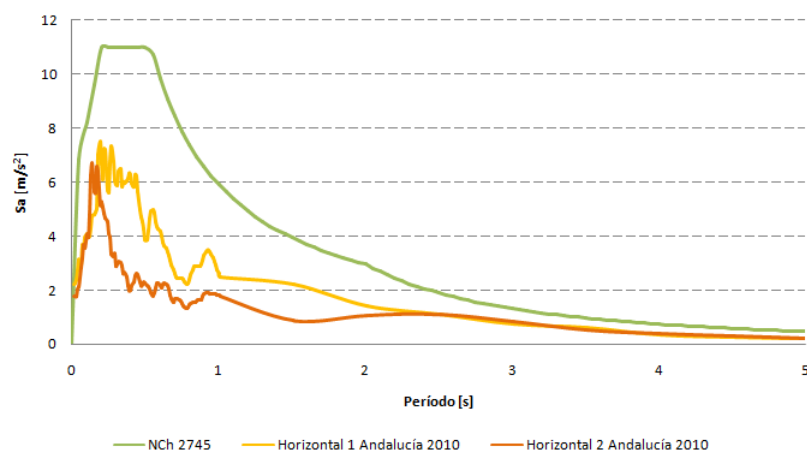


Figura 4.14: Comparación de Espectros de Andalucía para 5 % Amortiguamiento

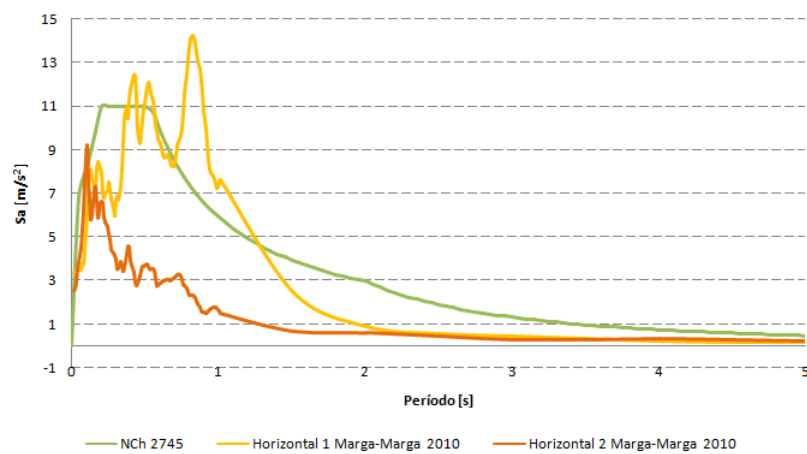


Figura 4.15: Comparación de Espectros de Marga-Marga para 5 % Amortiguamiento

Capítulo 5

Aplicación de Procedimientos de Análisis

A continuación se explica en detalle el procedimiento iterativo que se siguió para el dimensionamiento de los elementos disipadores del edificio de marco y marco-muro:

1. Se instalan en la estructura, cada 3 pisos y con la disposición mostrada en figura 3.10, 20 placas disipadoras con propiedades de rigidez y amortiguamiento efectivo iguales a cero.
2. Se realiza el análisis espectral de la estructura y los disipadores para estimar los desplazamientos a los cuales quedarían sometidos los dispositivos.
3. Se asignan las propiedades de rigidez y amortiguamiento efectivo a partir del desplazamiento máximo calculado.
4. Se realiza un análisis espectral de la estructura y los disipadores.
5. Si la deformación de los dispositivos es mayor a la de rotura (35mm) se instalan 10 placas ADAS adicionales.
6. Si el desplazamiento de los disipadores es distinto de lo supuesto, se vuelve a (3) usando el desplazamiento obtenido en (4).

El principal objetivo del proceso de diseño consiste en controlar las aceleraciones, puesto que al restringir éstas se limitan efectivamente los desplazamientos, lo cual no ocurre necesariamente en el caso recíproco. Se agregaron placas disipadoras en cada iteración mientras tuvieran un efecto positivo y significativo en la merma de las aceleraciones. Una vez alcanzada una deformación admisible para los disipadores, se iteró manteniendo el número de placas hasta que convergieran las deformaciones resultantes a las estimadas.

A continuación se detallan los resultados obtenidos en el proceso de diseño iterativo para los disipadores. En la primera parte de las tablas 5.1 al 5.2, se muestran las propiedades lineales equivalentes de los disipadores que se obtuvieron a partir de la deformación máxima esperada. En la segunda parte de las tablas se detallan los parámetros de interés para el diseño, a saber: aceleraciones máximas, desplazamientos máximos de entrepisos y corte basal.

5.1. Diseño por Análisis Modales Espectrales

5.1.1. Edificio de Marcos

Tabla 5.1: Iteraciones de Diseño de Disipadores en Eje X

Parámetro	Iteración						
	0	1	2	3	4	5	6
Período Fundamental [s]	3.70	3.70	3.63	3.61	3.59	3.58	3.56
Deformación Máxima Estimada [mm]	-	89	60	43	37	31	28
Placas por Disipador	0	20	30	40	50	60	60
Fuerza de Corte en Disipador [tonf]	0	62.0	66.3	67.4	75.0	78.9	73.4
Rigidez Efectiva [tonf/m]	0	616	924	1232	1541	1849	1849
Amortiguamiento Efectivo[tonf/s]	0	55	111	185	250	324	332
Deformación Resultante [mm]	89	60	43	37	31	28	28
Deformación de Entrepiso Máxima [mm]	44	33	28	26	25	24	24
Piso Deformación de Entrepiso Máxima	36	36	36	31	31	31	31
Aceleración Máxima [m/s ²]	9.1	7.7	5.4	4.8	4.4	4.2	4.2
Piso de Aceleración Máxima	3	3	40	40	40	40	40
Corte Basal [tonf]	3700	3340	2632	2490	2336	2263	2259

Tabla 5.2: Iteraciones de Diseño de Disipadores en Eje Y

Parámetro	Iteración					
	0	1	2	3	4	5
Período Fundamental [s]	3.97	3.97	3.92	3.90	3.89	3.88
Deformación Máxima Estimada [mm]	-	88	55	38	32	26
Placas por Disipador	0	20	30	40	50	50
Fuerza de Corte en Disipador [tonf]	0	61.4	61.6	61.2	67.3	58.1
Rigidez Efectiva [tonf/m]	0	616	924	1232	1540	1541
Amortiguamiento Efectivo[tonf/s]	0	59	127	214	290	307
Deformación Resultante [mm]	88	55	38	32	26	26
Deformación de Entrepiso Máxima [mm]	49	43	33	32	29	29
Piso Deformación de Entrepiso Máxima	36	36	36	36	36	36
Aceleración Máxima [m/s ²]	9.3	8.1	5.8	5.3	4.8	4.7
Piso de Aceleración Máxima	3	40	40	40	40	40
Corte Basal [tonf]	3864	3489	2692	2543	2353	2283

Las 60 placas resultantes para la dirección X y 50 para la dirección Y es una cantidad bastante grande, aunque sigue dentro de lo razonable si se compara con las 84 placas por disipador instaladas en el edificio Titanium. Se observa que a partir de las 40 placas no hay una disminución importante de las aceleraciones, sin embargo se hizo necesario continuar el proceso hasta llegar a desplazamientos que estuviesen bajo el límite de rotura de las placas.

A continuación, en las figuras 5.1 y 5.2 se muestran los desplazamientos de entrepiso máximos obtenidos para la situación sin disipadores y con disipadores, esta última según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

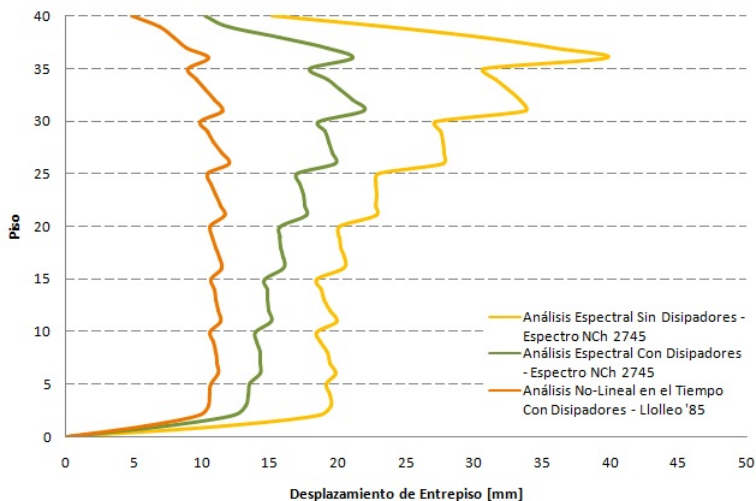


Figura 5.1: Comparación de Desplazamientos Máximos de Entrepiso en Dirección X

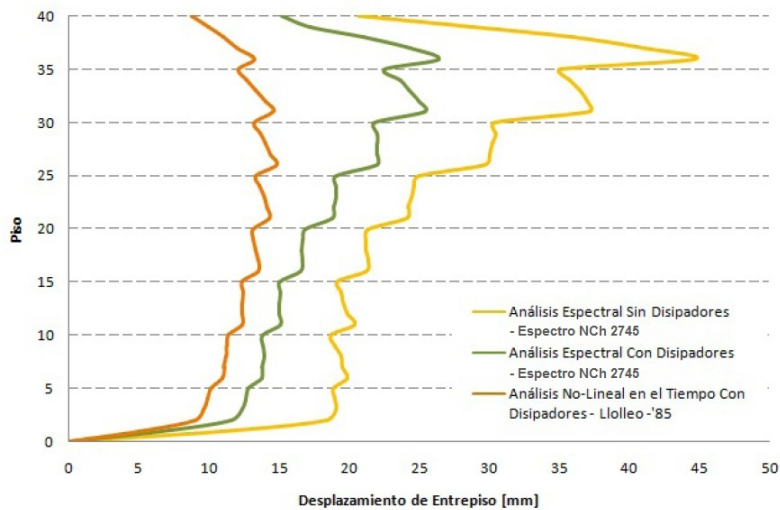


Figura 5.2: Comparación de Desplazamientos Máximos de Entrepiso en Dirección Y

Al introducir los disipadores los desplazamientos de entrepiso caen abruptamente en hasta un 50 % del valor inicial en ambas direcciones. Por otra parte, el análisis no-lineal en el tiempo entrega derivas de piso bastante menores que el análisis modal espectral, observándose diferencias de hasta un 100 %.

En las figuras 5.3 y 5.4 se encuentran los resultados de los desplazamientos relativos en los disipadores para los tres análisis en estudio.

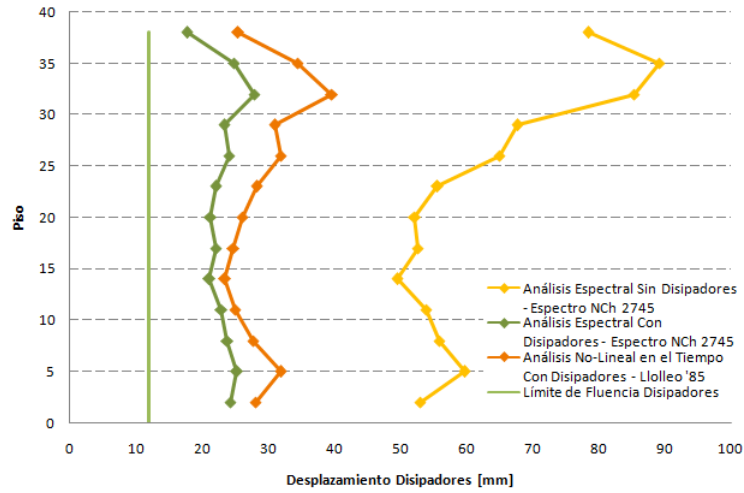


Figura 5.3: Comparación de Deformaciones de Disipadores en Dirección X

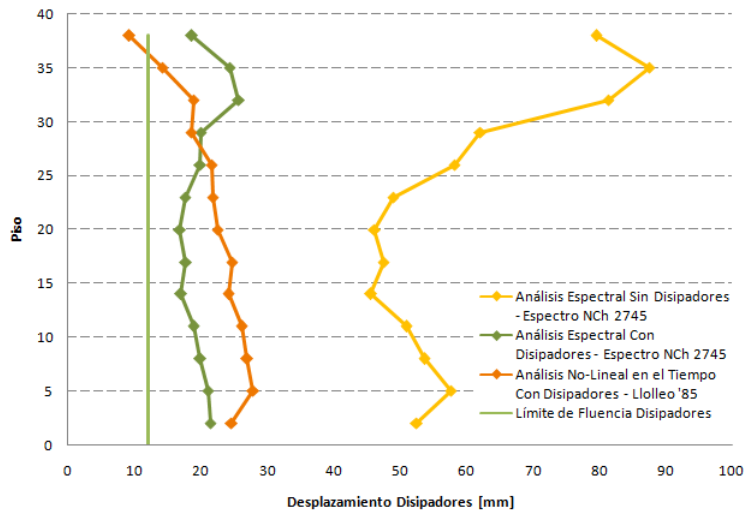


Figura 5.4: Comparación de Deformaciones de Disipadores en Dirección Y

Se observa una notoria disminución de los desplazamientos de los disipadores al introducir la totalidad de las placas en la estructura. Además, las predicciones del análisis modal calzan bastante bien con el análisis no lineal con el registro de Llolleo, habiéndose producido la fluencia de casi la totalidad de los elementos disipadores.

Se presenta en las figuras 5.5 y 5.6 los cortes por piso obtenidos para la situación sin disipadores y con disipadores, esta última según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

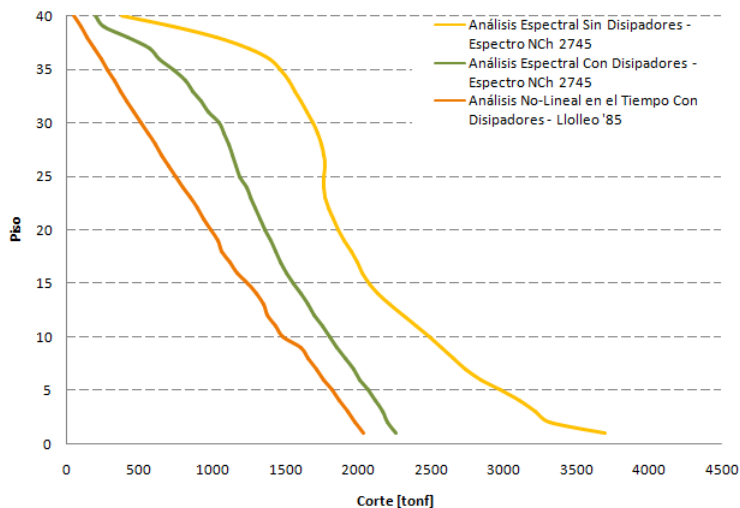


Figura 5.5: Comparación de Corte por Pisos en Dirección X

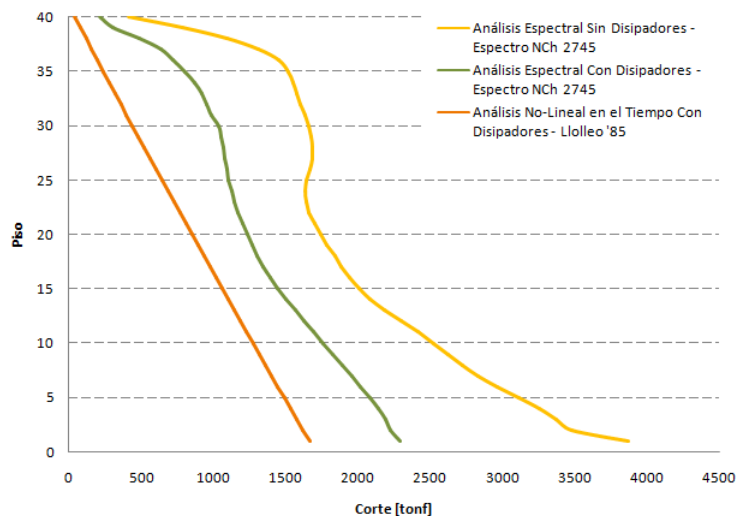


Figura 5.6: Comparación de Corte por Pisos en Dirección Y

Las fuerzas de corte por piso también disminuyen violentamente con la incorporación de los disipadores, sin embargo, las diferencias entre el análisis lineal equivalente y el no-lineal de respuesta en el tiempo son proporcionalmente muy pronunciadas en los pisos altos, tendiendo a reducirse en los pisos inferiores.

A continuación, en las figuras 5.7 y 5.8 se muestran las aceleraciones máximas por piso obtenidas para la situación sin disipadores y con disipadores, esta última según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

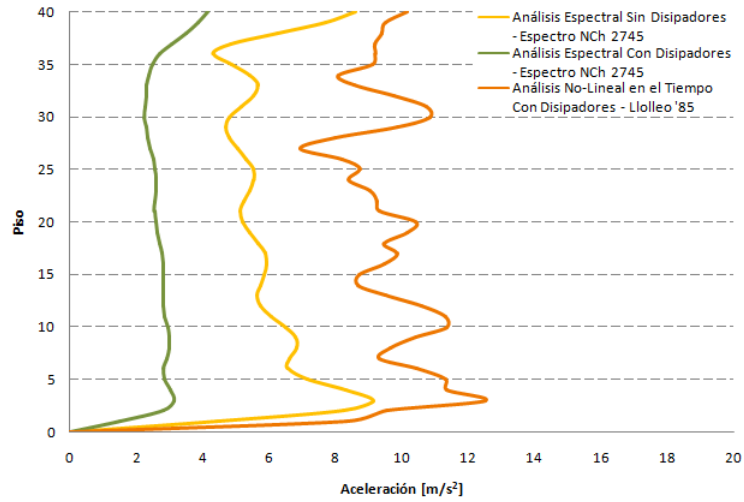


Figura 5.7: Comparación de Aceleración por Pisos Dirección X

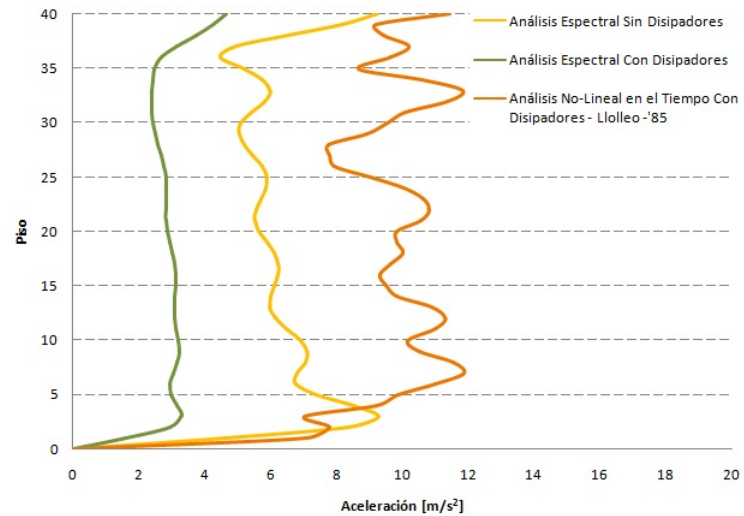


Figura 5.8: Comparación de Aceleración por Pisos Dirección Y

Se observa como las aceleraciones experimentan una importante atenuación con la introducción de los disipadores. No obstante, las aceleraciones calculadas con el análisis no-lineal resultan mucho mayores que aquellas calculadas con el análisis espectral, superando incluso la condición sin disipadores.

A continuación, en las figuras 5.9 y 5.10 se muestran los desplazamientos de entrepiso máximos obtenidos con el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para los diferentes registros estudiados.

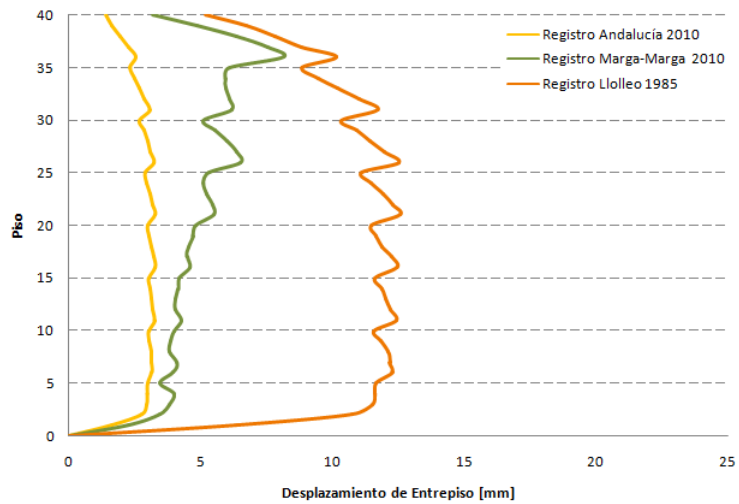


Figura 5.9: Comparación de Desplazamientos de Entrepiso con Diferentes Registros en Dirección X

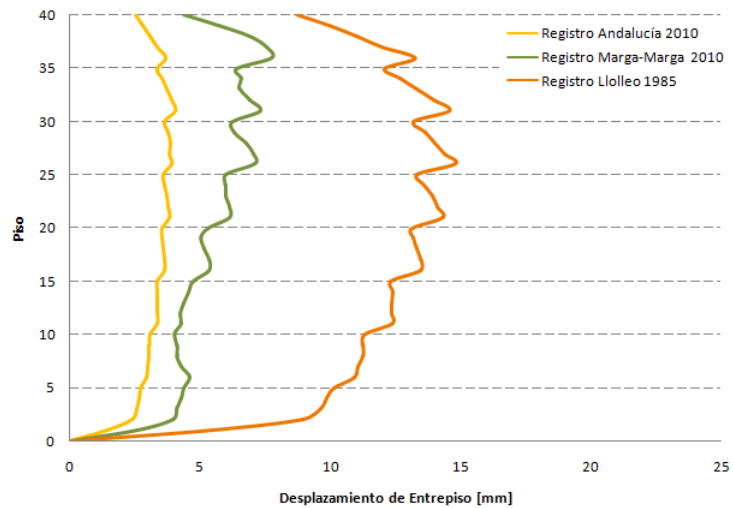


Figura 5.10: Comparación de Desplazamientos de Entrepiso con Diferentes Registros en Dirección Y

En las figuras 5.11 y 5.12 se encuentran los resultados de los desplazamientos relativos en los disipadores obtenidos con el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para los diferentes registros estudiados.

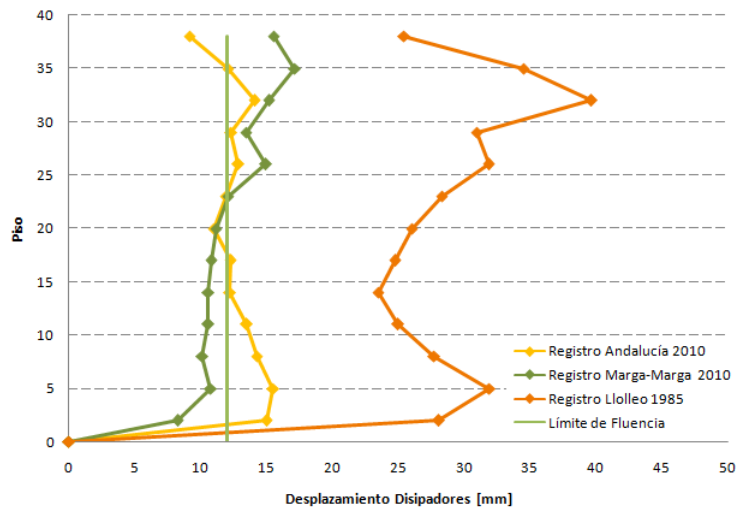


Figura 5.11: Comparación de Deformaciones de Disipadores con Diferentes Registros en Dirección X

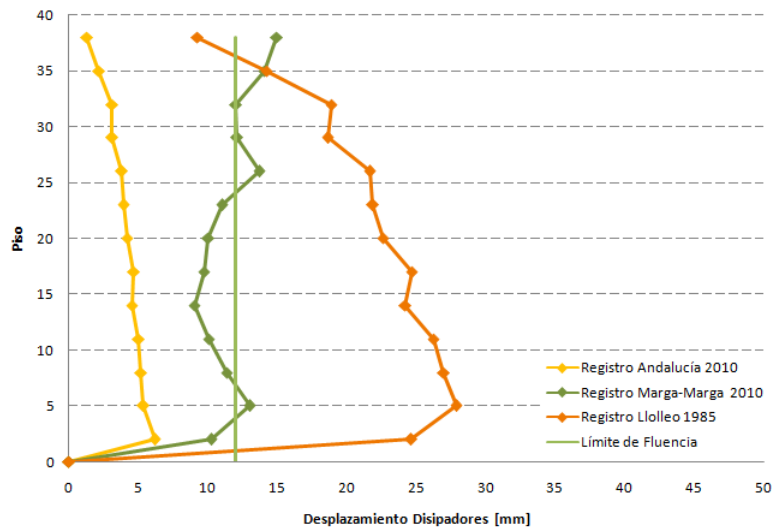


Figura 5.12: Comparación de Deformaciones de Disipadores con Diferentes Registros en Dirección Y

5.1.2. Edificio de Marco-Muro

Tabla 5.3: Iteraciones de Diseño de Disipadores en Eje X

Parámetro	Iteración							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Período Fundamental [s]	1.95	1.95	1.93	1.92	1.91	1.91	1.90	1.89
Deformación Máxima Estimada [mm]	-	60	51	47	44	41	37	35
Placas por Disipador	0	20	30	40	50	60	70	70
Fuerza de Corte en Disipador [tonf]	0	44.2	57.9	72.3	85.8	97.4	105.0	100.7
Rigidez Efectiva [tonf/m]	0	736	1136	1539	1950	2375	2838	1877
Amortiguamiento Efectivo[tonf/s]	0	40	66	93	120	151	185	189
Deformación Resultante [mm]	60	51	47	44	41	37	35	35
Deformación de Entrepiso Máxima [mm]	24	23	22	21	21	20	20	19
Piso Deformación de Entrepiso Máxima	26	26	26	22	22	22	22	22
Aceleración Máxima [m/s ²]	15.8	15.1	13.6	13.0	12.3	11.8	11.7	11.2
Piso de Aceleración Máxima	40	40	40	40	40	40	40	40
Corte Basal [tonf]	8659	8790	8377	8161	7970	7499	7445	7314

Tabla 5.4: Iteraciones de Diseño de Disipadores en Eje Y

Parámetro	Iteración							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Período Fundamental [s]	2.26	2.26	2.24	2.23	2.23	2.22	2.21	2.21
Deformación Máxima Estimada [mm]	-	57	47	42	38	35	31	29
Placas por Disipador	0	20	30	40	50	60	70	70
Fuerza de Corte en Disipador [tonf]	0	42.3	54.2	66.2	76.5	86.3	92.1	87.8
Rigidez Efectiva [tonf/m]	0	743	1154	1575	2014	2466	2970	3026
Amortiguamiento Efectivo[tonf/s]	0	48	81	116	153	191	233	238
Deformación Resultante [mm]	57	47	42	38	35	31	29	28
Deformación de Entrepiso Máxima [mm]	28	27	26	25	25	23	23	23
Piso Deformación de Entrepiso Máxima	32	32	32	31	26	26	26	26
Aceleración Máxima [m/s ²]	14.2	13.5	12.2	11.6	11.0	10.6	10.6	10.1
Piso de Aceleración Máxima	40	40	40	40	40	40	40	40
Corte Basal [tonf]	7489	7531	7049	6798	6574	6228	6173	6025

Las 70 placas resultantes tanto para la dirección X como para la dirección Y es una cantidad importante, pero sigue dentro de lo razonable si se compara con las 84 placas por disipador instaladas en el edificio Titanium. Se observa que a partir de las 50 placas no hay una disminución importante de las aceleraciones, sin embargo, se hizo necesario continuar el proceso hasta llegar a desplazamientos que estuviesen bajo el límite de rotura de las placas.

A continuación, en las figuras 5.13 y 5.14 se muestran los desplazamientos de entrepiso máximos obtenidos para la situación sin disipadores y con disipadores, esta última según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

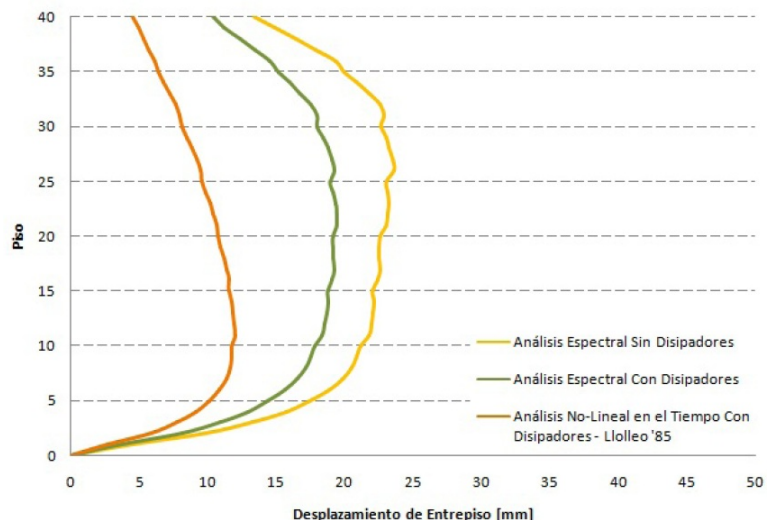


Figura 5.13: Comparación de Desplazamientos Máximos de Entrepiso en Dirección X

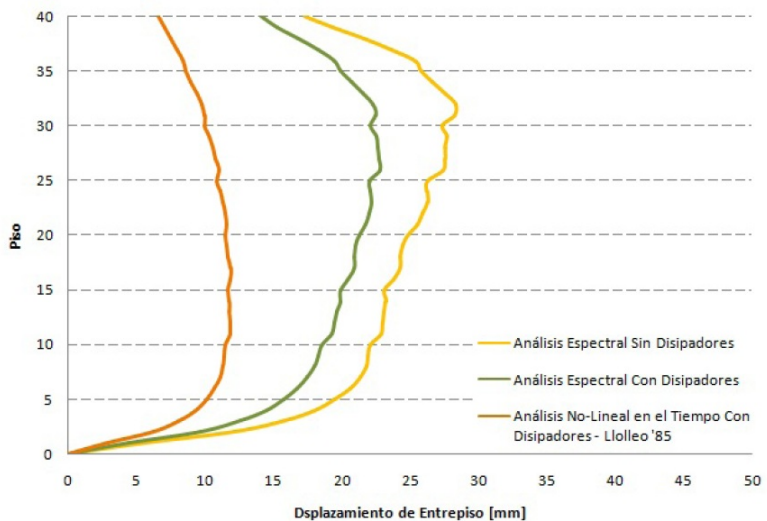


Figura 5.14: Comparación de Desplazamientos Máximos de Entrepiso en Dirección Y

Al introducir los disipadores los desplazamientos de entrepiso caen en aproximadamente un 25 % del valor inicial en ambas direcciones. Por otra parte, el análisis no-lineal con registro entrega derivas de piso bastante menores que el análisis modal espectral, observándose diferencias de hasta un 100 %.

En las figuras 5.15 y 5.16 se encuentran los resultados de los desplazamientos relativos en los disipadores para los tres análisis en estudio.

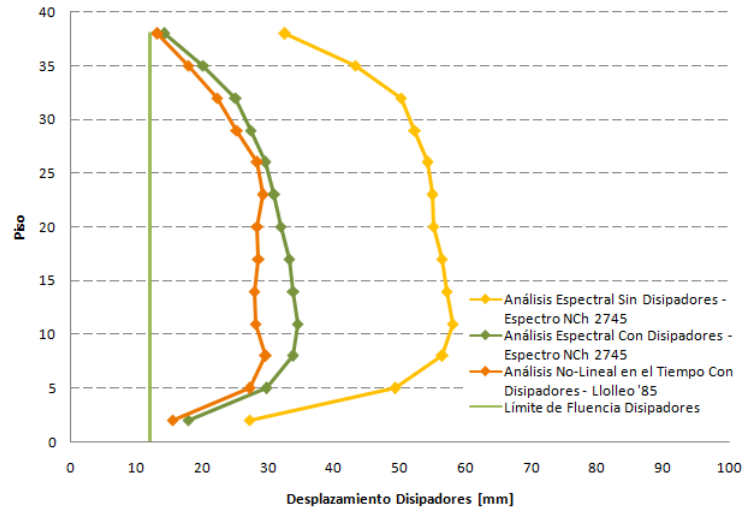


Figura 5.15: Comparación de Deformación de Disipadores en Dirección X

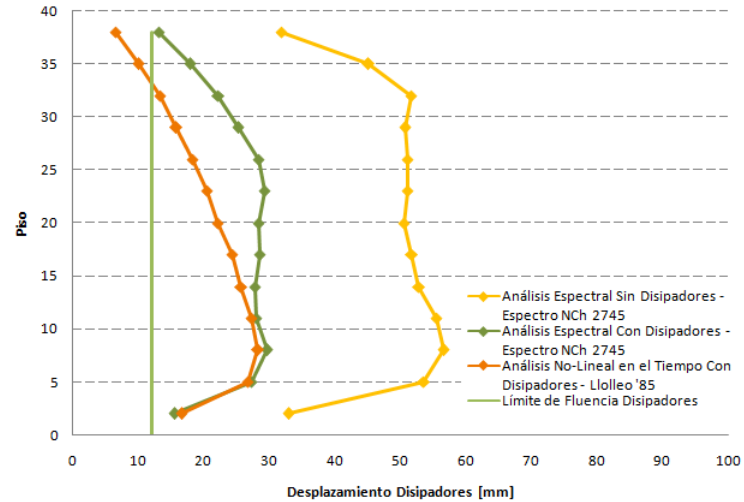


Figura 5.16: Comparación de Deformación de Disipadores en Dirección Y

Se observa una notoria disminución de los desplazamientos de los disipadores al introducir la totalidad de las placas en la estructura. Además, las predicciones del análisis modal calzan bastante bien con el análisis no-lineal con el registro de Lolloe, habiéndose producido la fluencia de casi la totalidad de los elementos disipadores.

Se presenta en las figuras 5.17 y 5.18 los cortes por piso obtenidos para la situación sin disipadores y con disipadores, esta última según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

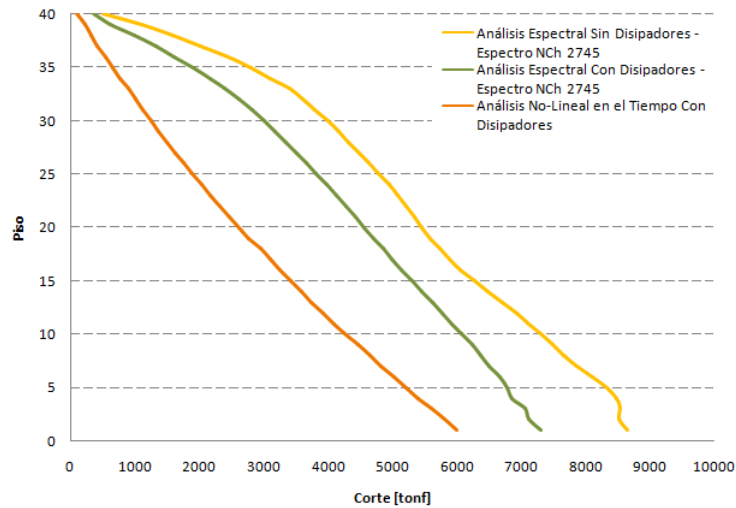


Figura 5.17: Comparación de Corte por Pisos en Dirección X

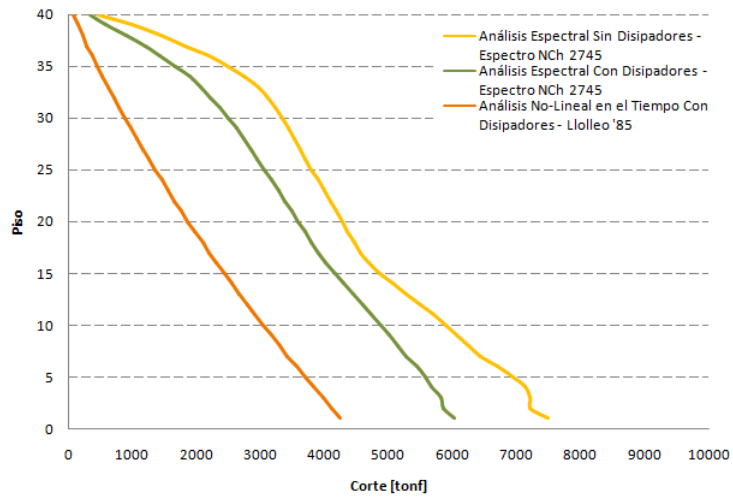


Figura 5.18: Comparación de Corte por Pisos en Dirección Y

Las fuerzas de corte por piso también disminuyen violentamente con la incorporación de los disipadores, sin embargo, las diferencias entre el análisis lineal equivalente y el no-lineal de respuesta en el tiempo son proporcionalmente muy pronunciadas en los pisos altos, tendiendo a reducirse en los pisos inferiores.

A continuación, en las figuras 5.19 y 5.20 se muestran las aceleraciones máximas por piso obtenidas para la situación sin disipadores y con disipadores, esta última según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

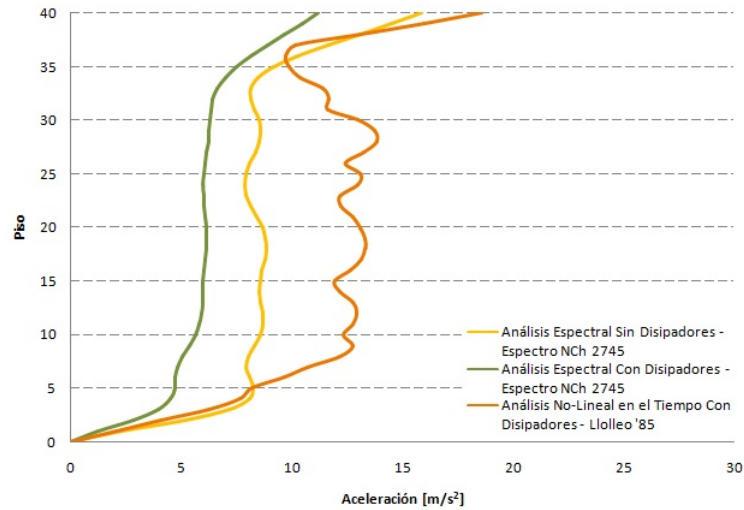


Figura 5.19: Comparación de Aceleración por Pisos en Dirección X

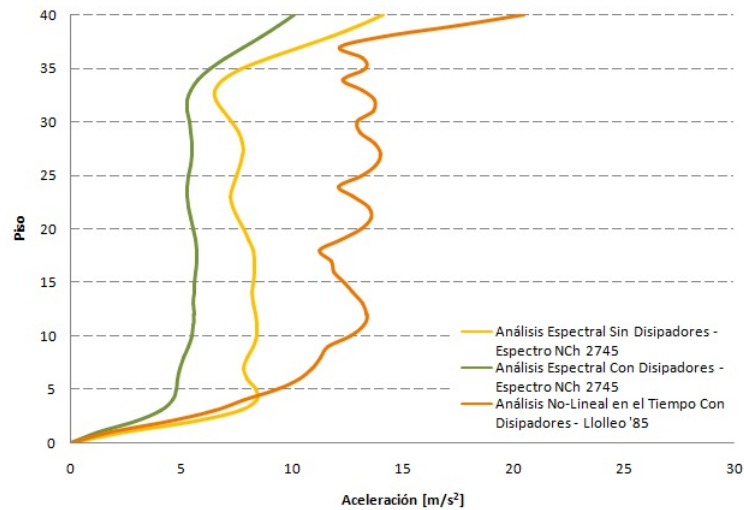


Figura 5.20: Comparación de Aceleración por Pisos en Dirección Y

Se observa como las aceleraciones experimentan una importante atenuación con la introducción de los disipadores. No obstante, las aceleraciones calculadas con el análisis no-lineal resultan mucho mayores que aquellas calculadas con el análisis espectral, superando incluso la condición sin disipadores.

A continuación, en las figuras 5.21 y 5.22 se muestran los desplazamientos de entrepiso máximos obtenidos con el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para los diferentes registros estudiados.

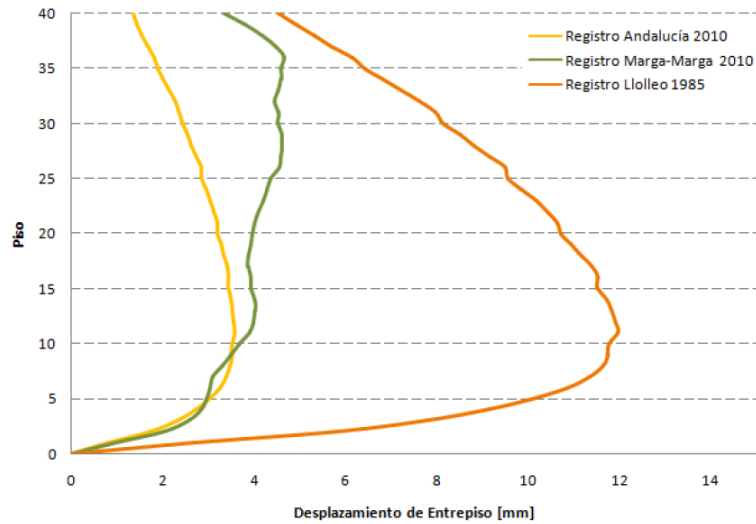


Figura 5.21: Comparación de Desplazamientos de Entrepiso con Diferentes Registros en Dirección X

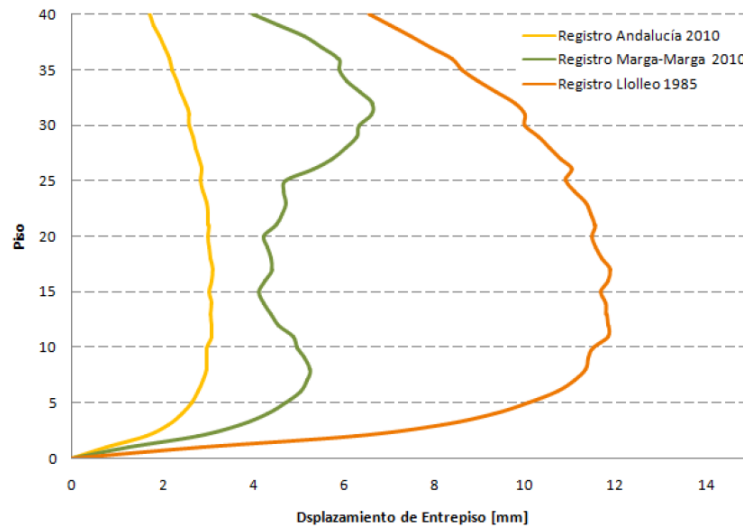


Figura 5.22: Comparación de Desplazamientos de Entrepiso con Diferentes Registros en Dirección Y

En las figuras 5.23 y 5.24 se encuentran los resultados de los desplazamientos relativos en los disipadores obtenidos con el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para los diferentes registros estudiados.

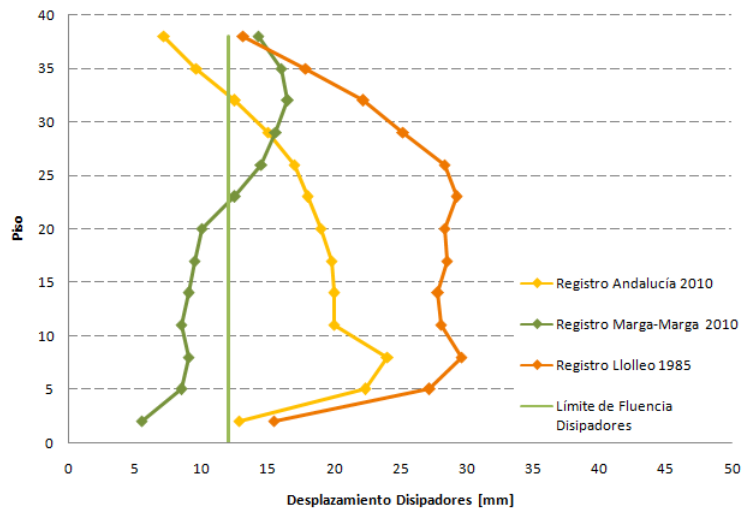


Figura 5.23: Comparación de Deformación Disipadores con Diferentes Registros en Dirección X

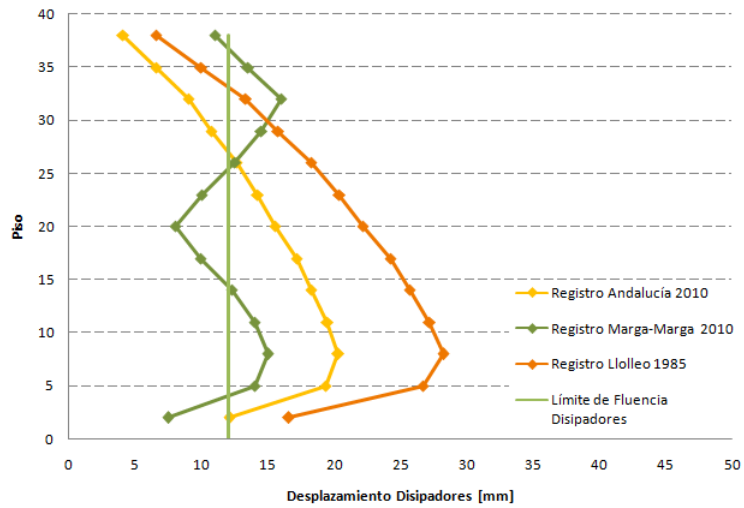


Figura 5.24: Comparación de Deformación Disipadores con Diferentes Registros en Dirección Y

5.2. Análisis de Edificio Titanium

A continuación, en las figuras 5.25 y 5.26 se muestran los desplazamientos de entrepiso máximos obtenidos para la situación sin disipadores y con disipadores, esta última según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

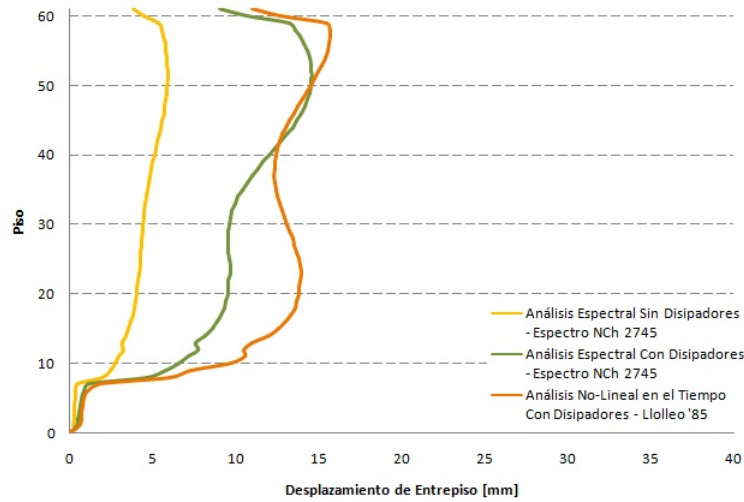


Figura 5.25: Comparación de Desplazamientos de Entrepiso en Dirección X

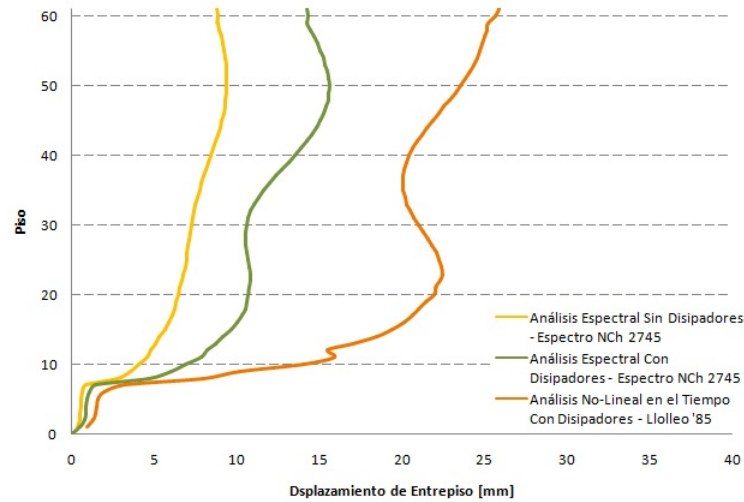


Figura 5.26: Comparación de Desplazamientos de Entrepiso en Dirección Y

En este caso se observa que los desplazamientos calculados con el método modal espectral resultaron hasta un 50 % menores a lo predicho por el análisis no-lineal con el registro de Llolleo.

En las figuras 5.27 y 5.28 se encuentran los resultados de los desplazamientos relativos en los disipadores para los tres análisis en estudio.

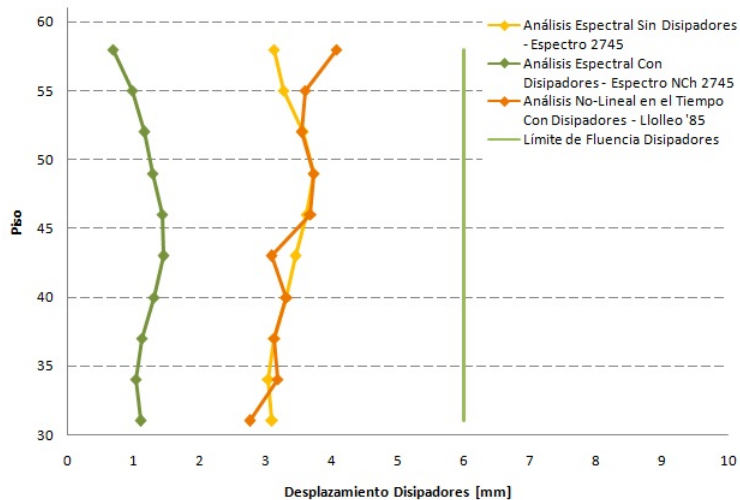


Figura 5.27: Comparación de Deformación de Disipadores en Dirección X

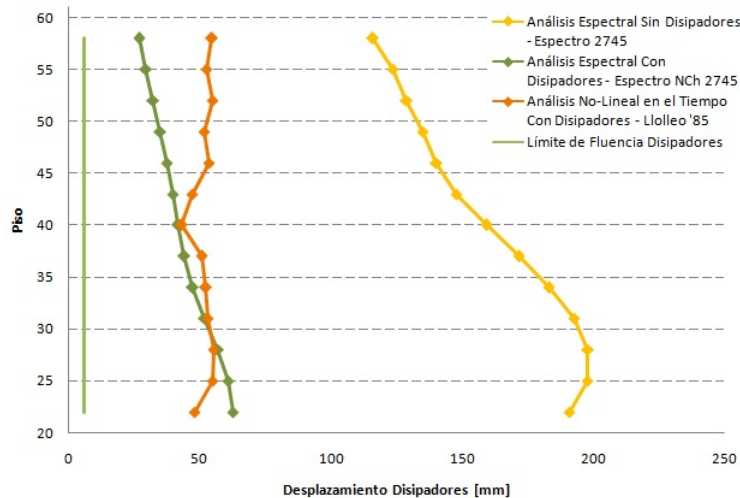


Figura 5.28: Comparación de Deformación de Disipadores en Dirección Y

Consecuentemente con lo observado en los desplazamientos de entrepiso, las deformaciones de los disipadores también resultaron menores con el método modal espectral en relación al análisis no-lineal en el tiempo.

Se presenta en las figuras 5.29 y 5.30 los cortes por piso obtenidos para la situación sin disipadores y con disipadores, esta última según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

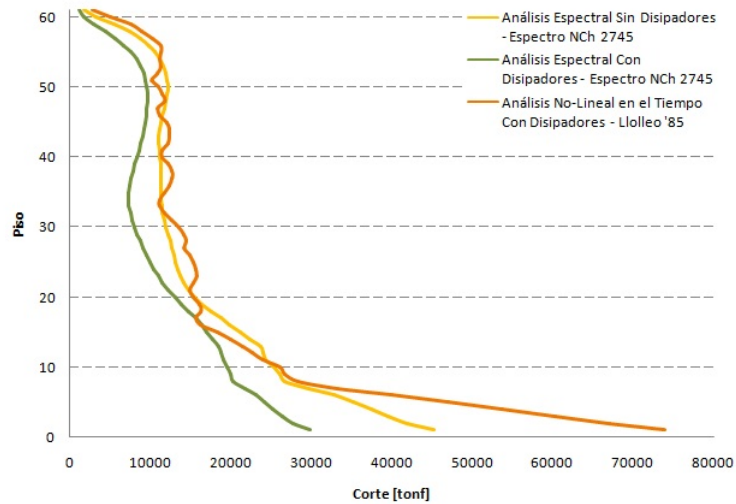


Figura 5.29: Comparación de Corte por Pisos en Dirección X

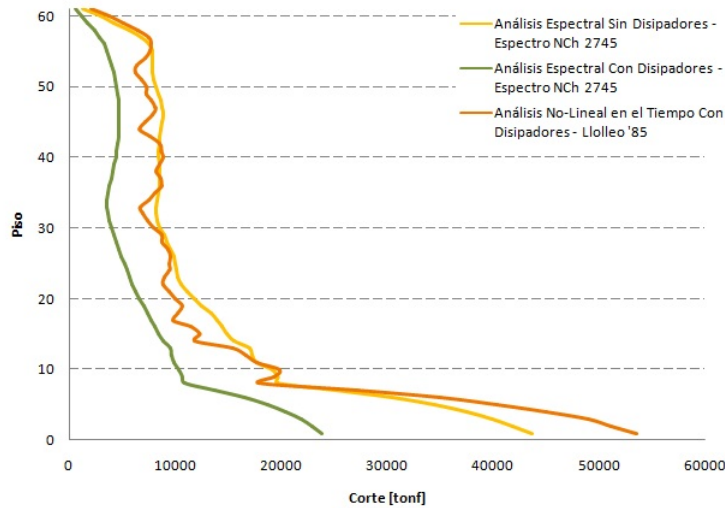


Figura 5.30: Comparación de Corte por Pisos en Dirección Y

Las fuerzas de corte por piso se asemejan bastante en los pisos superiores, sin embargo, en la base del edificio el corte obtenido con el método no-lineal de respuesta en el tiempo entrega predicciones más de 2 veces mayores en comparación con el análisis modal.

A continuación, en las figuras 5.31 y 5.32 se muestran las aceleraciones máximas por piso obtenidas para la situación con disipadores según el análisis modal espectral y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

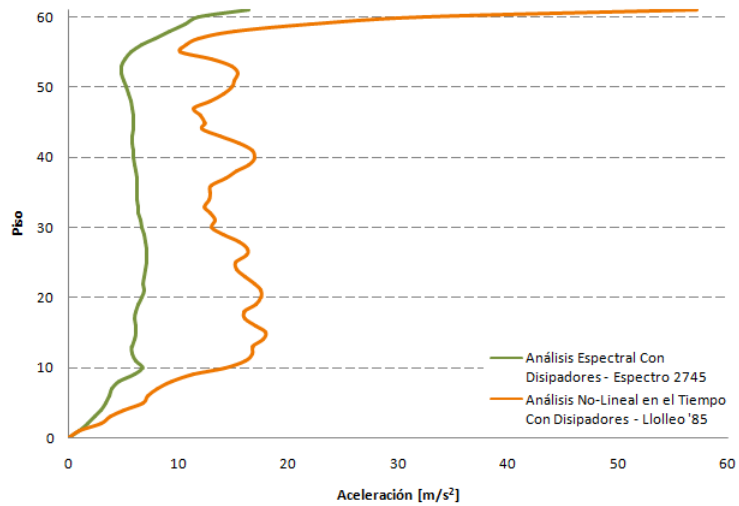


Figura 5.31: Comparación de Aceleración por Pisos en Dirección X

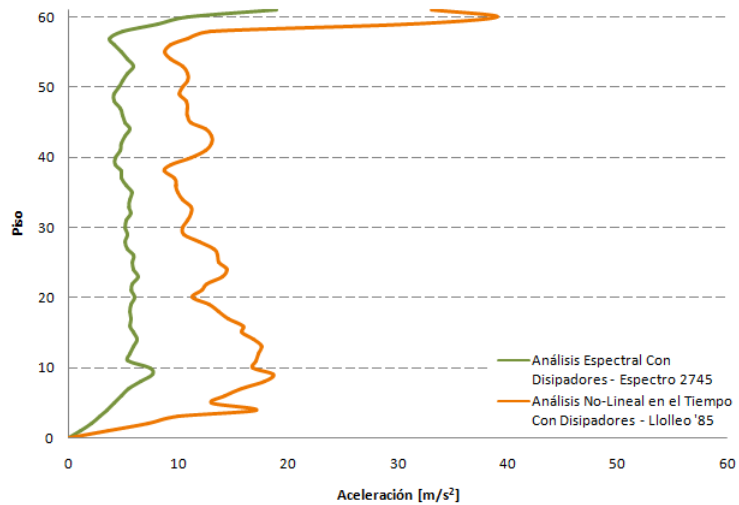


Figura 5.32: Comparación de Aceleración por Pisos en Dirección Y

Al igual que para los edificios de marco y marco-muro, las aceleraciones calculadas con el análisis no-lineal resultan mucho mayores que aquellas calculadas con el análisis espectral.

A continuación, en las figuras 5.33 y 5.34 se muestran los desplazamientos de entrepiso máximos obtenidos con el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para los diferentes registros estudiados.

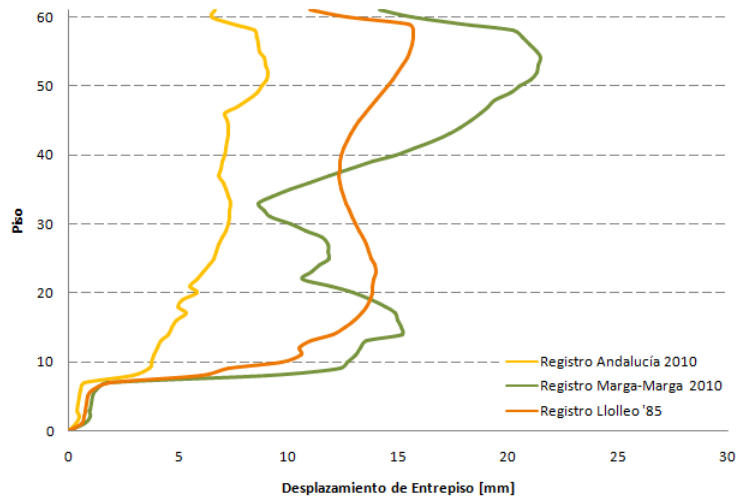


Figura 5.33: Comparación de Desplazamientos de Entrepiso con Diferentes Registros en Dirección X

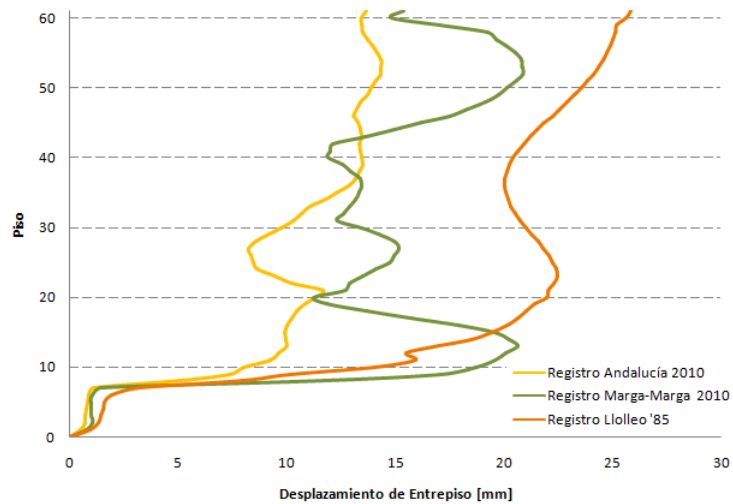


Figura 5.34: Comparación de Desplazamientos de Entrepiso con Diferentes Registros en Dirección Y

En las figuras 5.35 y 5.36 se encuentran los resultados de los desplazamientos relativos en los disipadores obtenidos con el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para los diferentes registros estudiados.

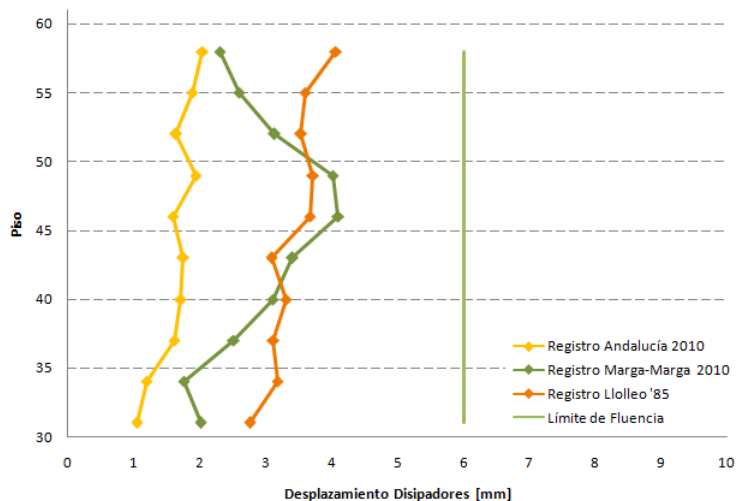


Figura 5.35: Comparación de Deformación Disipadores con Diferentes Registros en Dirección X

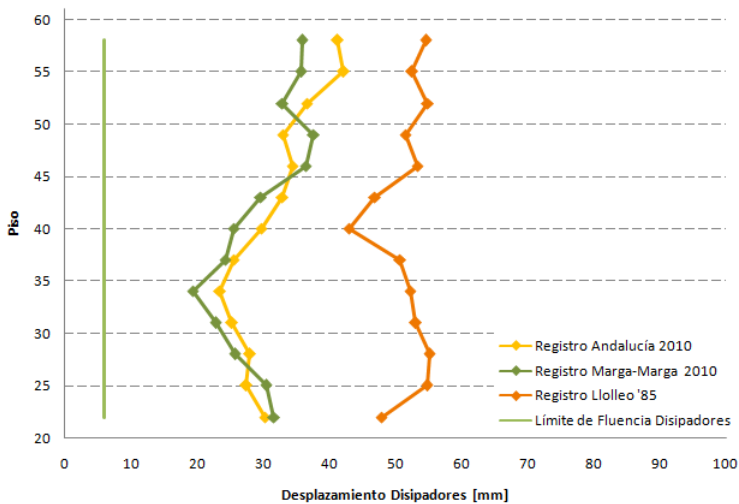


Figura 5.36: Comparación de Deformación Disipadores con Diferentes Registros en Dirección Y

En las figuras 5.37 y 5.38 se encuentran los resultados de los cortes por piso obtenidos con el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para los diferentes registros estudiados.

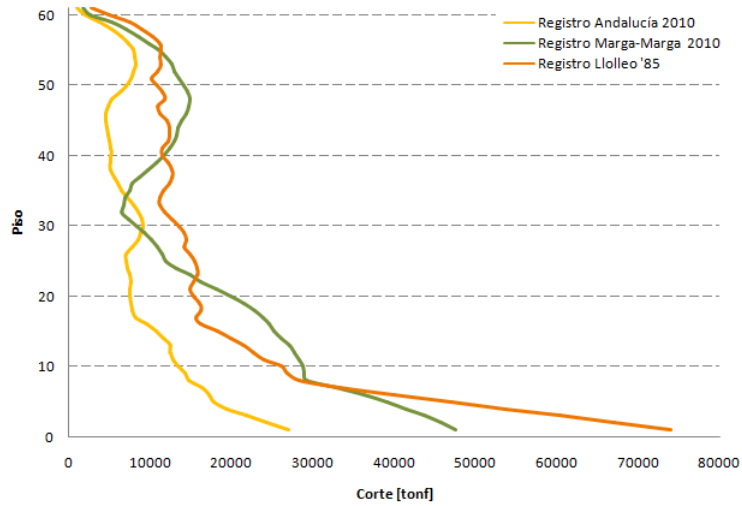


Figura 5.37: Comparación de Corte por Pisos con Diferentes Registros en Dirección X

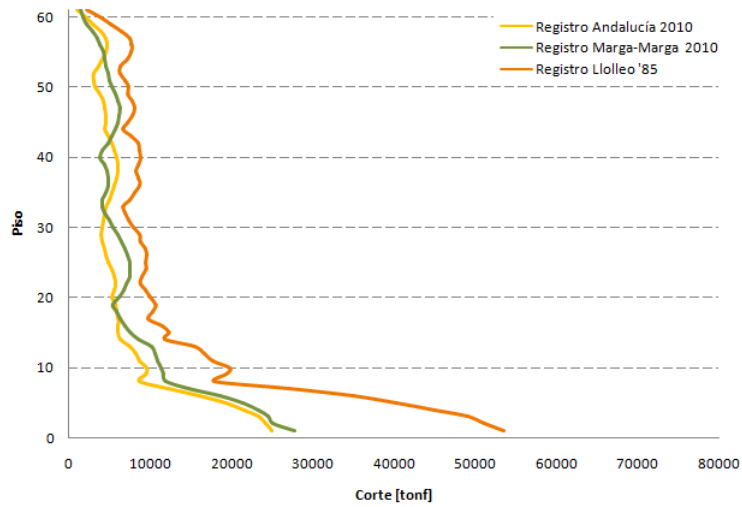


Figura 5.38: Comparación de Corte por Pisos con Diferentes Registros en Dirección Y

En las figuras 5.39 y 5.40 se encuentran los resultados de las aceleraciones por piso obtenidas con el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para los diferentes registros estudiados.

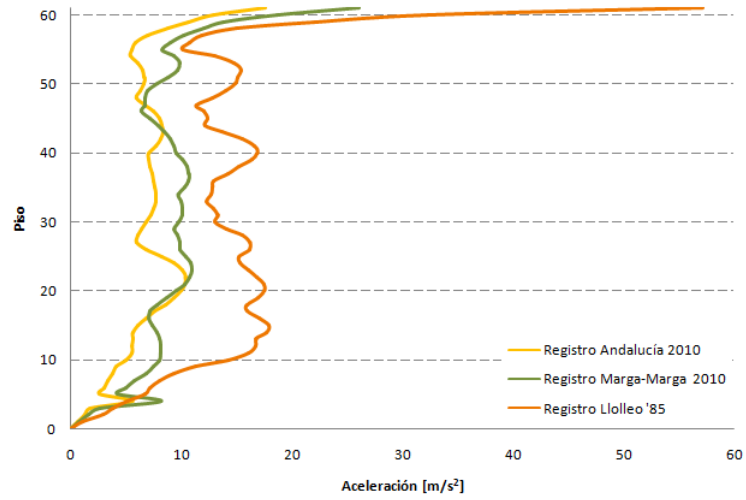


Figura 5.39: Comparación de Aceleración por Pisos con Diferentes Registros en Dirección X

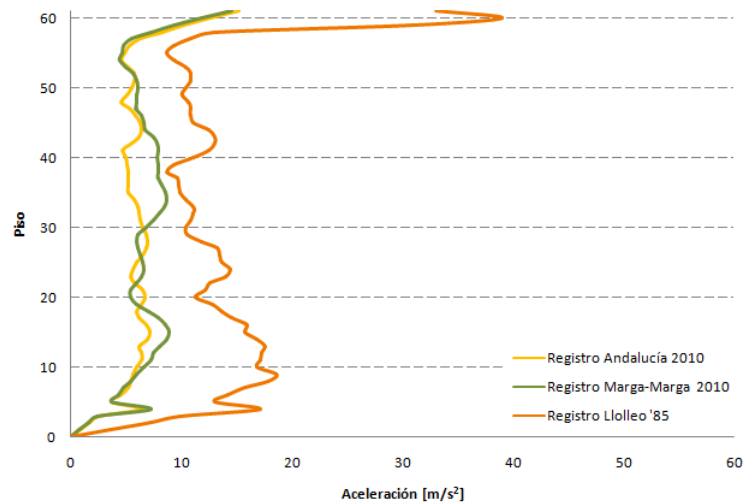


Figura 5.40: Comparación de Aceleración por Pisos con Diferentes Registros en Dirección Y

5.3. Análisis de Resultados

A continuación se discuten algunos efectos que pudieran explicar la falta de precisión del método simplificado para estimar el comportamiento real de la estructura.

5.3.1. Comportamiento de Histéresis para Diferentes Sismos

En los resultados anteriores se observa que los desplazamientos de los disipadores obtenidos con el espectro son similares a los calculados con el registro de Llolleo mediante el análisis no-lineal. Por otro lado, el ciclo de histéresis mostrado en las figuras 5.41 y 5.42 son consistentes con los modelos bilineales empleado para el cálculo de las propiedades de amortiguamiento y rigidez equivalentes. Esto haría suponer que la respuesta estructural (desplazamientos de entrepiso, aceleraciones y fuerzas de corte) debiese ser similar, sin embargo, los desplazamientos de entrepiso y las aceleraciones resultan bastante dispares en los distintos análisis.

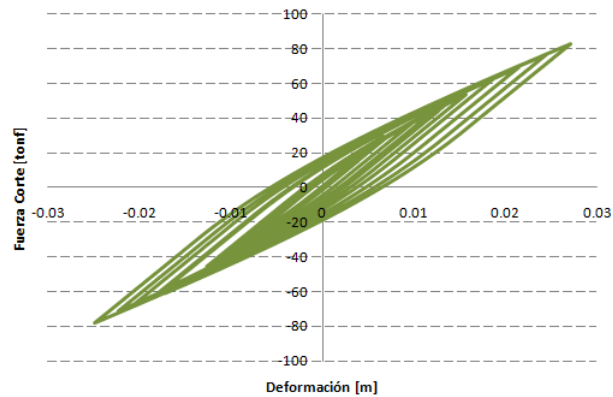


Figura 5.41: Ciclo Histéresis Disipador Edificio Marco-Muro Dirección Y

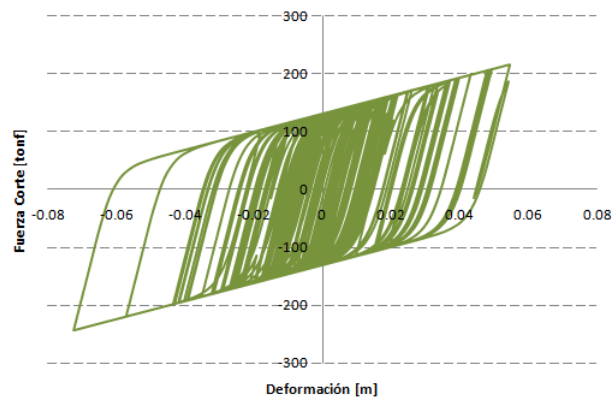


Figura 5.42: Ciclo Histéresis Disipador Edificio Titanium Dirección Y

Otro punto interesante a notar, es que cuando se consideran los otros dos registros, no siempre se logra que un número importante de disipadores supere la fluencia y cuando lo hacen, es por un margen bastante estrecho. Esto es explicado por la menor magnitud de aceleraciones alcanzadas por estos registros en comparación con el de Llolleo.

5.3.2. Relación Espectro - Registro Utilizado

Se observa de la figura 4.13 que para períodos superiores a 1s, el espectro de la componente horizontal más importante del registro de Llolleo de 1985 es muy similar al espectro de la NCh 2745. Además, de la tabla 5.5 se concluye que aquellos modos de períodos superiores a 1s contribuyen con alrededor del 85 % de la masa modal para el edificio de marcos y entre un 65 % a 69 % para el edificio de marco-muro, teniendo los modos superiores una importancia bastante reducida en la respuesta estructural, por lo que no debiesen esperarse grandes diferencias entre los análisis espectrales y el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo, producto de la naturaleza misma del registro utilizado en este caso.

Esta hipótesis se ve respaldada en el hecho de que se observan diferencias de similar magnitud entre los análisis no-lineales de respuesta en el tiempo con el registro de Llolleo y los análisis de tipo modal espectral.

Tabla 5.5

Estructura	Modos*	Masa Modal X	Masa Modal Y
Marcos	4	85.7 %	84.8 %
Marco-Muro	2	68.9 %	65.0 %
Titanium	6	56.4 %	56.4 %

* Número de modos con período mayor o igual a 1s.

Para el edificio Titanium, en cambio, se observa que los modos con períodos mayores a 1s corresponden a aproximadamente la mitad de la masa modal en cada dirección de análisis. Por lo tanto, cobran mayor relevancia aquellos modos ubicados en la zona donde el espectro del registro de Llolleo supera al de la norma, explicando, en alguna medida, los menores desplazamientos obtenidos por el método modal espectral.

5.3.3. Acoplamiento Dinámico

Una causa posible de la notoria diferencia entre los análisis lineales equivalentes y la verificación con análisis no-lineales de respuesta en el tiempo radica en que la matriz de amortiguamiento de la estructura con los disipadores adicionales puede resultar altamente no-proporcional, es decir, que la descomposición de Rayleigh no de resultados razonablemente cercanos a los reales (Wilson 1982).

La localización escogida para los disipadores concentra una cantidad significativa de amortiguamiento cada tres pisos, lo que puede ocasionar un acoplamiento dinámico importante, producto

de la no-proporcionalidad de la matriz de rigidez. Este efecto no es correctamente capturado en análisis modales realizados con softwares tradicionales como ETABS® y SAP200®, puesto que estos asignan el amortiguamiento de manera proporcional.

La evaluación de este efecto debe ser calculada usando análisis de valores y vectores propios complejos, lo cual queda fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, en el capítulo 6 se propone una metodología de estudio.

5.3.4. Amortiguamiento Modal

Por otra parte, la propuesta de norma establece una forma de cálculo aproximado de los amortiguamientos modales producto de la inclusión de los disipadores en la estructura, la cual viene dada según las ecuaciones 2.28 y 2.29 . Además, el amortiguamiento total del sistema estructural queda expresado por las ecuaciones 2.23 y 2.24. Se presenta a continuación la comparación entre los amortiguamientos modales asignados por ETABS® y aquellos propuestos por el proyecto de norma, ambos para el análisis modal espectral con los elementos disipadores definitivos.

Modo	Dirección X			Dirección Y		
	β Norma	β Etabs	Masa Modal	β Norma	β Etabs	Masa Modal
1	26.6 %	2.7 %	70.79 %	28.1 %	2.4 %	67.28 %
2	35.5 %	4.8 %	14.93 %	27.8 %	4.0 %	17.47 %
3	18.3 %	8.1 %	4.79 %	16.5 %	6.6 %	5.27 %
4	2.0 %	10.7 %	2.55 %	2.0 %	8.7 %	2.74 %
5	2.0 %	11.3 %	2.55 %	2.0 %	9.1 %	2.67 %
6	2.0 %	11.7 %	3.25 %	2.0 %	9.8 %	3.34 %

Tabla 5.6: Comparación de Amortiguamientos Modales del Edificio de Marco - Análisis Modal con Elementos Definitivos

Modo	Dirección X			Dirección Y		
	β Norma	β Etabs	Masa Modal	β Norma	β Etabs	Masa Modal
1	29.3 %	2.4 %	66.88 %	38.0 %	2.3 %	65.03 %
2	11.5 %	3.3 %	14.68 %	16.1 %	3.2 %	16.98 %
3	2.0 %	4.3 %	4.28 %	2.0 %	3.0 %	5.13 %
4	2.0 %	4.0 %	1.30 %	2.0 %	2.9 %	0.66 %
5	2.0 %	5.0 %	4.04 %	2.0 %	4.8 %	3.98 %
6	2.0 %	5.5 %	5.44 %	2.0 %	4.7 %	5.02 %

Tabla 5.7: Comparación de Amortiguamientos del Edificio de Marco-Muro - Análisis Modal con Elementos Definitivos

Se observa que los valores de amortiguamiento asignados por ETABS® a las estructuras son notoriamente más bajos que aquellos sugeridos por el proyecto de norma en los modos de mayor participación. Esto podría explicar por qué el diseño con el método modal espectral es tan conservador. Sin embargo, no es aplicable la utilización de valores de amortiguamiento específicos para cada modo al utilizar ETABS®, por lo que queda fuera del alcance de este estudio determinar el efecto exacto que tiene esto en el comportamiento estructural.

Capítulo 6

Conclusión

Se han aplicado las disposiciones de análisis del proyecto de norma de diseño de edificios con disipadores a 3 edificios distintos: uno de marco, uno de marco-muro y al edificio Titanium, concluyéndose lo siguiente:

6.1. Complejidad de la Metodología Estudiada

Una de las ventajas observadas de este procedimiento cuando se usan disipadores dependientes del desplazamiento es la rapidez de convergencia del análisis, es decir, el desplazamiento real alcanzado concuerda con el desplazamiento supuesto para el cálculo de las propiedades disipativas en pocas iteraciones. En ninguno de los casos estudiados se requirieron más de 7 iteraciones para el proceso completo, un profesional experimentado podría requerir entre 3 y 4 iteraciones para dimensionar correctamente los disipadores. Además, desde el momento en que quedó fijo el número de placas se necesitó sólo una iteración adicional para obtener un error de convergencia igual o menor a 1mm.

Una de las dificultades de la metodología es la transformación del comportamiento histerético de los disipadores a un modelo lineal equivalente. En el caso estudiado, las propiedades de los disipadores dependen exclusivamente del desplazamiento alcanzado, lo que a primera vista parece simple. En este estudio se optó por utilizar el máximo desplazamiento alcanzado para calcular las propiedades de todos los disipadores, simplificación razonablemente buena cuando se observa que un alto porcentaje de los disipadores quedó en un rango de deformaciones bastante estrecho. Sin embargo, los perfiles de desplazamiento de los disipadores en altura pueden ser muy irregulares para otro tipo de estructuras. Una solución a esta dificultad está en el cálculo de las propiedades disipativas de cada elemento disipador, en función de su máxima deformación alcanzada. Pero, resulta discutible su aplicabilidad en casos reales de estructuras altas con grandes cantidades de disipadores, por el tiempo que consumiría un procedimiento de estas características. Esta complicación se puede extrapolar a dispositivos más complejos.

Una eventual limitante al uso de este procedimiento es que los disipadores en análisis deben ajustarse al comportamiento de los tipos de disipadores pre-definidos en esta clase de software para

análisis lineales. En este estudio fue necesario ajustar las curvas de histéresis con un modelo bi-lineal, donde se debió sacrificar la precisión de la estimación de la rigidez equivalente en pro de obtener buenas aproximaciones del trabajo realizado para niveles altos de deformación. Este hecho fue producto de que las propiedades tensión-deformación de los disipadores escogidos no se ajustaba bien a ninguno de los tipos contemplados en ETABS®. No obstante, si se tratara solamente de análisis no-lineales se podría definir otro tipo de propiedades (Frame non-linear Hinge Properties) que permitan el ajuste de curvas usando hasta 9 puntos característicos.

Otro punto necesario de revisar es la imposibilidad en ETABS® de especificar niveles de amortiguamiento diferentes para cada modo de la estructura cuando se realizan análisis modales espectrales. Esto imposibilita la aplicación de la sección 2.3.1.3, en todos aquellos casos en que ETABS® sea utilizado como software de diseño. Se discutió en la sección 5.3.4 las enormes diferencias entre los valores de amortiguamiento entregados por ETABS® y aquellos calculados según las disposiciones de la norma. Que este hecho sea o no responsable de las diferencias observadas entre el método simplificado y el análisis no-lineal, queda fuera del alcance de este estudio, pero es una interrogante importante a resolver.

La manera en que se logra incluir el efecto del amortiguamiento en la respuesta estructural es mediante el uso de los factores de modificación establecidos en la tabla 4.3. Sin embargo, para estructuras con masas modales muy bien distribuidas, como el caso del edificio Titanium, este cálculo puede ser muy engorroso, llegando a necesitar aplicar factores de modificación a tantos tramos del espectro como modos se estén considerando para capturar el 90 % de la masa modal.

Los resultados observados muestran que un diseño por medio de éste método resulta conservador desde el punto de vista de los desplazamientos, esto pues los desplazamientos observados en los análisis modales resultan mayores que los obtenidos en el análisis no-lineal en el tiempo de un registro como el de Lollole de 1985, que es consistente con el espectro empleado. Por otro lado, desde el punto de vista de las aceleraciones, se observó que éstas son subestimadas en el análisis modal, resultando un diseño inadecuado para la demanda sísmica.

En resumen, el software empleado en este estudio no permite aplicar a cabalidad la metodología establecida en la propuesta de norma, especialmente en lo referido a la sección 2.3.1.3 Amortiguamiento Viscoso. Considerando que ETABS® y SAP2000® son algunos de los softwares más empleados en las oficinas de cálculo estructural, de ser aprobada la propuesta de norma estudiada resultaría de poca utilidad para el dimensionamiento de sistemas disipadores por la baja capacidad predictiva que se obtiene del método al ser aplicado con ETABS®.

Finalmente sería importante establecer claramente el uso de espectros consistentes con los registros empleados en la verificación del diseño del sistema disipador, puesto que el uso de espectros de diseño puede no resultar adecuado y profundizar las diferencias entre el proceso de dimensionamiento y el de verificación con análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

donde:

$$M^* = \begin{bmatrix} -I & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$K^* = \begin{bmatrix} 0 & I \\ K & C \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Lo cual corresponde a resolver el sistema $M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0$, expresado según la ecuación 6.5:

$$\begin{bmatrix} -I & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \dot{z} + \begin{bmatrix} 0 & I \\ K & C \end{bmatrix} z = 0 \quad (6.5)$$

donde:

$$z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

son las variables de estado.

4. Comparar frecuencias, amortiguamientos y formas modales obtenidas por este método con los que entregan programas como ETABS® que trabajan con matrices de amortiguamiento clásicas.

Bibliografía y Referencias

[1] Ramírez, O. M, Constantinou, M. C. “Evaluation of Simplified Methods of Analysis of Yielding Structures with Damping Systems”. *Earthquake Spectra*, Volume 18, No. 3 2002.

[2] Schachter M. “Aplicación de Métodos Simplificados de Análisis a una Estructura Industrial con Disipadores de Energía”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. 2003.

[3] Aldunate J. “Vulnerabilidad Sísmica de Edificios de Hormigón Armado”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. 2009.

[4] ASCE 7-05 “Seismic Design Requirements For Structures With Damping Systems”

[5] Symans, M. D. et al. “Energy Dissipation Systems for Seismic Application: Current Practice and Recent Developments”. *Journal of Structural Engineering*, January 2008.

[6] Nuñez T. “Variación Debido a Cambios de Masa y Rigidez de las Propiedades Dinámicas de una Estructura en Proceso Constructivo”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil y Grado de Magister en Ciencias, Mención Ingeniería Sísmica. Universidad de Chile 2009.

[7] Willford, M. Whittaker, A. Klemencic, R. “Recommendations for the Seismic Design of High-rise Buildings”. *Council on Tall Buildings and Urban Habitat* 2008.

[8] Wilson, E.; Yuan, M.; Dickens, J. M., "Dynamic Analysis by Direct Superposition of Ritz Vectors", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, pp. 813-821, 1982.

[9] Vargas J. “Ensayo de placas tipo adas de láminas de CuZnAl”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. 2007.

[10] Symans M. “Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples”. *Rensselaer Polytechnic Institute*. 2005.

[11] Wen Y. K. “Method for random vibration of hysteretic systems”. *Journal of Engineering Mechanics*. ASCE. Vol. 102, No. 2 1976.

[12] Black, C. J., Makris, N., and Aiken, I. “Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces.” *J. Struct. Eng.*, 1306, 880–894, 2004.

[12]Fahnestock, L. A., Sause, R., Ricles, J. M., and Lu, L.-W. “Ductility demands on buckling-restrained braced frames under earthquake loading.” *Earthquake Eng. Vibration*, 22, 255–264, 2003.

[13]R. Contreras, J. Soto. “Análisis Estructural de la Torre Titanium La Portada”. 2009.