



Universidad Nacional Autónoma de México

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil – Ingeniería Sísmica

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS Y
CONTROL DE DAÑO PARA MARCOS DE CONCRETO REFORZADO CON DISIPACIÓN
PASIVA DE ENERGÍA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ DE JESÚS FRANCO ESPINOSA

TUTOR PRINCIPAL:
DR. AMADO GUSTAVO AYALA MILIÁN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
COMITÉ TUTOR:
DR. OSCAR ALBERTO LÓPEZ BÁTIZ, CENAPRED
MI. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA
DR. DARIO RIVERA VARGAS, FES ACATLÁN
DR. MAURO POMPEYO NIÑO LÁZARO, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. AGOSTO 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oscar Alberto López Bátiz

Secretario: M.I. Octavio García Domínguez

Vocal: Dr. Amado Gustavo Ayala Millián

1er. Suplente: Dr. Dario Rivera Vargas

2do. Suplente: Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA - UNAM.

Tutor de tesis

Dr. Amado Gustavo Ayala Milián

Firma

Dedicatoria

A mi madre:

Concepción

Por todo tu cariño, tu infinita paciencia
y por el duro trabajo de sacar adelante a la familia.

A mi esposa:

Guadalupe

Por complementarme y por ser siempre luz en mi vida

A mi hijo:

Diego

Por la felicidad que me das todos los días

A mis hermanos:

Sergio, Claudia y Ricardo

Por sus enseñanzas, apoyo y confianza

A mi tía:

Blanca

Por sus duras y directas palabras, en afán
de ser una mejor personal

Al amigo:

Omar

Por tu orientación y apoyo, cuando más se necesitaba

Agradecimientos

Agradezco a la *Universidad Nacional Autónoma de México* por la oportunidad brindada de seguir formándome profesionalmente.

Agradezco al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría.

Agradezco a mi tutor el Dr. Amado Gustavo Ayala Millián, por su tiempo, su paciencia y su conocimiento invertido en el desarrollo de la tesis.

Agradezco al Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro, por su compañerismo, tiempo y ayuda brindada durante la realización y revisión de la tesis. Agradezco a los Drs. Oscar Alberto López Bátiz y Dario Rivera Vargas y al M.I. Octavio García Domínguez por las observaciones y el tiempo dedicado en revisar esta tesis.

Agradezco a todo el equipo de trabajo del Dr. A Gustavo Ayala Millián, pero de manera especial a los M.I. Saul Esteban López Rios, Otonial Palacios Hernandez y Marco Antonio Escamilla Garcia por sus comentarios, reflexiones y su disponibilidad durante desarrollo de la tesis.

Agradezco al Ing. Octavio Castro Camacho y a la Lic. Ivonne Gordillo Balderas por su tiempo y comentarios.

Resumen

Los sismos destructivos en décadas recientes han evidenciado las limitaciones de la filosofía basada en fuerzas, al presentarse comportamientos y daños no esperados en las estructuras; lo anterior ha incentivado al desarrollo de nuevas tendencias en el diseño, en donde se busca controlar el comportamiento de la estructura y mitigar los efectos sísmicos. Dichas tendencias en el diseño han sido atraídas por la filosofía basada en desplazamientos, la cual busca tener un mayor control en el diseño de la estructura, y por los disipadores pasivos de energía, los cuales absorben la energía de entrada del sismo y la distribuyen en la capacidad de deformación de los fluidos viscosos.

En virtud de las cualidades de la filosofía basada en desplazamientos y de la versatilidad de los disipadores pasivos de energía, en esta tesis se propone un procedimiento simplificado que busca controlar las distorsiones de entrepiso y los desplazamientos de la estructura por medio del control de daño y del amortiguamiento adicionado por los disipadores pasivos de energía.

El procedimiento propuesto se basa en determinar la curva de comportamiento de un sistema de referencia de un grado de libertad, asociada a un modelo elástico y a un modelo con daño, así como en la cantidad de amortiguamiento requerida por la estructura. De la curva de comportamiento se determinan las resistencias de las vigas y columnas; y de la fracción de amortiguamiento requerida para la estructura se determina el coeficiente de amortiguamiento de diseño de los disipadores de fluidos viscosos.

El método se aplica a un marco de concreto reforzado de ocho niveles, de arreglo regular y con disipadores de energía del tipo de fluidos viscosos, de comportamiento lineal y colocados en posición diagonal dentro de la crujía central del marco. Como demanda sísmica de diseño se utilizan los espectros de respuesta de la componente E-W, obtenida de la señal sísmica registrada en la estación SCT durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. Los resultados obtenidos con el procedimiento propuesto se validan con un análisis dinámico no lineal.

Índice general

Resumen	VIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivo y alcances de la tesis	2
1.3. Organización de la tesis	3
2. Estado del arte del diseño sísmico basado en desempeño	5
2.1. Fundamentos del diseño sísmico basado en desempeño	5
2.1.1. Niveles de desempeño	6
2.1.2. Niveles de desempeño para disipadores de energía	6
2.1.3. Niveles de diseño sísmico	7
2.1.4. Objetivo de desempeño	8
2.2. Diseño sísmico basado en desplazamientos	9
2.2.1. Métodos existentes de diseño sísmico basado en desplazamientos con disipadores de energía	11
3. Disipación pasiva de energía	17
3.1. Tipos de disipadores pasivos de energía	17
3.2. Breve reseña histórica de los disipadores de energía del tipo viscoso	19
3.3. Características del amortiguador lineal viscoso	19
3.3.1. Modelo matemático	20
3.4. Distribución de la energía sísmica en una estructura	21
3.4.1. Amortiguamiento en estructuras con disipadores de energía lineal viscoso	21
4. Método de diseño sísmico basado en desplazamientos con control de daño	

y disipación pasiva de energía	25
4.1. Generalidades	25
4.2. Hipótesis del método de diseño	26
4.2.1. Representación de la curva de comportamiento mediante osciladores lineales de referencia	27
4.3. Procedimiento de diseño	28
4.4. Consideraciones para el diseño	35
5. Ejemplo de aplicación	37
5.1. Generalidades	37
5.2. Descripción del edificio	37
5.3. Aplicación del método de diseño	39
5.4. Resultados obtenidos y validación	44
5.4.1. Análisis dinámico no lineal paso a paso	44
5.4.2. Comparación de resultados	45
Conclusiones	51
5.5. Recomendaciones	52
Referencias	53

Índice de figuras

2.1. Diagrama de flujo del procedimiento basado en <i>DBDD</i>	12
3.1. Aspecto y posición de un disipador de fluidos viscosos	18
3.2. Características de un disipador de fluidos viscosos	18
3.3. Diagrama de fuerza-deformación para un amortiguador de <i>DFV</i>	19
3.4. Relación entre fuerza y velocidad para un <i>DFV</i>	20
3.5. Modelo de Maxwell para un <i>DFV</i>	21
3.6. Esquema del desplazamiento relativo y del ángulo de inclinación del <i>DFV</i> . .	22
4.1. Transformación de una curva de capacidad a una curva de comportamiento de un modo	26
4.2. Osciladores lineales de referencia	27
4.3. Modelo para análisis gravitacional y lateral	29
4.4. Modelo elástico de la estructura con disipadores de energía	29
4.5. Modelo inelástico de la estructura con disipadores de energía	30
4.6. Rama elástica e inelástica que permiten definir <i>CCSR</i>	30
4.7. Espectros de desplazamientos inelásticos reducido por amortiguamiento . . .	32
4.8. Obtención de la resistencia correspondiente a T_E	33
4.9. Curva de comportamiento de un sistema de referencia, <i>CCSR</i>	33
4.10. Espectros elásticos de resistencia escalados para los análisis modales espectrales	35
5.1. Planta y elevación del edificio	38
5.2. Propuesta de modelo con daño, con articulación en extremos de vigas.	39
5.3. Perfil de desplazamientos y distorsiones	41
5.4. Desplazamiento del espectro inelástico correspondiente a TE	42
5.5. Obtención de la resistencia de fluencia R_y/m	42

5.6. Curva de comportamiento del sistema referencia	44
5.7. Espectros elásticos escalados	44
5.8. Modelo de análisis utilizado en OpenSees (Mazzoni <i>et al.</i> , 2013)	45
5.9. Perfil de desplazamientos, obtenido en un paso arbitrario	46
5.10. Comparación de respuestas entre el método simplificado y análisis no lineal .	47
5.11. Comparación de distribuciones de daño	48
5.12. Cocientes de momentos resistente de demanda y diseño	48

Índice de tablas

2.1. Criterios de aplicabilidad en disipadores de energía, de acuerdo con el FEMA-356	7
2.2. Matriz de objetivos de desempeño propuestos por Vision 2000	8
2.3. Procedimientos de diseño sísmico presentados por distintos autores, de acuerdo con los criterios 1 y 2	10
2.4. Métodos de diseño basado en desplazamientos	11
5.1. Cargas muertas	38
5.2. Cargas vivas	38
5.3. Propiedades del concreto y el acero de refuerzo	38
5.4. Secciones transversales de columnas y vigas (preliminares)	39
5.5. Propiedades dinámicas	40
5.6. Valores de desplazamiento de fluencia	40
5.7. Valores de desplazamiento último	40
5.8. Valores de rigidez de posfluencia y ductilidad	40
5.9. Valores de amortiguamiento	41
5.10. Valores de resistencia por unidad de masa	42
5.11. Obtención del coeficiente de amortiguamiento del modelo elástico	43
5.12. Obtención del coeficiente de amortiguamiento del modelo con daño	43
5.13. Coeficientes de amortiguamiento y de diseño	43

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Durante mucho tiempo la ingeniería sísmica ha centrado sus esfuerzos en el diseño, análisis y compresión de los efectos sísmicos sobre las estructuras, todo en el afán de tener edificaciones de mayor seguridad para la población y con el mínimo de pérdidas materiales. Dichos esfuerzos han sido concentrados en los reglamentos de construcción, los cuales garantizan un adecuado comportamiento estructural y la satisfacción de las demandas para los distintos estados límites de diseño.

Sin embargo los sismos destructivos de las últimas décadas, han expuesto, por una parte, las limitaciones de la filosofía de diseño que existe tras los reglamentos y, por otra, la idea de utilizar, más activamente, el uso de las tecnologías aplicadas a las estructura, con la finalidad de controlar y mitigar los efectos sísmicos.

Dichas limitaciones son el producto de la filosofía de diseño basada en fuerzas, en donde las resistencias se obtienen de un espectro reducido por factores que consideran, inadecuadamente, la sobrerresistencia, la ductilidad y el comportamiento inelástico de los elementos estructurales. Aunque estos factores tratan de reproducir el daño global, en esencia no representan el comportamiento esperado y, por lo tanto, las fuerzas obtenidas, no son valores directos del daño esperado.

Respecto a la utilización de tecnologías para fines del diseño sísmico, las hay en una gran variedad y éstas se clasifican en aisladores de base, disipadores pasivos y activos de energía. Que para fines de ésta tesis se utilizan los disipadores pasivos de energía(**DPE**), específicamente los dispositivo de fluidos viscosos lineales (**DFV**). Este dispositivo no se ha generalizado en su utilización y, a la fecha, solo se observa en aquellas estructuras que justifiquen su utilización, por ejemplo, en aquellas estructuras que por la importancia de su contenido, estrategia constructiva, valor histórico o por el fin de rehabilitación, proporciona mayores ventajas constructivas y de seguridad contra un diseño tradicional.

Respecto a lo anterior, los reglamentos y códigos de diseño no han limitado la utilización de disipadores de energía, por ejemplo, el Reglamento de Construcción para el Distrito Federal GDF (2004) menciona, brevemente, la utilización de aisladores y dispositivos disipadores, sin embargo, éste no proporciona mayor información para su diseño. En contraste, el manual de diseño CFE (2008) presenta, de manera generosa, información acerca de tipos, características y métodos de análisis de aisladores de base y disipadores de energía.

A nivel internacional existe una mayor labor en los códigos de diseño, respecto a la inserción de aisladores y disipadores de energía, entre los que pueden mencionar son el *Blue Book* (SEAOC, 1999), FEMA-273 (1997) y FEMA-274 (1997), complementado con criterios y ejemplos de diseño son el FEMA-450-1 (2003), FEMA-P750 (2009) y el reporte MCEER-00-0010 (Constantinou *et al.*, 2000).

Enfocado en mejorar el diseño sísmico, bajo una nueva perspectiva de diseño, se han elaborado diversos métodos que relacionan directamente el daño esperado con un estado límite de diseño, garantizando así un mayor control sobre los niveles de desempeño y de los factores que influyen en el comportamiento estructural. En conjunto con éstos métodos se han incorporado los disipadores de energía, los cuales contribuyen a modificar la respuesta estructural mediante la variación la fracción del amortiguamiento crítico.

Autores como Lin *et al.* (2003), Kim y Choi (2006), Sullivan y Lago (2012), han desarrollado métodos de diseño con **DFV**, bajo el enfoque basado en desplazamientos. El método propuesto por Sullivan y Lago (2012) hace una combinación de procedimientos y ecuaciones definidas por Lin *et al.* (2003), Priestley *et al.* (2007) y el Eurocodigo CEN EC8 (2004). Este método utiliza el concepto de la estructura sustituta, que representa al modelo un sistema de múltiples grados de libertad a otro sistema equivalente de un grado de libertad que aproxima la respuesta no lineal máxima, en dicho método se determinan los desplazamientos de diseño y de fluencia, la ductilidad y el valor del amortiguamiento de la estructura y el de los disipadores.

1.2. Objetivo y alcances de la tesis

En esta tesis se propone una alternativa de diseño sísmico basado en desplazamientos con disipadores pasivos de energía.

El procedimiento de diseño propuesto, se basa en el método desarrollado por López y Ayala (2013), con base al fundamento del trabajo de Ayala (2001), así como del trabajo Doctoral de Castellanos (2013). El método, en su sentido original, se enfoca en determinar una curva de comportamiento de un sistema de referencia de un grado de libertad que garantice un desplazamiento objetivo, de acuerdo a un nivel de desempeño asociado a una distribución de daño, y a partir de espectros escalados, determinar la resistencia de los elementos estructura-

dos. El procedimiento propuesto se extiende al incorporar los **DFV**, mediante modificación del valor típico de la fracción del amortiguamiento viscoso para satisfacer, en conjunto con la estructura, el desplazamiento objetivo.

Para ejemplificar el procedimiento propuesto, se presenta su aplicación en un marco de concreto reforzado, de ocho niveles, con tres crujías, de configuración regular y de uso típico de oficinas. En la crujía central y sobre todos los niveles se colocan, en posición diagonal, los disipadores viscosos. El desplazamiento objetivo se define de acuerdo con el límite especificado por el Reglamento de Construcción del GDF (2004), con base una distorsión máxima de entrepiso para el estado límite de colapso, una distribución de articulaciones plásticas congruente con la filosofía de *columna fuerte - viga débil*. Las demandas de los elementos estructurales se establecen por medio de espectros de respuesta obtenidos de la componente E-W de la seña sísmica registrada en la estación SCT durante el sismo del 19 de Septiembre de 1985.

Finalmente, para verificar que los resultados obtenidos con el método propuesto son válidos, se realiza un análisis no lineal paso a paso con el software OpenSees (Mazzoni *et al.*, 2013), comparando las respuestas de los desplazamientos laterales, distorsiones de entrepiso y de los valores de resistencia.

1.3. Organización de la tesis

El desarrollo de este trabajo se distribuye en 6 capítulos, mismos que son descritos, de manera breve, en el siguiente listado.

- Capítulo 1. Describe el problema, las opciones presentadas para abordarlo y el procedimiento propuesto como alternativa de diseño. Se indican los objetivos de la tesis y los alcances de la misma.
- Capítulo 2. Presenta los conceptos de la filosofía basada en desempeño y un listado de los métodos existentes basado en desplazamientos, se indica los métodos de diseño con disipadores pasivos de energía y se describe uno de éstos.
- Capítulo 3. Describe la clasificación, antecedentes y características de los disipadores de energía de tipo fluidos viscosos, se indica su influencia durante un evento sísmico y se presenta la formulación que determina la cantidad de amortiguamiento aportada por éstos durante un ciclo de movimiento
- Capítulo 4. Presenta los fundamentos del procedimiento propuesto y se describe cada paso; se indica la obtención del coeficiente de amortiguamiento de diseño, de los disipadores, y la determinación de las resistencia de diseño de vigas y columnas. Al final se mencionan algunas recomendaciones de diseño.

- Capítulo 5. Se muestra un ejemplo de aplicación, describiendo las características geométricas de un marco plano, las acciones sísmicas consideradas, las dimensiones y propiedades de los elementos estructurales, los softwares utilizados y los límites de diseño. Así también, se precisan las características del modelo de análisis no lineal utilizado y se indican y comparan los resultados del análisis no lineal y del procedimiento propuesto.
- Capítulo 6 Presenta las conclusiones y observaciones del trabajo desarrollado.

Capítulo 2

Estado del arte del diseño sísmico basado en desempeño

2.1. Fundamentos del diseño sísmico basado en desempeño

Los códigos de diseño sísmico basado en fuerzas (**DSBF**) se han actualizado y refinan constantemente en sus procedimientos y criterios de diseño que permiten no solo satisfacer estados límites de resistencia, si no también, de desplazamientos laterales para los estados de servicio y colapso. Sin embargo, los sismos destructivos en las últimas décadas han evidenciado que las edificaciones diseñadas con estos códigos en ocasiones presentan comportamientos no esperados, daños en elementos estructurales y no estructurales, así como pérdidas de vidas y materiales.

Recientemente se ha ido cambiando la idea de que no necesariamente un incremento en la resistencia global de la estructura puede garantizar seguridad y una reducción del daño. Esta idea fue introducida con base en los principios de capacidad en Nueva Zelanda en los 70s por Park y Paulay (1975). Con estos investigadores se inició una nueva filosofía de diseño, en la cual el valor de la resistencia en toda la estructura es más importante que el valor global del cortante de diseño. Lo anterior se observó en un marco de concreto reforzado sometido a una acción sísmica, donde éste presentaba un mejor desempeño si se garantiza la formación de articulaciones plásticas en vigas y no en columnas (mecanismo de *columna fuerte viga débil*). Esta nueva filosofía marcó un parteaguas en el diseño, estableciéndose así los principios del diseño sísmico basado en desempeño (**DSBD**), la cual se enfoca en tener procesos de diseño y un estado de daño más controlado (Priestley, 2000).

Los organismos que establecieron los criterios basados en desempeño son el SEAOC (1995) en su reporte Vision 2000, *Blue Book* SEAOC (1999), el FEMA-273 (1997), entre otros. De estos organismos, el comité Visin 2000 (SEAOC, 1995), definió el concepto de **DSBD** como

la selección de los criterios de diseño, de los sistemas y configuraciones estructurales apropiados, del dimensionamiento y detallado de los elementos estructurales, no estructurales y del contenido; de la garantía y el control de la calidad durante la construcción y el mantenimiento a largo plazo, de manera tal que para niveles especificados de movimiento del terreno y con niveles definidos de confiabilidad, la estructura no experimentará daños más allá de ciertos estados límite u otros estados de utilidad.

Dado que en México no se cuenta con reglamentos que se basen de manera explícita en la filosofía basada en desempeño, se presentan los conceptos que se han definido para éste en el estado de California, en la costa Oeste de los Estados Unidos de América, por el comité Vision 2000.

2.1.1. Niveles de desempeño

El nivel de desempeño describe un estado de daño a elementos estructurales y no estructurales para un determinado nivel de diseño sísmico. De acuerdo con Vision 2000 (SEAOC, 1995) se clasifican los siguientes:

- Completamente funcional. Las instalaciones continúan en operación y funcionamiento normal, no existe daño.
- Funcional. Se presenta daño moderado en elementos estructurales y no estructurales y en el contenido de la edificación. La estructura puede ser ocupada inmediatamente; sin embargo, existen interrupciones parciales que impiden el funcionamiento normal del edificio.
- Seguridad de vida. Se relaciona con la ocurrencia de daño moderado en elementos estructurales y no estructurales. Los daños producidos pueden impedir que la estructura sea ocupada inmediatamente. Es posible rehabilitar la estructura; sin embargo, no es práctico repararla, desde el punto de vista económico.
- Cercano al colapso. este nivel se asociado con la ocurrencia de daño severo en elementos estructurales y no estructurales, el colapso de la estructura es prevenido.

La forma de cuantificar la intensidad de daño estructural o no estructural, se realiza por medio del concepto de índice de desempeño. Éste se define como el parámetro de respuesta estructural a través del cual se puede obtener una medida del daño de una edificación (López, 2009), los índices comúnmente empleados son: ductilidad, desplazamiento, distorsión de entrepiso, energía disipada, velocidades máximas, aceleración e índice de daño.

2.1.2. Niveles de desempeño para disipadores de energía

La primera publicación en incluir los niveles de desempeño con disipadores de energía dentro de las guías y recomendaciones de diseño fue el FEMA-273 (1997), ahora con una versión

actualizada el FEMA-356 (2009). Con base en lo anterior, se extrajo, del capítulo 9 de esta última publicación, la tabla 2.1, la cual establece los límites de aplicabilidad de los sistemas con amortiguadores y aisladores de base para distintos niveles de desempeño.

De acuerdo con la tabla 2.1, se observa que los disipadores de energía presentan mayor aplicabilidad con respecto a los aisladores de base, *e.g.* para estructuras altas los aisladores de base no son una opción viable para los niveles Operacional y Prevención de colapso, esto desde el punto de vista económico. A diferencia de los disipadores de energía que pueden ser aplicados para distintos niveles de desempeño, con algunas limitaciones, también, desde el punto de vista económico.

En general, al incorporar a una estructura disipadores de energía, éstos son de mayor elegibilidad por que pueden alcanzar distintos niveles de desempeño en estructuras nuevas y en rehabilitación, sin embargo un diseño para Prevención de Colapso la economía puede ser un factor que influya en la utilización de éstos (Hanson y Soong, 2001).

Aplicabilidad de aisladores de base y disipadores con respecto a niveles de desempeño

Nivel de desempeño	Rango de desempeño	Aisladores	Disipadores de energía
Operacional	control de daño	muy adecuado	limitado
Ocupación inmediata		adecuado	adecuado
Seguridad de vida	seguridad limitada	limitado	adecuado
Prevención de colapso		no práctico	limitado

Tabla 2.1: Criterios de aplicabilidad en disipadores de energía, de acuerdo con el FEMA-356

2.1.3. Niveles de diseño sísmico

De acuerdo con Vision 2000 (SEAOC, 1995), los niveles de diseño se definen como un conjunto de eventos sísmicos que representan el peligro sísmico particular de la región en la que se ubique la estructura; estos niveles están clasificados por su periodo de retorno (T_r) o por la probabilidad de excedencia (P_e), como se indica en la siguiente clasificación.

- sismo frecuente: $T_r = 43$ años - P_e 50 % en 30 años
- sismo ocasional: $T_r = 72$ años - P_e 50 % en 50 años
- sismo raro: $T_r = 475$ años - P_e 10 % en 50 años
- sismo muy raro: $T_r = 970$ años - P_e 5 % en 50 años o 10 % en 100 años

- sismo extremadamente raro: $TR = 2475$ años - P_e 2 % en 50 años

Los niveles de diseño sísmico antes mencionados solo representan el peligro sísmico para la costa Oeste de los Estados Unidos de América.

2.1.4. Objetivo de desempeño

En términos generales, los Objetivos de Desempeño (**OD**) son estados de comportamientos esperados para el diseño global de la estructura, es decir, son los límites para la respuesta estructural (desplazamiento, ductilidad, distorsión, etc). Los **OD** varían según la importancia de la estructura, el uso del inmueble, costos de reparación y/o rehabilitación, las pérdidas ocasionadas por la discontinuidad de uso del inmueble, así como la pérdida de la estructura por su valor histórico y/o cultural.

Para definir el desempeño de una estructura, el comité Vision 2000 (SEAOC, 1995) propuso la matriz indicada en la tabla 2.2, la cual se define en términos del sismo de diseño, del estado máximo del estado máximo del daño y de los **OD** que se selecciona de acuerdo con la ocupación y uso de la estructura.

		NIVEL DE DESEMPEÑO			
		Completamente funcional	Funcional	Seguridad de vida	Prevención de colapso
NIVEL DE DISEÑO SÍSMICO	Frecuente Tr = 43 años				
	Ocasional Tr = 72 años				
	Raro Tr = 475 años				
	Muy raro Tr = 970 años				

Tabla 2.2: Matriz de objetivos de desempeño propuestos por Vision 2000

Cada **OD**, de acuerdo con Vision 2000, se ha definido conceptualmente como sigue:

- **Objetivo básico.** Esta definido para edificaciones de ocupación y uso normal. Las estructuras deberán resistir diferentes niveles de diseño sísmico.
- **Objetivo esencial.** Es el objetivo mínimo aceptable para inmuebles cuya operación es crítica después de un evento sísmico, como hospitales, estación de bomberos, policías, centro de control de emergencias y comunicaciones.
- **Objetivo de seguridad crítica.** Este objetivo se define para las diversas edificaciones que almacenan materiales peligrosos, cuya exposición sobre la población es inaceptable.

2.2. Diseño sísmico basado en desplazamientos

Históricamente, la filosofía basada en fuerzas ha proporcionado buenos resultados en otras sollicitaciones de diseño, por ejemplo la acciones de viento o gravitacionales (Fib, 2003). Esta familiaridad, en la forma de obtener las fuerzas, ha conducido a la filosofía del diseño sísmico al enriquecimiento de información, con mayores labores de investigación, y al refinamiento, constante, de los códigos de diseño basados en fuerzas.

Actualmente, investigadores como Priestley *et al.* (2007), entre otros, han estipulado que los desplazamientos en muchos casos son la forma directa de evaluar la intensidad de daño en una estructura (Fib, 2003); ésto se deduce por que los desplazamientos están relacionados con las deformaciones y éstos, a su vez, con los daños estructurales. En este contexto, la *Fédération Internationale du Béton* (Fib), presentó en su publicación Fib (2003), dos tablas que concentra los diversos criterios, enfoques y métodos existentes basados en desplazamientos.

A continuación se describen los distintos criterios de diseño, con enfoque desplazamientos, propuestos por el Fib (2003):

Criterio 1: El rol del desplazamiento en el proceso de diseño

Basado en deformación calculada (**DCB**, por sus siglas en Inglés: Los métodos pertenecientes a esta categoría involucran el cálculo de un desplazamiento máximo esperado para una estructura ya diseñada. El detallado de los elementos se realiza de forma tal que la capacidad de la estructura y sus componentes excedan el desplazamiento máximo calculado. Debido a esto, no se intenta cambiar el sistema para alterar el desplazamiento máximo, sino que la demanda se satisface con un detallado apropiado.

Basado en cálculo iterativo de deformación (**IDSB**, por sus siglas en Inglés): Los métodos basados en esta categoría involucra el análisis de una estructura, previamente diseñada, de la que se obtiene su desplazamiento máximo. El desplazamiento de la estructura se compara con desplazamiento límite definido con antelación, el diseño se acepta si el desplazamiento de la estructura es menor al límite especificado, de lo contrario se necesita iterar el diseño.

Basado en deformación directa (**DDSB**, por sus siglas en Inglés): En estos métodos se utilizan como punto de inicio un desplazamiento objetivo predefinido. El diseño de la estructura se realiza de forma directa y su resultado final es la resistencia requerida y, por consiguiente, la rigidez para alcanzar el desplazamiento objetivo corresponde al nivel de diseño sísmico. Estos métodos no son iterativos y no requieren de un diseño preliminar.

Criterio 2: Tipo de análisis utilizado en el proceso de diseño

Modal espectral usando la rigidez inicial: Métodos basados en la rigidez inicial utilizan la rigidez elástica acoplada con aproximaciones entre la respuesta elástica e inelástica, tales como la regla de iguales desplazamientos u otras relaciones para evaluar la respuesta máxima.

Modal espectral usando la rigidez secante: Estos métodos utilizan la rigidez secante al máximo desplazamiento y el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente para caracterizar la respuesta no lineal de sistemas estructurales.

Análisis dinámicos no lineales paso a paso: En estos métodos se resuelve la ecuación de equilibrio dinámico por medio de integración, especificando un registro sísmico o acelerograma, obteniéndose la respuesta máxima. El análisis puede ser lineal o no lineal. Para el análisis no lineal se requiere definir el comportamiento histerético de los elementos estructurales.

Criterio 3: Limitaciones en los tipos de estructura en que son aplicables.

Algunos métodos de diseño fueron desarrollados para sistemas estructurales específicos, tales como marcos, muros, etc.

De acuerdo con los criterios antes descritos, se presentan la tabla 2.3 donde se concentran a los distintos autores que postulan procedimientos de diseño sísmico, distinguiéndose en la primera columna los procedimientos de análisis y en la primera fila los enfoques para el diseño por desplazamientos.

	DCB	IDSB	DDSB
Espectro de respuesta <i>Rigidez inicial</i>	Moehle(1992), FE- MA(1997), UBC(1997), Panagiotakos y Far- dis(1999), Albanesi <i>et</i> <i>al.</i> (2000), Fajfar (2000)	Browning(2001)	SEAOC(1999), Asch- heim y Black(2000), Chopra y Goel(2001)
Espectro de respuesta <i>Rigidez secante</i>	Freeman(1978), ATC(1996), Pared <i>et</i> <i>al.</i> (1997), Chopra y Goel(1999)	Gulkan y Sozen(1974)	Kowalsky <i>et al.</i> (1995), SEAOC(1999), Priestley y Ko- walsky(2000)
Integración directa <i>Historia en el tiempo</i>	Kappos y Manafpour(2001)	-	-

Tabla 2.3: Procedimientos de diseño sísmico presentados por distintos autores, de acuerdo con los criterios 1 y 2

Así mismo, se presenta la tabla 2.4 en donde se indican los distintos autores que han contribuido con a los métodos de diseño sísmico basados en desplazamientos. En esta tabla se distinguen, en la primera columna, los métodos de diseño, en la segunda columna, los autores y, en la tercer columna, el enfoque que han tomado para el análisis cada autor.

Método	Autor	Categoría
Diseño basado en desplazamiento directo	Kowalsky <i>et al.</i> (1995)	DDSB-Rigidez secante
	SEAOC (1999)	DDSB-Rigidez secante
	Priestley <i>et al.</i> (2000)	DDSB-Rigidez secante
	Chopra <i>et al.</i> (2001)	DDSB-Rigidez inicial
Espectro de capacidad	Freeman (1978)	DCB-Rigidez secante
	ATC (1996)	DCB-Rigidez secante
	Pared <i>et al.</i> (1997)	DCB-Rigidez secante
	Chopra <i>et al.</i> (1999)	DCB-Rigidez secante
	Fajfar (2000)	DCB-Rigidez inicial
Diseño con control de deformaciones	Moehle (1992)	DCB-Rigidez inicial
	Panagiotakos <i>et al.</i> (1999)	DCB-Rigidez inicial
Diseño basado en análisis inelásticos	Kappos <i>et al.</i> (2001)	DCB-Historia en el tiempo
Método de punto de fluencia	Aschheim (2000)	DDSB-Rigidez inicial
Método de la estructura sustituta	Gulkan <i>et al.</i> (1974)	IDSB-Rigidez secante
Método para periodo objetivo	Browning (2001)	IDSB-Rigidez inicial
UBC – Muros estructurales*	UBC (1997)	DCB-Rigidez inicial

Tabla 2.4: Métodos de diseño basado en desplazamientos

2.2.1. Métodos existentes de diseño sísmico basado en desplazamientos con disipadores de energía

Para el caso del diseño sísmico basado en desplazamientos con disipadores de energía, se han desarrollado distintos procedimientos que se basan en los enfoques de Priestley *et al.* (1994), Kowalsky y Priestley (1994) y Grant *et al.* (2005). Los expositores de estas corrientes de procedimientos son Sullivan y Lago (2012), Lin *et al.* (2003), Kim y Choi (2006) y FEMA-P750 (2009); los primeros dos se desarrollan bajo la perspectiva del método de Diseño Basado en Desplazamiento Directo (**DBDD**) y los últimos dos para el método Espectro de Capacidad, de éste último solo se menciona hasta aquí.

En general, los procedimientos con los métodos **DBDD** parten de un sistemas de múltiples grados de libertad (MGL) a la conversión de un sistema equivalente de un grado de libertad (1GL), éste último llamado conceptualmente como *Estructura Sustituta* que fue desarrollada por Shibata y Sozen (1976). La respuesta de la estructura se determina en función de un espectro de desplazamiento reducido por distintos niveles amortiguamiento. La mayor cantidad de trabajo se enfoca en la definición de la estructura sustituta, la obtención del espectro de desplazamiento y en el valor de la cantidad de amortiguamiento del disipador.

Con base en lo anterior, se presenta el procedimiento de Sullivan y Lago (2012), el cual es de fácil aplicación y se fundamenta en los trabajos de Priestley *et al.* (2007) y Lin *et al.* (2003). El procedimiento es para un marco plano con dispositivos disipadores pasivos de energía del tipo fluidos viscosos. Inicialmente se muestra la fig 2.1 que resume el procedimiento antes mencionado y posteriormente los pasos a seguir del mismo.

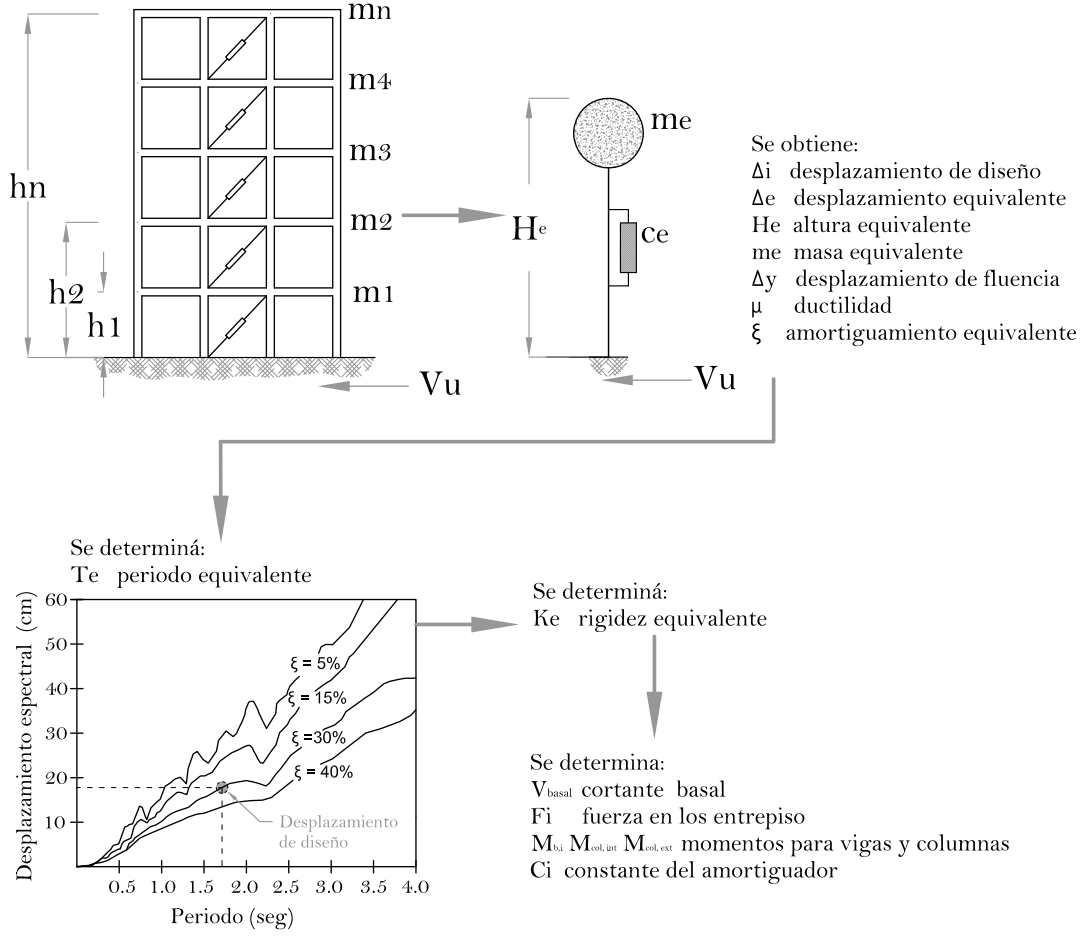


Figura 2.1: Diagrama de flujo del procedimiento basado en *DBDD*

Los pasos del diseño son:

1. Se calcula el desplazamiento de diseño, asociado con la geometría de la estructura y a una distorsión límite, como se indica en la ec. (2.1).

$$\Delta_i = \omega_\theta \theta_c h_i \frac{4H_n - h_i}{4H_n - h_i} \quad (2.1)$$

$$\omega_\theta = 1,15 - 0,0034H_n \leq 1,0 \quad (2.2)$$

Donde θ_c es la distorsión de entrepiso, H_n es la altura total de la estructura, h_i es la altura de cada entrepiso, n es el numero de pisos, ω_θ es un factor que toman en cuenta los modos superiores de vibrar y que se calcula con la ec. (2.2).

2. Se determina el desplazamiento equivalente (Δ_e), la masa equivalente (m_e) y la altura

equivalente (H_e), de acuerdo con las ecs. (2.3), (2.4) y (2.5).

$$\Delta_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (2.3)$$

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}{\Delta_e} \quad (2.4)$$

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (2.5)$$

3. Se obtiene el desplazamiento de fluencia (Δ_y) con las ecs. (2.6) y (2.7).

$$\theta_y = 0,5 \varepsilon_y \frac{L_b}{h_b} \quad (2.6)$$

$$\Delta_y = \theta_y H_e \quad (2.7)$$

Donde θ_y es la distorsión de fluencia, L_b es el claro de la viga medida entre centros de columnas, h_b es el peralte de la viga, ε_y es la deformación de fluencia del acero de refuerzo y Δ_y es el desplazamiento de fluencia. Estas ecuaciones son válidas para marcos regulares, aunque también se puede encontrar adaptaciones a marcos irregulares, *vid* Priestley *et al.* (2007).

4. Se calcula la ductilidad (μ) del sistema equivalente $1GL$, con la ec (2.8).

$$\mu = \frac{\Delta_e}{\Delta_y} \quad (2.8)$$

5. Se determina el amortiguamiento equivalente (ξ_e) con la ec (2.9).

$$\xi_e = \xi_{ih} + \frac{\beta}{2} \quad (2.9)$$

ξ_{ih} se obtiene de la ec.(2.10)

$$\xi_{ih} = 0,05 + 0,565 \frac{\mu - 1}{\mu \pi} \quad (2.10)$$

Donde ξ_e es el amortiguamiento viscoso equivalente, ξ_{ih} es el amortiguamiento inherente de la estructura más el histerético [otras ecuaciones del amortiguamiento histerético se indican en la referencia de Priestley *et al.* (2007)], β es un coeficiente asociado a la fuerza del disipador [*vid* ecs .(2.19) y (2.20)], del cual se sugiere utilizar un valor de 0.30, de acuerdo con Sullivan y Lago (2012).

6. Se determina el espectro de desplazamiento y se escala en función del amortiguamiento ξ_e , como se indica en la ec (2.11).

$$S_{d,\xi_e} = \left(\frac{10}{5 + \xi_e}\right)^{0,5} S_{d,5,0} \quad (2.11)$$

Donde $S_{d,5,0}$ y $S_{d,\xi}$ son las demandas de desplazamiento espectral, la primera corresponde al 5.0 % de amortiguamiento y la segundo al amortiguamiento ξ_e

7. Se determina el periodo equivalente (T_e), obtenido por la intersección de la ordenada Δ_e con el espectro escalado por amortiguamiento
8. Se obtiene la rigidez equivalente (K_e), obtenida de la relación entre la masa (m_e) y al periodo equivalente (T_e), como se indica en la ec. (2.12).

$$K_e = (m_e) \left(\frac{2\pi}{T_e}\right)^2 \quad (2.12)$$

9. Se determina la cortante basal de diseño (V_{base}), con la ec (2.13).

$$V_{base} = K_e \Delta_e \quad (2.13)$$

10. Se distribuye la cortante basal en todos los niveles, en proporción a la masa, al perfil de desplazamientos y a un factor que depende del número de niveles. Para este factor, en edificios de menos de diez niveles ($n < 10$) se utiliza la ec (2.14) y en más niveles se utiliza la ec. (2.15).

Para niveles $n < 10$

$$F_i = k V_{base} \frac{m_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (2.14)$$

Para $10 \leq n$

$$F_i = (1 - k) V_{base} + k V_{base} \frac{m_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (2.15)$$

Donde k es igual a 0.9 para marcos de 10 o más niveles, F es la fuerza lateral en cada nivel, m_i y Δ_i son la masa y el desplazamiento.

11. Se calculan los momentos en vigas y columnas interiores y exteriores, con las ecs (2.16) a (2.18).

Momento en vigas

$$M_{b,i} = \frac{(2k_1 V_i + V_{i+1}) h_s}{4n_b} \quad (2.16)$$

Momento en columnas interiores

$$M_{col.int} = \frac{(1 - k_1 h_s V_{b,fr})}{n_b} \quad (2.17)$$

Momento en columnas exteriores

$$M_{col.ext} = \frac{M_{col,int}}{2} \quad (2.18)$$

Donde $M_{b,i}$ es el momento de diseño para la viga en cada nivel, k_1 es un factor de reducción por flexión de 0.4 para el primer nivel y de 0.5 para el resto de los niveles, V_i y V_{i+1} son las demandas de cortante para cada nivel, h_s es la altura de entrepiso, n_b es el número de claros del marco, $M_{col.int}$ es el momento de diseño de las columnas interiores, $V_{b,fr}$ es la cortante de diseño del marco, $M_{col.ext}$ es momento de diseño en las columnas exteriores.

12. Finalmente, se determina la constante de amortiguamiento de cada nivel con la ec. (2.19).

$$C_i = \frac{F_{d,i} T_e}{2\pi \Delta_{d,j}} \quad (2.19)$$

$F_{d,i}$ se expresa con la ec (2.20)

$$F_{d,i} = \beta V_i \quad (2.20)$$

Donde $F_{d,i}$ es la fuerza del amortiguador, T_e es el periodo efectivo de la estructura, V_i es la cortante de diseño de cada nivel y $\Delta_{d,j}$ es el desplazamiento del amortiguador en cada nivel, éste último calculado con la ec (2.21).

$$\Delta_{d,j} = \theta_{d,j} h_s \cos \theta_{damp} \quad (2.21)$$

Donde $\theta_{d,j}$ es la distorsión de demanda de entrepiso, h_s es la altura de entrepiso θ_{damp} es el ángulo de inclinación de los amortiguadores.

Capítulo 3

Disipación pasiva de energía

3.1. Tipos de disipadores pasivos de energía

En décadas recientes se han implementado nuevas tecnologías que permiten tener estructuras funcionales y seguras contra los peligros naturales, como el sismo y/o viento. Estas tecnologías en muchos casos no son de reciente creación, sin embargo si lo son sentido de aplicación, ya éstas han pasado lentamente de la creación, investigación y aplicación. Concretamente estas tecnologías son los aisladores de base y los disipadores de energía, mismos que por su diversidad en dispositivos y formas de operar se han clasificado en tres grupos de acuerdo con Constantinou *et al.* (1998), los cuales son:

- Aisladores de base
- Disipadores pasivos de energía
- Sistemas activos y semi-activos

Para fines de esta tesis se trabajará solo con los disipadores pasivos de energía, sin embargo las siguientes referencias puede aportar mayor información de dichos grupos Constantinou *et al.* (1998); Liang *et al.* (2012); Naeim y Kelly (1999); Priestley *et al.* (2007) entre otros.

Los disipadores pasivos de energía (**DPE**), son dispositivos que se incorporan dentro de la estructura para disipar la energía de entrada y reducir el daño en elementos principales y secundarios (Constantinou *et al.*, 1998). El funcionamiento de estos dispositivos dependen de la respuesta de la estructura y del material del amortiguador. Según el funcionamiento, éstos pueden aportar rigidez, amortiguamiento viscoso o ambos. Aunque no existe una clasificación unificada de los DPE, existen publicaciones como Liang *et al.* (2012), Constantinou *et al.* (1998) y FEMA-273 (1997), que clasifican a los dispositivos de acuerdo con su modelo matemático, material o respuesta estructural. Acorde con la división de grupos, presentada anteriormente, se presenta la clasificación de los DPE propuesta por Constantinou *et al.* (1998).

- Sistemas histeréticos formados por dispositivos basados en la fluencia de metales y fricción.
- Sistemas viscoelásticos formados por dispositivos sólidos viscoelásticos, fluidos viscoelásticos y fluidos viscosos.
- Otros, son aquellos que no están en las dos clasificaciones anteriores, siendo su principal característica la recuperación de su forma inicial.

De los sistemas anteriores, el dispositivo de fluido viscoso (DFV), también llamado sistema dependiente de la velocidad (FEMA-273, 1997), es el que se abordará en esta tesis.

Físicamente el **DFV** es un cilindro con dos cámaras o espacios en su interior, con un pistón acoplado en un extremo, teniendo terminaciones externas que permiten acoplarlo a la estructura de forma diagonal u horizontal, como se observa en la fig 3.1. En una de las cámaras del interior del dispositivo, existe un aceite de silicona, inerte, no flamable, no tóxico y estable, el cual fluye a través de los orificios de la cabeza del pistón, al mismo tiempo que éste último se desplaza en el interior del cilindro, provoca así una diferencia de presión entre las cámaras que permite disipar la energía de entrada. Las características del DFV se muestran en la fig 3.2.

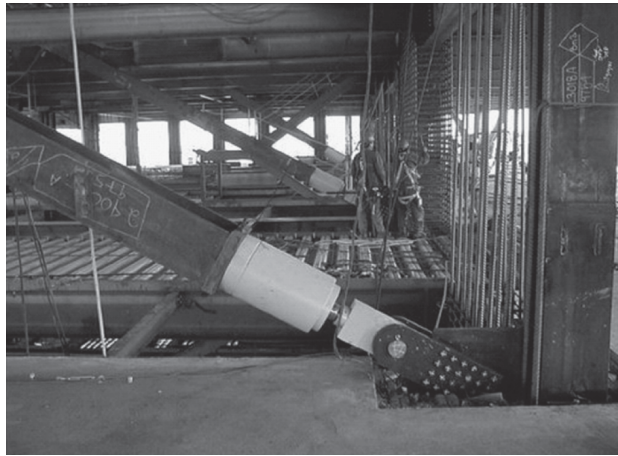


Figura 3.1: Aspecto y posición de un disipador de fluidos viscosos

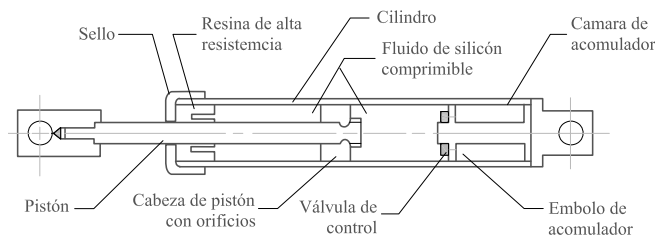


Figura 3.2: Características de un disipador de fluidos viscosos

3.2. Breve reseña histórica de los disipadores de energía del tipo viscoso

Los sistemas de amortiguamiento no son recientes, a inicios del siglo XVIII eran utilizados en el campo de la artillería con la aplicación de resortes metálicos y cuñas (madera o caucho) que limitaban el movimiento del cañón al disparar; posteriormente a mediados del mismo siglo (1860), el ejercito francés utilizó un dispositivo de fluidos (aceite) para incorporarlos a pistolas, donde el fluido era forzado a pasar por pequeños orificios a altas velocidades, generando una fuerza de amortiguamiento.

Los dispositivos de fluidos viscosos se industrializaron con fines bélicos, entre el periodo de 1900 - 1945, sin llegar a ser de uso y de conocimiento público. La apertura al mercado estructural surgió al finalizar la Guerra Fría, en la década de los 80's, con la empresa Taylor Devices que habilitaba estos dispositivos, con fines bélicos, desde 1955; esta empresa se asoció con la Universidad Estatal de Nueva York en Buffalo (SUNYAB) para realizar aplicaciones en puentes y edificios, siendo en esta misma universidad donde se asentó el *Multi-Disciplinary Center for Earthquake Engineering Research* (MCEER), la cual realizó en la década de los 90's los primeros modelos, a escala, de estructuras con disipadores en una mesa vibradora.

3.3. Características del amortiguador lineal viscoso

Como se ha comentado, los amortiguadores son elementos incorporados a un sistema estructural para disipar energía, por ejemplo al entrar una onda senoidal de amplitud D_{max} y frecuencia ω a un sistema 1GL, la energía producida por la onda es canalizada hacia el disipador para que éste disipe la energía mediante histéresis. Lo anterior se observa en la fig 3.3, en donde se presenta relación fuerza - deformación del disipador.

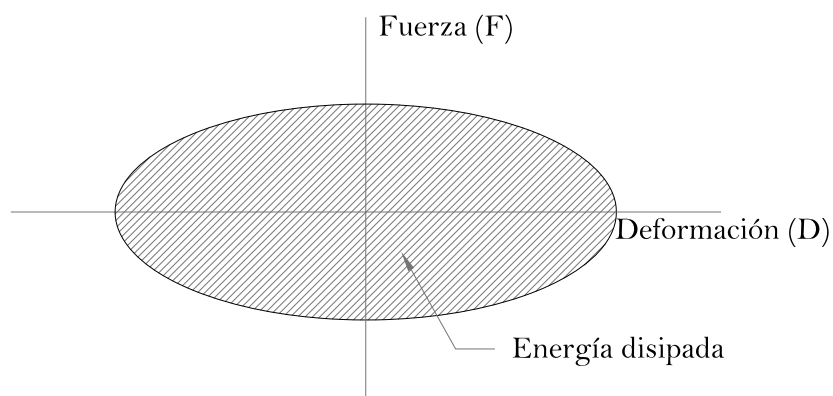


Figura 3.3: Diagrama de fuerza-deformación para un amortiguador de DFV

El área circunscrita por el ciclo histerético de la fig 3.3, es la energía disipada y se define con la ec (3.1).

$$F = C\dot{X}^\alpha \quad (3.1)$$

Donde F es la fuerza resistente del disipador, C es el coeficiente de amortiguamiento, $\dot{X}$ es la velocidad relativa entre los extremos del dispositivo y α es un exponente entre 0.1 y 2. Un amortiguador con exponente $\alpha = 1$ es clasificado como lineal viscoso y con una fuerza proporcional a la velocidad relativa, exponentes diferentes $\alpha \neq 1$ son clasificados como amortiguamientos no lineales.

En la práctica, son utilizados disipadores con exponentes en un rango de 0.3 a 1.0. En edificios y puentes con demandas sísmicas son utilizados disipadores con exponentes en un rango de 0.4 a 0.5. En estructuras con demandas de viento son utilizados disipadores con exponentes entre 0.5 a 1.0 y en el caso de estructuras sometida a ambas demandas (viento y sismo) se utilizan disipadores con exponentes bajos (Taylor y Constantinou, 2003). En la fig 3.4 se muestra la relación entre la fuerza y velocidad del amortiguador para tres tipos de exponentes α , estas relaciones fueron obtenidas con la ec (3.1).

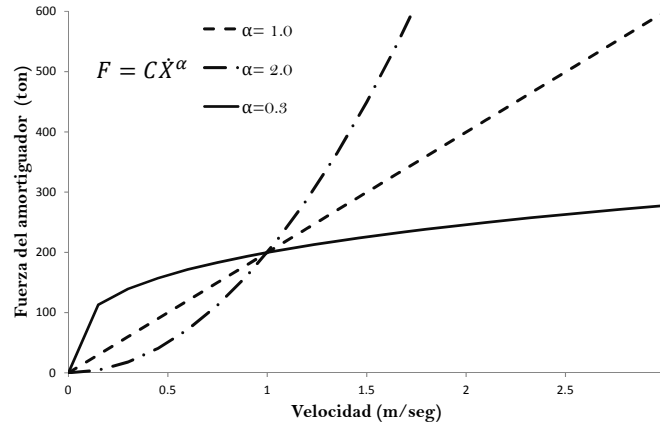


Figura 3.4: Relación entre fuerza y velocidad para un DFV

3.3.1. Modelo matemático

Para representar el comportamiento del **DFV** lineal o no lineal en un análisis en el tiempo, es necesario considerar el modelo de Maxwell, el cual consiste en un resorte y un amortiguador conectados en serie, como se muestra en la fig 3.5; la rigidez del resorte deberá ser lo suficientemente grande, de tal manera que la deformación del dispositivo sea exclusivamente del amortiguador (CFE, 2008). Para determinar la fuerza del disipador de este modelo se retoma la ec (3.1).

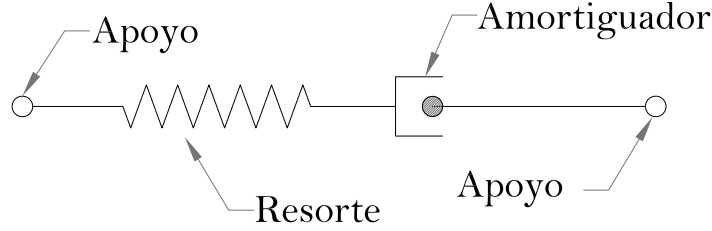


Figura 3.5: Modelo de Maxwell para un *DFV*

Lo anterior se incluye para ilustrar el modelo utilizado dentro del análisis no lineal, el cual forma parte de la validación del procedimiento propuesto.

3.4. Distribución de la energía sísmica en una estructura

Durante un evento sísmico se introduce energía a la estructura, ésta se distribuye en la misma en movimiento, deformación de elementos estructurales y disipación, ésta última por medio de daño y amortiguamiento. Esta distribución se puede entender por medio de la conservación de la energía (Uang y Bertero (1988)), definida por la ec (3.2); en donde la energía de entrada es equilibrada con distintas componentes que son producto de la reacción de la estructura y de las características intrínsecas de la misma.

$$E_i = E_k + E_s + E_h + E_d \quad (3.2)$$

Donde E_i es la energía de entrada del movimiento sísmico, E_k es la energía por movimiento de la estructura (cinética), E_s es la energía por deformación elástica (potencial), E_h es la energía irrecuperable por deformación inelástica y E_d es la energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura y de los disipadores de energía. La obtención de cada variable de la ec (3.2) no se incluye dentro del procedimiento de diseño propuesto, pues no está dentro de los alcances de esta tesis; sin embargo, se muestra por que permite, de manera concreta, visualizar la distribución de la energía y la forma en que se puede influir para modificarla.

3.4.1. Amortiguamiento en estructuras con disipadores de energía lineal viscoso

El conceptualizar una estructura con disipadores viscosos, se concibe automáticamente como un sistema con amortiguamiento no clásico. Los valores característicos obtenidos convencionalmente para ésta, las frecuencias (eigenvalores) y las formas modales (eigenvectores), no pueden utilizarse directamente para obtener la respuesta de la estructura. Sin embargo, los valores característicos de un análisis convencional más la determinación del amortiguamiento

por medio de conceptos de energía, se pueden utilizar para obtener la respuesta de la estructura. Lo anterior es válido para estructuras con disipadores en todos sus niveles y con una distribución regular como irregular (Constantinou y Symans, 1993).

A continuación se presenta la deducción desarrollada por Constantinou y Symans (1993) para la obtención del amortiguamiento en términos de la energía de la estructura y de los disipadores de energía.

La cantidad de amortiguamiento del modo de vibración i es obtenida con la ec (3.3) propuesta por Chopra (1995).

$$\xi_k = \frac{W_k}{4\pi L_k} \quad (3.3)$$

Donde W_k es la energía disipada en un ciclo de movimiento del amortiguador y L_k es la máxima energía de deformación de la estructura. Para evaluar W_k y L_k , de cada modo i se obtiene la frecuencia ω_k y la forma modal ϕ . Con base en lo anterior, se determina, primeramente, W_k con la ec (3.4).

$$W_k = \pi\omega_k \sum_j c_j \cos^2 \theta_j \phi_{rj}^2 \quad (3.4)$$

Donde c_j es el coeficiente de amortiguamiento j , θ_j es el ángulo de inclinación y ϕ_{rj} es el desplazamiento modal relativo del disipador, las variables mencionadas se observan en la fig 3.6.

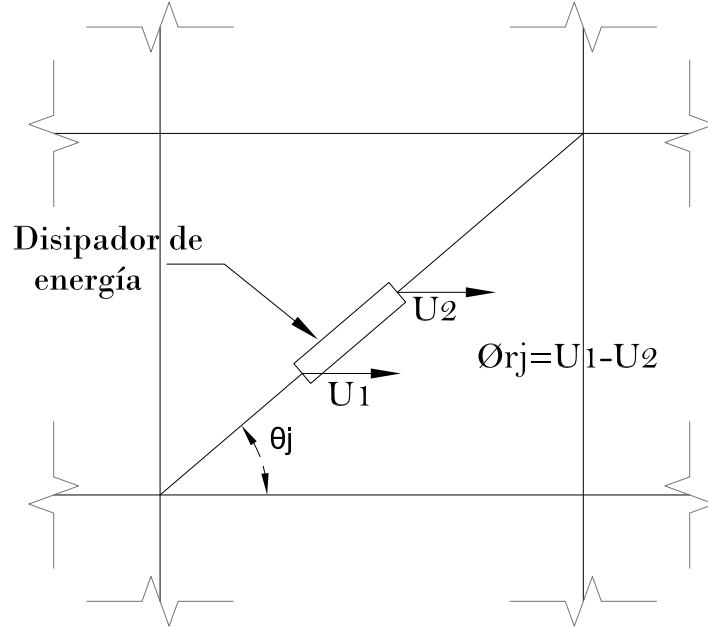


Figura 3.6: Esquema del desplazamiento relativo y del ángulo de inclinación del DFV

Respecto a L_k se expresa como la máxima energía de deformación o máxima energía cinética, de acuerdo con la ec. (3.5) (Chang *et al.*, 1991; Constantinou y Symans, 1993).

$$L_k = \frac{1}{2} \Phi^T K \Phi = \frac{1}{2} \omega_k^2 \sum_i m_i \phi_i^2 \quad (3.5)$$

Donde K y m_i son las matrices de rigidez y de masa de la estructura, respectivamente, y ϕ_i es el desplazamiento modal de la masa m_i . Sustituyendo las ecuaciones (3.4) y (3.5) en la (3.3), se obtiene la cantidad de amortiguamiento de la estructura con disipadores.

$$\xi_k = \frac{1}{2} \frac{\sum_j c_j \cos^2 \theta_j \phi_{rj}^2}{\omega_k \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (3.6)$$

Finalmente, con esta ecuación se determina el coeficiente de amortiguamiento de los disipadores, despejando c_j de la ecuación anterior.

Capítulo 4

Método de diseño sísmico basado en desplazamientos con control de daño y disipación pasiva de energía

4.1. Generalidades

En el actual capítulo se desarrolla el método diseño sísmico con control de daño y disipación pasiva de energía, el cual es propuesto para estructuras a base de marcos regulares con dispositivos disipadores en todos sus niveles y sometidos a acciones sísmicas. Dicho capítulo se organiza, primeramente, con los fundamentos del método propuesto y, posteriormente, los pasos de diseño con figuras esquemáticas en algunos casos. Al final de capítulo se comentan algunas consideraciones adicionales a los pasos de diseño.

El método propuesto se fundamenta en los trabajos de López y Ayala (2013) y Ayala (2001), así como del trabajo doctoral de Castellanos (2013). Los fundamentos tienen como hipótesis que es posible aproximar el desempeño de un sistema de MGL, con comportamiento no lineal, mediante el desempeño de un sistema de referencia no lineal de 1GL, asociado al modo fundamental de vibrar del sistema de MGL (Ayala, 2001). Un sistema de referencia es aquel en el que sus propiedades se definen de tal forma que la respuesta se asocia a un modo de vibrar de la estructura, a diferencia de un sistema equivalente, en el cual las propiedades se definen de tal manera que la respuesta se asocia a la respuesta total de la estructura (Castellanos, 2013).

Para el desarrollo del método propuesto se consideraron dos aspectos: el primero es la utilización de disipadores del tipo **DFV** de comportamiento lineal y colocados de manera regular en toda la estructura; el segundo es, con base en la hipótesis original se puede replantear que el desempeño de un sistema de MGL con disipadores de energía, se pueden aproximar al desempeño de un sistema de referencia no lineal de 1GL, asociado al modo fundamental de vibrar de la estructura y a una fracción del amortiguamiento crítico.

4.2. Hipótesis del método de diseño

El principio básico del método propuesto se basa en la curva de capacidad de un sistema de MGL, la cual se puede aproximar mediante una curva bilineal, considerando equivalencias de energía entre la curva real y la bilineal. La curva bilineal, correspondiente a un modo particular, se puede representar dentro del formato espectral de pseudo-aceleración(S_a)-desplazamiento espectral(S_d) mediante conceptos de la dinámica estructural y el procedimiento propuesto por Freeman (1978), obteniéndose como resultado una curva de comportamiento bilineal del sistema de referencia xde 1GL (*CCSR*), asociada a un modo de vibrar de la estructura. De acuerdo con lo anterior, al definir las características de la curva de comportamiento también se puede conocer la curva de capacidad y viceversa, *vid* fig 4.1.

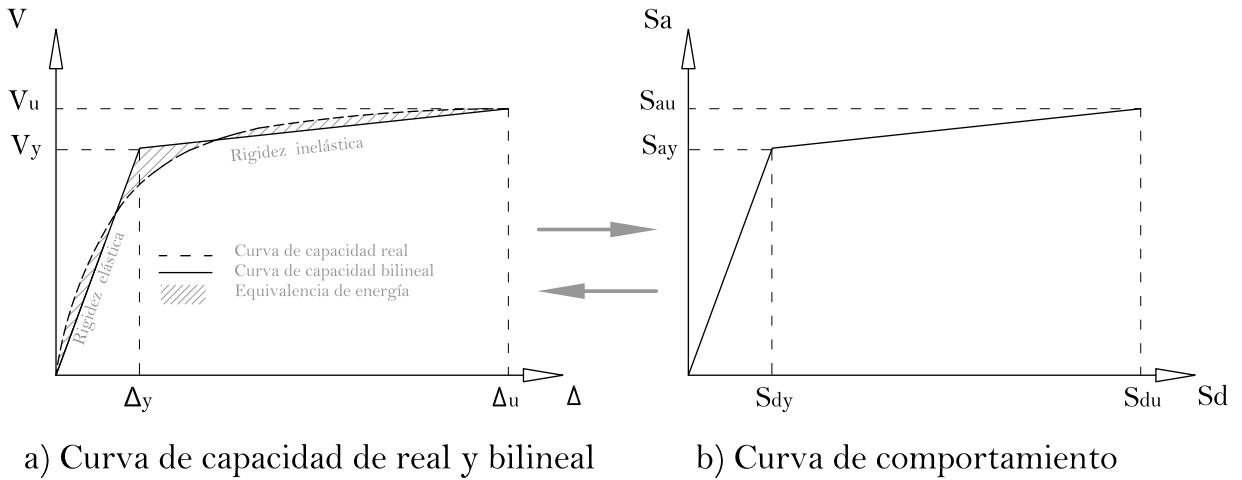


Figura 4.1: Transformación de una curva de capacidad a una curva de comportamiento de un modo

Las variables de la fig 4.1 son: V es la cortante basal, Δ es el desplazamiento de azotea del sistema de MGL, S_a es la pseudo-aceleración espectral equivalente a la resistencia por unidad de masa (R/m), S_d es el desplazamiento espectral. Los subíndices índices u y y indican las condiciones últimas y de fluencia, respectivamente.

Las pendientes de la curva bilineal, mostradas en la fig 4.1a, representan las propiedades de rigidez de la estructura en el rango de comportamiento elástico (pendiente inicial) e inelástico (pendiente final), respectivamente. En la fig 4.1b, la curva bilineal se encuentra definida por los puntos característicos llamados de fluencia (S_{dy}, S_{ay}) y último (S_{du}, S_{au}); estos puntos definen la *CCSR*, donde la primera rama representa la etapa de comportamiento elástico y la segunda describe la etapa de comportamiento inelástico, esta última asociada al estado de daño; la pendientes de la *CCSR*, se encuentra en términos de frecuencias circulares al cuadrado (ω^2).

4.2.1. Representación de la curva de comportamiento mediante osciladores lineales de referencia

Con base en los fundamentos, dada una curva de comportamiento, asociada a un sistema de referencia bilineal, es posible representar dicha curva como la superposición de las respuestas de dos osciladores lineales de un grado de libertad con masa (m), rigidez (K) y amortiguamiento (ξ), como se observa en la fig 4.2. Estas características (m , K y ξ) están asociadas a las propiedades elásticas y de posfluencia de la estructura.

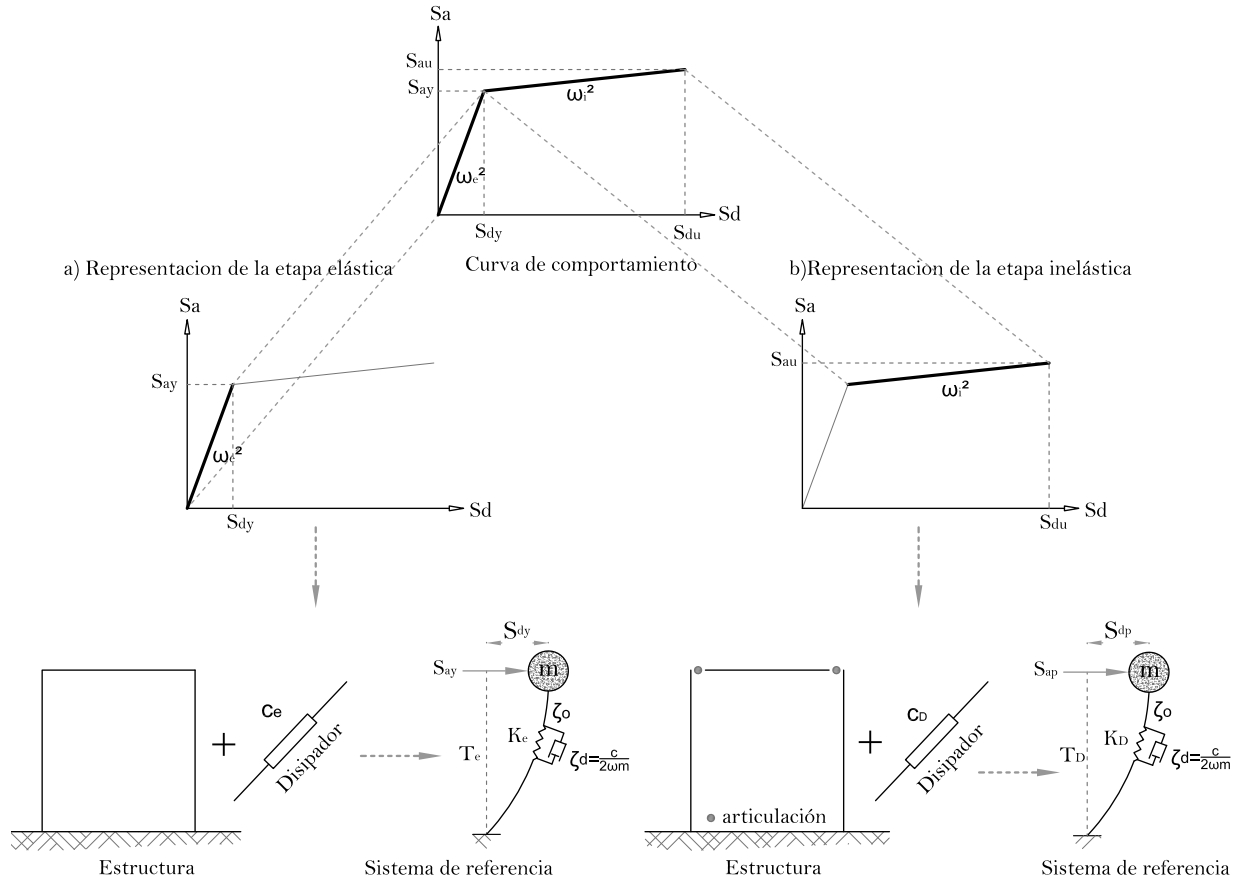


Figura 4.2: Osciladores lineales de referencia

De acuerdo con los conceptos básicos de la dinámica estructural y a la figura 4.2, la respuesta de un oscilador de un grado de libertad con comportamiento bilineal se pueden describir con las siguientes ecuaciones:

$$S_{dy} = \frac{S_{ay}(T, \xi)}{\omega_E^2} \quad (4.1)$$

$$S_{du} = \mu S_{dy} \quad (4.2)$$

$$S_{au} = [1 + \alpha(\mu - 1)]S_{ay}(T, \xi) \quad (4.3)$$

$$\alpha = \left(\frac{\omega_D}{\omega_E}\right)^2 = \left(\frac{T_E}{T_D}\right)^2 \quad (4.4)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4.5)$$

Donde μ es la ductilidad, α es la razón entre la rigidez de posfluencia y la elástica, T_E y T_D son los periodos fundamentales de las etapas elásticas y de posfluencia, respectivamente, definidas con la ec (4.5) y asociadas a las frecuencias circulares ω_E y ω_D .

En las ecuaciones antes descritas, comúnmente se utilizan la fracción del amortiguamiento crítico del 5,0 %, sin embargo, al utilizar disipadores de energía el valor del amortiguamiento podría incrementar y la aplicabilidad de dichas ecuaciones podría no ser adecuada hasta cierto límite. Lo anterior se ha observado en sistemas de 1GDL, en donde las ecuaciones con y sin amortiguamiento presentan diferencias de 0.13 %, 0.50 %, 2.02 % y 4.61 % para amortiguamientos de 5.0 %, 10.0 %, 20.0 % y 30.0 %, respectivamente. Como se observa, con las ecuaciones comúnmente definidas para la dinámica estructural se pueden obtener buenas aproximaciones hasta un valor de amortiguamiento del 20.0 %.

A pesar de que existen diversos textos especializados en disipadores de energía, en donde presentan las formulaciones del periodo y la frecuencia en relación directa con el amortiguamiento, no se abordarán éstas en la tesis. Lo anterior es con la intención de trabajar con las ecuaciones que comúnmente se utilizan en la dinámica estructural, por la facilidad y familiaridad de las mismas.

La ec (4.1) muestra la relación entre el desplazamiento espectral S_{dy} y la pseudo-aceleración espectral $S_{ay}(T, \xi)$ de la etapa elástica, la cual es válida para un sistema con masa, rigidez y una fracción de amortiguamiento. Dicha relación es directa y se obtiene con una masa unitaria ($m = 1$), rigidez elástica ($k_E = \omega_E^2$), sujeto a una cortante basal de ($1 * S_{ay}(T, \xi)$). De manera similar, la etapa de inelástica (posfluencia) del sistema se puede representar mediante un oscilador lineal con una rigidez asociada al estado de daño de la estructura, lo anterior es demostrable, pero por no desviar el enfoque del trabajo se omite su demostración, sin embargo ésta se puede consultar en López y Ayala (2013).

Habiendo presentado los fundamentos del método propuesto, se presenta el procedimiento de diseño sísmico con disipadores de energía del tipo **DFV**.

4.3. Procedimiento de diseño

Los pasos son:

1. **Realizar un diseño preliminar de la estructura**

El diseño de la estructura parte de un predimensionamiento, obtenido de un análisis

convencional de cargas gravitacionales y laterales, como se observa en la fig 4.3. Para tal fin, puede utilizarse un enfoque basado en fuerzas o de acuerdo con la experiencia del diseñador.

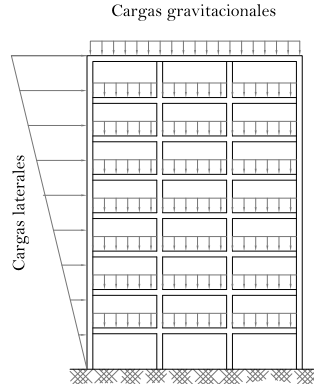


Figura 4.3: Modelo para análisis gravitacional y lateral

2. Construcción de un modelo elástico

Definida la estructuración, a este modelo se le denomina modelo elástico con disipadores, *vid* fig 4.4. Los disipadores son propuesto en todos los niveles, pero sin definir la fuerza de diseño ni la cantidad de amortiguamiento de éstos. El modelo de la estructura se le separa de los disipadores para realizar un análisis de valores característicos, obteniéndose el periodo fundamental (T_E) y con éste mismo determinar la pendiente de la rama inicial (rigidez elástica) de la *CCSR*, con la ec (4.6).

$$S_a(T_E, \xi) = \omega_E^2 S_d = \left(\frac{2\pi}{T_E}\right)^2 S_d \quad (4.6)$$

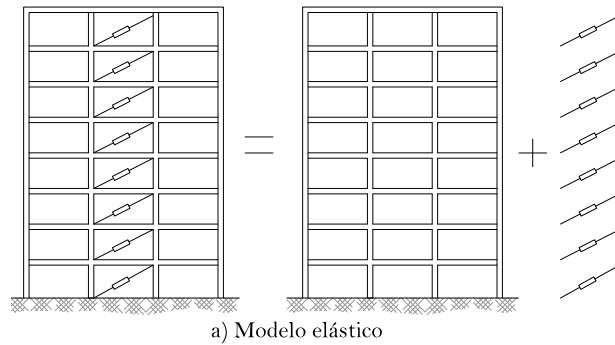


Figura 4.4: Modelo elástico de la estructura con disipadores de energía

Donde $S_a(T_E, \xi)$ es la pseudo-aceleración espectral, ω_E es la frecuencia natural de vibrar y S_d es el desplazamiento espectral.

3. Construcción de un modelo con daño

Del modelo elástico se construye otro modelo, denominado modelo con daño. Para este modelo se propone una distribución de daño racional asociada al nivel de desempeño de diseño. Debe considerarse que en la distribución de daño propuesta se encuentran implícitos los disipadores. La distribución del daño es introducido en el modelo elástico por medio de articulaciones en los extremos de los elementos que acepten la ocurrencia del comportamiento inelástico, *vid* fig 4.5. Igual que el paso anterior, el modelo de la estructura se separa de los disipadores para realizar un análisis de valores característicos, obteniéndose el periodo fundamental (T_I) y con éste se define la segunda rama (rigidez post-fluencia) de la *CCSR*, con la ec (4.6), pero sustituyendo T_E por T_I .

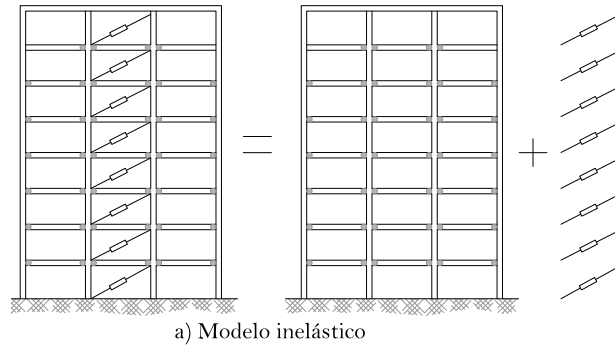


Figura 4.5: Modelo inelástico de la estructura con disipadores de energía

Obtenido los valores característicos de los modelos elásticos y con daño, se trazan las pendientes de la *CCSR* con la ec (4.6), proyectándolas en el espacio definido por la pseudo-aceleración espectral-desplazamiento espectral, como se observa en la figura 4.6.

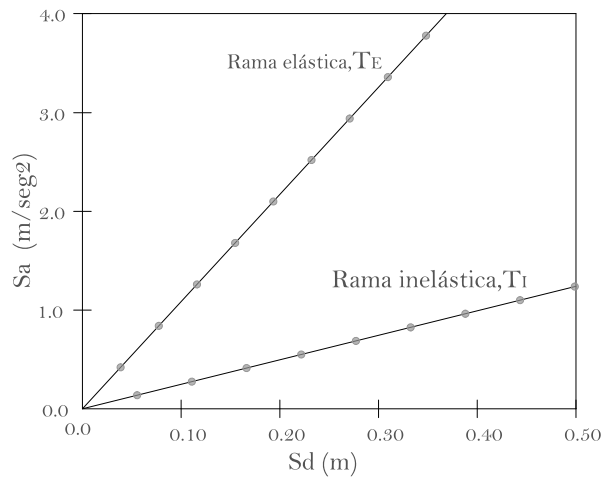


Figura 4.6: Rama elástica e inelástica que permiten definir *CCSR*

4. Definición de desplazamiento de fluencia de la *CCSR*

Como se observa en la figura anterior solo se trazan las pendientes de la *CCSR* sin definir sus puntos característicos, éstos últimos se determinan como se indican a continuación. El desplazamiento de fluencia (S_{dy}) es el punto de intersección entre las dos las pendientes de la *CCSR*, mismo que está en función de las propiedades geométricas de la estructura y de sus materiales. Este desplazamiento se determina utilizando la ecuación propuesta por López (2009), en conjunto con las ecs (4.7) y (4.8).

$$\Delta_y = \frac{\delta_y}{\delta'_E} \quad (4.7)$$

$$S_{dy} = \frac{\Delta_y}{FP_{E1}\Phi_{E1n}} \quad (4.8)$$

Donde Δ_y es el desplazamiento de fluencia de azotea, δ_y es la distorsión de fluencia, δ_E es la distorsión máxima de entrepiso normalizada con respecto al desplazamiento de azotea, S_{dy} es el desplazamiento de fluencia de la *CCSR*, FP_{E1} es el factor de participación del modo fundamental, Φ_{E1n} es la magnitud de la forma modal correspondiente al nivel de azotea. Las literales antes mencionadas son referentes al modelo elástico.

5. Obtención del desplazamiento objetivo de la *CCSR*

El desplazamiento objetivo (S_{do}) se define en función de los valores máximos permisibles de distorsiones o desplazamientos que establecen los reglamentos de construcción o normas de diseño. Para calcular este desplazamiento se considera que la deformada obtenida del análisis modal del modelo con daño se aproxima a la deformada asociada a su etapa de comportamiento inelástico, por lo cual es posible calcular el desplazamiento objetivo con las ecs (4.9) y (4.10).

$$\Delta_0 = \frac{\delta_o}{\delta'_{Dn}} \quad (4.9)$$

$$S_{do} = \frac{\Delta_0}{FP_{D1}\Phi_{D1n}} \quad (4.10)$$

Donde Δ_0 es el desplazamiento límite de azotea, δ_o es la distorsión objetivo que está en función de la distribución de daño propuesta, δ_{D1n} es la distorsión máxima de entrepiso normalizada con respecto al desplazamiento de azotea, S_{do} es el desplazamiento objetivo de la *CCSR*, FP_{D1n} es el factor de participación del modo fundamental, Φ_{D1n} es la forma modal correspondiente al nivel de azotea. Estas literales son con respecto al modelo con daño.

6. Determinar la rigidez de posfluencia a elástica y la ductilidad global para la *CCSR*

La relación de rigidez de posfluencia a elástica ((α)) se determina con la ec (4.11) (Sandoval, 2000).

$$\alpha = \left(\frac{\omega_D}{\omega_E}\right)^2 = \left(\frac{T_E}{T_D}\right)^2 \quad (4.11)$$

La ductilidad (μ) se determina en función de los desplazamientos de fluencia (S_{dy}) y objetivo (S_{do}), de acuerdo con la ec.(4.12).

$$\mu = \frac{S_{do}}{S_{dy}} \quad (4.12)$$

7. Determinar la cantidad de amortiguamiento para la *CCSR*

Se determina un conjunto de valores de amortiguamiento de acuerdo con la ec (4.13).

$$\xi_{total} = \xi_o + \xi_d \quad (4.13)$$

Donde ξ_{total} es el amortiguamiento total de la *CCSR*, ξ_o es el amortiguamiento inherente de la estructura (comúnmente de 5.0 % para marcos de concreto) y ξ_d es el amortiguamiento de los disipadores de energía el cual es un valor propuesto. El amortiguamiento inherente (ξ_o) no deberá ser mayor del 20,0 % de la fracción del amortiguamiento crítico. Se recomienda determinar varios valores de ξ_{total} , hasta determinar una que satisfaga el S_{do} .

8. Determinar el desplazamiento inelástico de acuerdo con el desplazamiento objetivo de la *CCSR*

A partir de varios espectros inelásticos de desplazamiento reducidos por amortiguamiento (ξ_{total}), se busca un punto, en las curvas espectrales, en donde el desplazamiento objetivo (S_{do}) de la *CCSR* se aproxime al desplazamiento espectral ($S_{despectral}$), en correspondencia al periodo del modelo elástico T_E . De acuerdo con lo anterior, en la fig 4.7 se observa el punto en la curva que satisface $S_{do} \approx S_{despectral}$. En caso de que el $S_{despectral}$ esté por debajo del S_{do} , se tendrá que modificar la estructura inicial y/o distribución de daño propuesta de acuerdo al paso 2 o 3. Así también, en caso de modificar la distribución de daño, está deberá ser consistente con el estado límite de diseño.

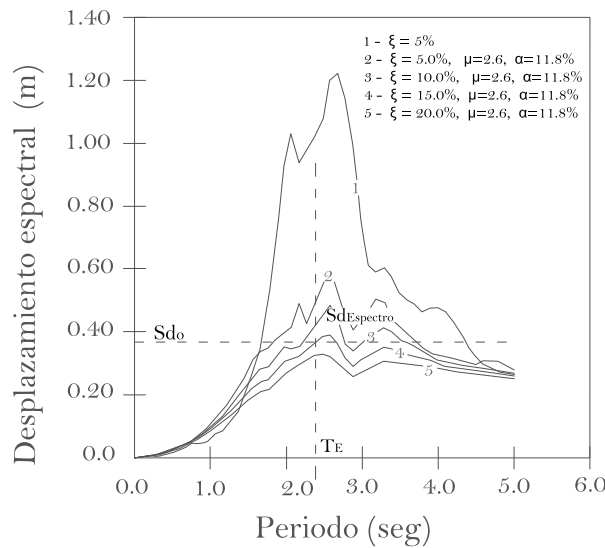


Figura 4.7: Espectros de desplazamientos inelásticos reducido por amortiguamiento

9. **Calcular la resistencia de fluencia de la *CCSR***

Concluido lo anterior, se obtiene la resistencia de fluencia (R_y/m) a partir de un espectro de inelástico de resistencia por unidad de masa, asociado dicha resistencia de acuerdo con el periodo T_E . La curva del espectro está asociada a α , μ y ξ_{total} , los cuales fueron obtenidos anteriormente.

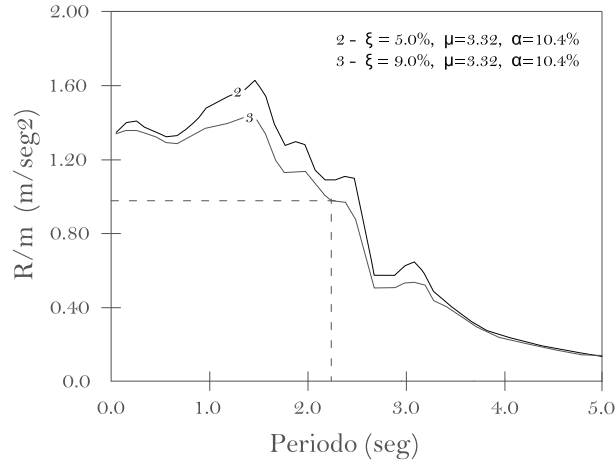


Figura 4.8: Obtención de la resistencia correspondiente a T_E

10. **Calcular la resistencia última de la *CCSR***

Se obtiene la resistencia última, (R_u/m), de acuerdo con la ec (4.14)

$$R_u/m = R_y/m[1 + \alpha(\mu - 1)] \quad (4.14)$$

11. **Se construye la *CCSR***

Con los valores de los desplazamientos de fluencia (S_{dy}), objetivo (S_{do}), las resistencias de fluencia (R_y/m) y última (R_u/m), se traza la *CCSR*.

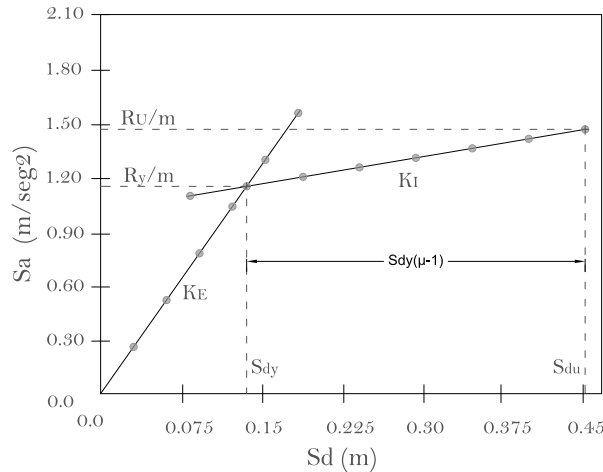


Figura 4.9: Curva de comportamiento de un sistema de referencia, *CCSR*

12. Obtención del coeficiente de amortiguamiento para el diseño de los disipadores

Con base en el amortiguamiento ξ_{total} de la *CCSR*, se determina el amortiguamiento de los disipadores a partir de la diferencia entre el amortiguamiento ξ_o y ξ_{total} , como se indica en la ec (4.15).

$$\xi_d = \xi_{total} - \xi_o \quad (4.15)$$

Enseguida con la ec (3.6), presentada en el subcapítulo (3.4.1), se coloca la frecuencia modal ω_k en términos del periodo T y despejando el coeficiente de amortiguamiento C_d , se determina ec (4.16).

$$C_d = \frac{4\pi\xi_d\Sigma_i m_i \phi_i^2}{T\Sigma_j \cos^2 \theta_j \phi_{rj}^2} \quad (4.16)$$

Con la ecuación anterior se calculan dos coeficientes de amortiguamiento; el primero para el modelo elástico (C_E) y el segundo para el modelo con daño (C_I). En estas ecuaciones se sustituye la coordenada modal (ϕ_i), la coordenada modal relativa (ϕ_{rj}) y el periodo de la estructura (T), respectivamente para los modelos elástico y con daño. Las variables restantes como la masa, la cantidad del amortiguamiento y el ángulo de inclinación del disipador, se mantienen constantes. Determinados los coeficientes de amortiguamiento del modelo elástico y con daño, se suman ambos coeficientes para obtener el coeficiente de amortiguamiento de diseño $C_{diseño}$, mismo que regirá para la configuración geométrica del disipador y para todos los niveles de la estructura.

13. Obtención de las fuerzas de diseño de la estructura

Las fuerzas de diseño de los elementos estructurales se obtienen por medio de dos análisis modales espectrales. El primero análisis se realiza para el modelo elástico, en el que se incluyen las cargas gravitacionales y la demanda sísmica. Para la demanda se utiliza el espectro elástico escalado por un factor λ_1 , de acuerdo con la ec (4.17). El segundo análisis es para el modelo con daño, utilizando la demanda sísmica del espectro elástico escalado por un factor λ_2 , de acuerdo a la ec (4.18).

$$\lambda_1 = \frac{\frac{R_y}{m}}{Sa_{T_E, 5,0\%}} \quad (4.17)$$

$$\lambda_2 = \frac{\frac{R_y}{m} - \frac{R_u}{m}}{Sa_{T_I, 5,0\%}} \quad (4.18)$$

Ambas ecuaciones, (4.17) y (4.18), se definen como el cociente entre la resistencia por unidad de masa y la ordenada de pseudoaceleración del espectro elástico reducido por el amortiguamiento inherente de la estructura del 5,0%, ésta última asociada al periodo

elástico e inelástico, respectivamente. Los subíndices u e y indican las condiciones de fluencia y última.

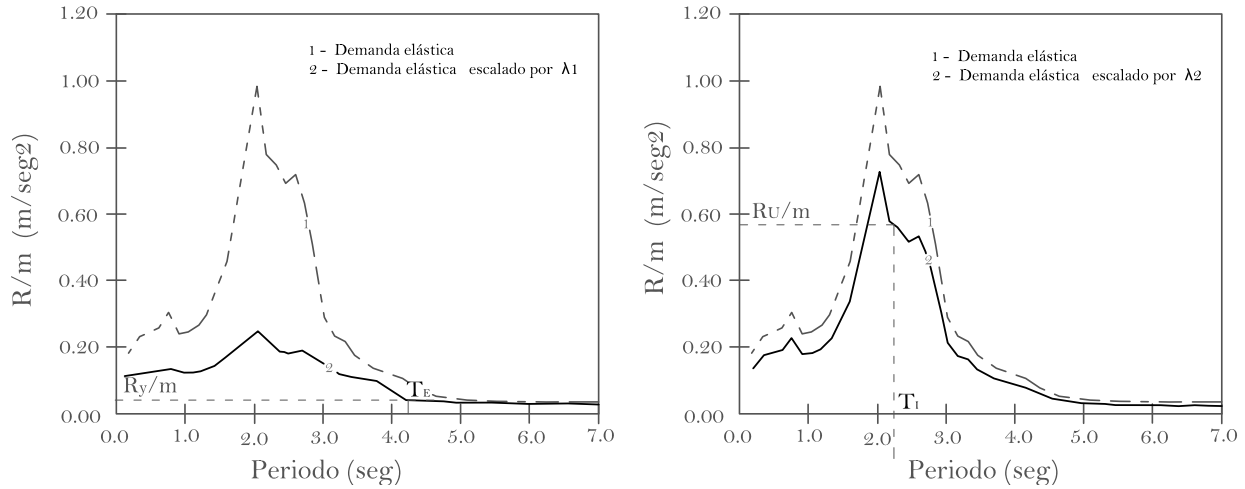


Figura 4.10: Espectros elásticos de resistencia escalados para los análisis modales espectrales

Los factores λ_1 y λ_2 se indica en la fig 4.10. De los análisis modales espectrales realizados, considerando lo antes indicado, se extraen las fuerzas de diseño de los elementos y se suman, con ésto se determinan los elementos que aceptan y que no aceptan daño.

4.4. Consideraciones para el diseño

Distribución propuesta para el daño

En zonas sísmicas los reglamentos permiten que las estructuras se diseñen para que éstas incursionen en el rango no lineal durante sismos moderados y severos, específicamente las estructuras formadas por marcos (trabes y columnas) se les diseñan para que presenten daño, siempre que éstas satisfagan los criterios de estructuración de marcos dúctiles. Dichos criterios se enfocan en la estructuración, en el armado y dimensionamiento de secciones de columnas y vigas, de tal manera que se asegure la formación del mecanismo *columna fuerte - viga débil*, es decir, la formación de articulaciones plásticas.

De acuerdo con López (2009) y Castellanos (2013) el nivel de daño propuesto en la sección 4.3, paso número 3, está en función de un nivel de desempeño, teniendo tantos niveles (o estados límites) como distribuciones de daño. Estas distribuciones se fundamentan en lo observado en campo durante los sismos y en investigaciones analíticas. Algunos trabajos de investigación respecto a las distribuciones de daño se observan en las siguientes referencias Castellanos (2013), Ayala (2001) y Sandoval (2000), de donde se extrajeron los siguientes criterios que se presentan a continuación.

- Garantizar el mecanismo de comportamiento estable, *i.e.* columna fuerte-viga débil. Para fines del estado límite de colapso solo se debe colocar daño en los extremos de las vigas y en las base de las columnas del primer nivel.
- Proponer daño en las vigas de los niveles inferiores, ya que, regularmente, en los últimos niveles la intensidad de la demanda sísmica es baja y las secciones de los elementos no alcanzan el estado límite de fluencia
- Proponer distribuciones simétricas de daño.
- Evitar distribuciones irregulares de daño.

Demandas sísmicas Actualmente para un diseño sísmico, la demanda se definen por un espectro de peligro uniforme para una tasa de excedencia de intensidad sísmica. Un espectro inelástico se desarrolla por medio de un espectro elástico reducido por factores de sobrerresistencias y ductilidad, lo cual conlleva a perder el control del desempeño, dado que se trabaja con demandas no realistas. Para ser congruentes con un diseño por desempeño, se deben considerar espectros de peligro uniforme para el tipo y sitio de la estructura, con procedimientos consistentes con la filosofía basada en desempeño, donde los niveles del diseño sísmico sean definidos por tasa de excedencia de un índice de desempeño más que por tasas de excedencia de una intensidad sísmica (Niño y Ayala, 2012). Para este trabajo no se utilizaron espectros de peligro uniforme para un índice de desempeño, a razón de que salen de los alcances de la tesis, en su lugar se utilizaron espectros elásticos, de la señal obtenida en la estación SCT, del sismo ocurrido del 19 septiembre de 1985.

Arreglo y colocación de los disipadores de energía

El procedimiento desarrollado en esta tesis se realiza considerando un arreglo regular en la colocación de los disipadores de energía, es decir colocando un disipador por nivel, y con un coeficiente de amortiguamiento constante, sin embargo, esta forma de colocación es un criterio simple en donde la fuerza del disipador no desarrolla su máxima capacidad en los niveles superiores, por que en estos niveles no existen altas velocidades relativas.

Otros autores han elaborado trabajos sobre los criterios que se pueden adoptar sobre la disposición de los disipadores de energía, entre los que se pueden mencionar los siguientes: Ashour y Hanson (1987), propone que la colocación de los disipadores se base en la forma del primer modo, para estructuras modeladas a cortante; Zhang y Soong (1992) propone optimizar del índice de desempeño, basándose en la colocación óptima de los disipadores de acuerdo con los desplazamientos y la velocidades de entrepisos; Garcia (2001) proponer reducir la distorsión de entrepiso en función de una cantidad de amortiguadores por nivel .

Capítulo 5

Ejemplo de aplicación

5.1. Generalidades

En el actual capítulo se presenta un ejemplo de aplicación del procedimiento propuesto en esta tesis, aplicado a un marco de central de un edificio de concreto reforzado, de arreglo regular. El edificio es de 21.00 m de ancho por 21.00 m de largo y 26.40 m de alto, con disipadores de energía colocados en las crujías centrales, *vid.* fig 5.1. El ejemplo de aplicación sigue los lineamientos de carga y límite de diseño de acuerdo con el Reglamento de Construcción del Distrito Federal (GDF, 2004). Los resultados del procedimiento simplificado se verifican con un análisis no lineal paso a paso con el software OpenSees (Mazzoni *et al.*, 2013).

5.2. Descripción del edificio

El marco a diseñar cuenta con un arreglo interior de 3 crujías espaciadas a 7.00 m y 8 niveles con una altura de entrepiso de 3.30 m, *vid.* fig 5.1. Para el análisis del modelo del marco se ha conceptualizado que el sistema de piso es un diafragma rígido, es decir la losa y las trabes trabajan en conjunto, y los apoyos se han idealizado como empotrados. Las cargas actuantes y las propiedades de los materiales utilizados se indican en las tablas 5.1 a 5.3.

Para la demanda sísmica, se utilizaron espectros de respuesta de la componente E-W, obtenida de la señal sísmica registrada en la estación SCT durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, ocurrido en Michoacán, México.

Los disipadores de energía no están considerados explícitamente en la obtención de ingevalores y ingevectores, pues se busca realizar un análisis convencional de valores característicos. La contribución de los disipadores es por medio de la fracción de amortiguamiento crítico incluido dentro de los espectros elásticos.

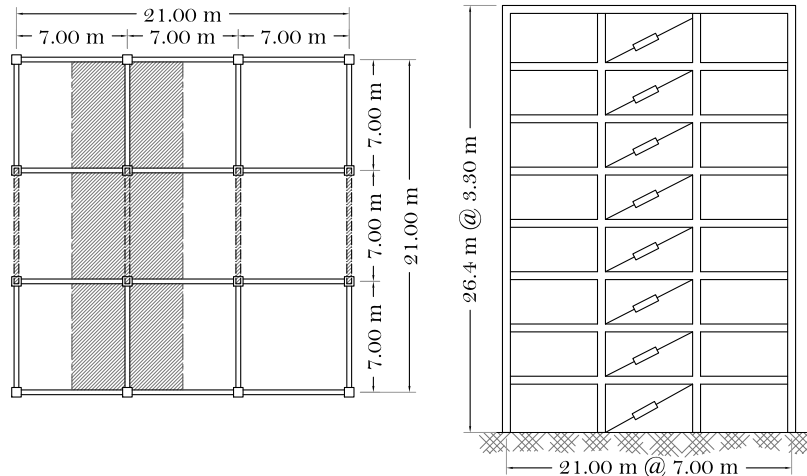


Figura 5.1: Planta y elevación del edificio

Descripción	Carga muerta	
	Entrepiso (kg/m ²)	Azotea (kg/m ²)
Losa de concreto de 12.0 cm	290	290
Acabados de piso	100	60
Muros divisorios	160	-
Carga por reglamento	-	120
Enladrillado e impermeabilizado	-	120
Equipo e instalaciones	-	80
Total	590	590

Tabla 5.1: Cargas muertas

Descripción	Carga viva	
	Entrepiso (kg/m ²)	Azotea (kg/m ²)
Gravitacional	250	180
Sismo	100	70

Tabla 5.2: Cargas vivas

Propiedades de los materiales			
Concreto		Acero	
Resistencia a la compresión (f'_c)	250 kg/cm ²	Esfuerzo de fluencia (f_y)	4200 kg/cm ²
Módulo de elasticidad (E_c)	$14000\sqrt{f'_c}$	Módulo de elasticidad (E_a)	2039000 kg/cm ²
Peso volumétrico (P_{vol})	2400 kg/m ³	Esfuerzo último a tensión (f_u)	6300 kg/cm ²

Tabla 5.3: Propiedades del concreto y el acero de refuerzo

Elemento	Dimensiones	
	Nivel	Sección transversal
Columnas	1-8	60 x 60
Vigas	1-8	60 x 30

Tabla 5.4: Secciones transversales de columnas y vigas (preliminares)

La distorsión objetivo se extrajo de la tabla A.1, del apéndice A de las NTC-Sismo (GDF, 2004), denominada distorsión permisible de entrepiso, de acuerdo con estado límite de colapso con un valor de 0.03.

Como herramientas de ayuda para el diseño se utilizaron los programas ETABS Versión 9.7.4. (CSI, 2005) para el análisis modal y la obtención de desplazamientos y fuerzas, el programa DEGTRA Versión V 9.1.0. (Ordaz y Montoya, 2012) para la obtención de los espectros de diseño, así como múltiples hojas de cálculo en Mathcad version 15.0 (PTC, 2010), para procesar la información de los programas.

5.3. Aplicación del método de diseño

A partir de las características y propiedades de la estructura, se realiza el diseño preliminar del marco mediante análisis modal espectral con el programa ETABS, sin considerar los amortiguadores. Determinado el modelo elástico se obtiene sus propiedades dinámicas [el periodo (T), las coordenadas modales o forma modal (Φ) y el factor de participación (FP)]. Posteriormente, del modelo elástico, se propone otro modelo con una distribución de daño congruente con la filosofía de *columna fuerte viga débil*, El daño es modelado por medio de articulaciones en los extremos de las vigas para las zonas de mayores demandas, fig 5.2 de acuerdo con el análisis modal espectral. De igual manera, al modelo con daño se le determinan sus propiedades dinámicas.

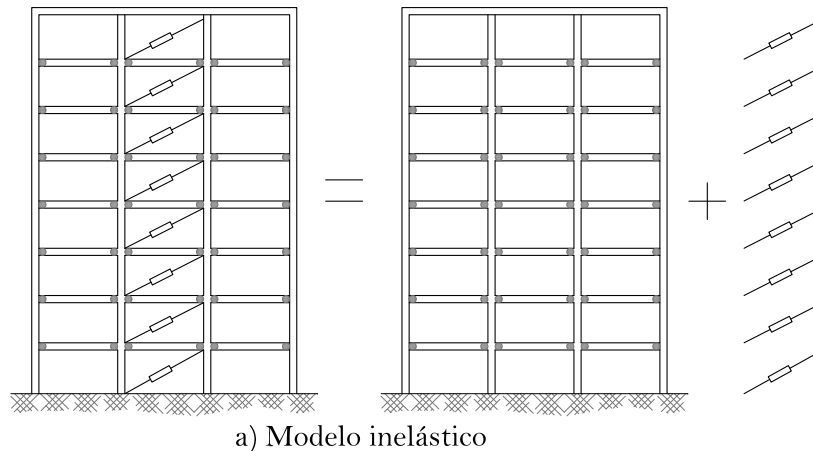


Figura 5.2: Propuesta de modelo con daño, con articulación en extremos de vigas.

Las propiedades del modelo elástico y con daño se presentan en tabla 5.5.

Tipo	T (s)	FP	Φ
Modelo elástico	2.24	293.045	0.00444
Modelo con daño	6.93	280.62	0.00475

Tabla 5.5: Propiedades dinámicas

Posteriormente se calcula el desplazamiento de fluencia con las ecs 4.7 y 4.8; dicho desplazamiento se observa en la tabla 5.6.

$\Delta_y(m)$	$Sd_y(m)$
0.163	0.125

Tabla 5.6: Valores de desplazamiento de fluencia

Enseguida, se determina el desplazamiento objetivo con las ecs 4.9 y 4.10, considerando para tal fin una distorsión de entrepiso de 0.03 (3.0 %); en la tabla 5.7 se indican el valor de dicho desplazamiento.

$\Delta_o(m)$	$Sd_o(m)$
0.553	0.4149

Tabla 5.7: Valores de desplazamiento último

Con los valores de los desplazamientos de fluencia y objetivo, los periodos (T) de los modelos elásticos y con daño, se determina la relación de rigidez de posfluencia a elástica y la ductilidad global, utilizado para tal fin las ecs 4.11 y 4.12, los resultados obtenidos se observan en la tabla 5.8.

α	μ
10.4	3.31

Tabla 5.8: Valores de rigidez de posfluencia y ductilidad

A partir de los datos de desplazamiento de fluencia, desplazamiento último, la ductilidad, los factores de participación y de formas modales de los modelos elásticos y con daño, se determina el perfil de desplazamientos y de distorsiones del modelo del marco, como se observa en la fig 5.3.

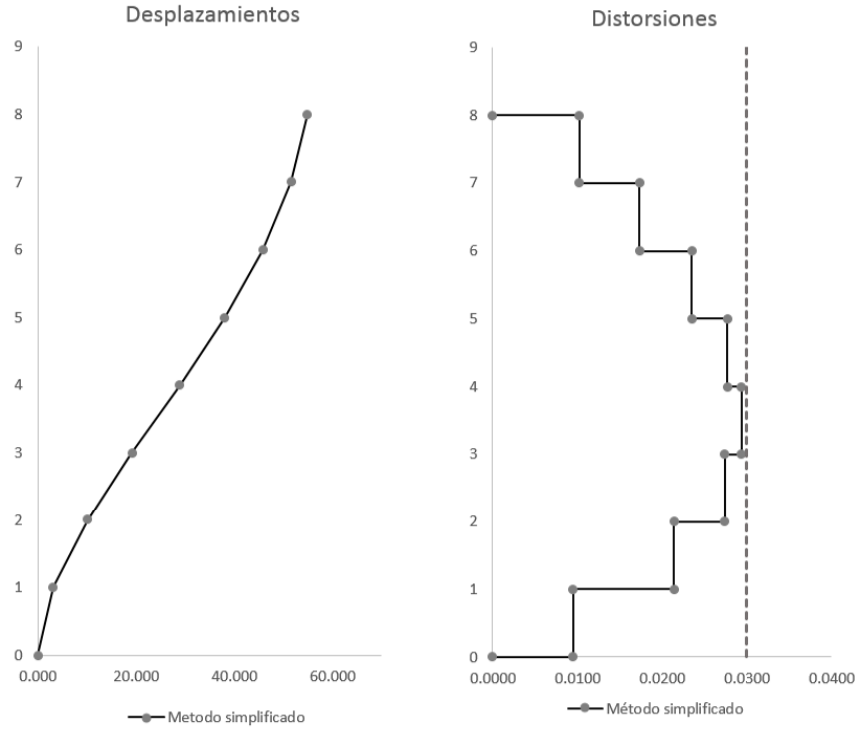


Figura 5.3: Perfil de desplazamientos y distorsiones

Se proponen una serie de valores de fracción de amortiguamiento crítico de acuerdo con la ec 4.13, considerando 5.0 % del amortiguamiento inherente (ξ_o) y del 5.0 % hasta el 15.0 % para los disipadores de energía (ξ_d). Debiendo ser el amortiguamiento total (ξ_{total}) menor o igual al 20.0 % de la fracción del amortiguamiento crítico, lo anterior se observa en la tabla 5.9.

ξ_o (%)	ξ_d (%)	ξ_{total} (%)
	5.0	10.0
5.0	10.0	15.0
	15.0	20.0

Tabla 5.9: Valores de amortiguamiento

Se construye un espectro de inelástico de desplazamiento, con el programa DEGTRA (Ordaz y Montoya, 2012), asociado a los valores de α , μ y ξ_{total} . En el espectro se busca el punto de la curva donde el $Sd_{ESPECTRAL}$ se aproxime al Sd_o , lo anterior se muestra en la fig 5.4.

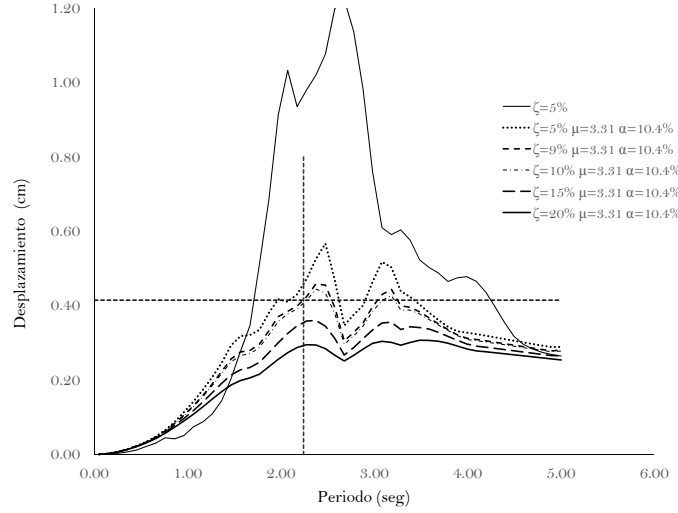


Figura 5.4: Desplazamiento del espectro inelástico correspondiente a TE

Posteriormente, se construye un espectro inelástico de resistencia, con el programa DEGTRA (Ordaz y Montoya, 2012), utilizando los valores de α , μ y ξ_{total} . De dicho espectro se obtiene el valor de la resistencia de fluencia (R_y/m), asociado a T_E , como se observa en la fig 5.5

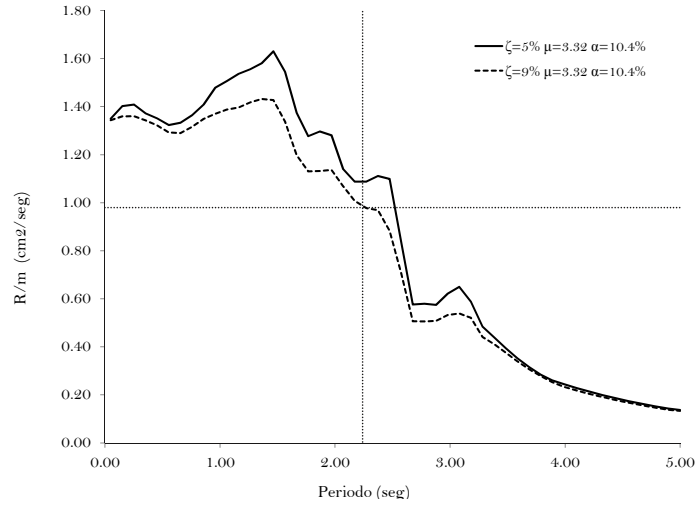


Figura 5.5: Obtención de la resistencia de fluencia R_y/m

Con la ec 4.14 se determina la resistencia última (R_u/m), obteniendo el valor indicado en la tabla 5.10.

$R_y/m(m/s^2)$	$R_u/m(m/s^2)$
0.98	1.217

Tabla 5.10: Valores de resistencia por unidad de masa

Enseguida, se determina el coeficiente de amortiguamiento de diseño requerido para los amortiguadores (disipadores de energía), de acuerdo con las ecs (4.15) y ec (4.16). En las tablas 5.11, 5.12 y 5.13 se observan los valores utilizado y los resultados obtenidos, obsérvese que el coeficiente de amortiguamiento de diseño es la suma de los coeficientes de amortiguamiento calculados de los modelos elástico y con daño.

Modelo elástico								
Nivel	Masa (kg)	Φ_i	Φ_{rj}^2	$\text{Cos}\theta$	$T_E(s)$	$\xi_d(\%)$	C1 (kg- s/m)	(kg-
8	10674.00	1.000	0.0027					
7	12322.32	0.948	0.0066					
6	12322.32	0.867	0.0137					
5	12322.32	0.750	0.0213	$\text{Cos}(25.24)$	2.24	4.00	88550.00	
4	12322.32	0.604	0.0213					
3	12322.32	0.432	0.0324					
2	12322.32	0.252	0.0269					
1	12322.32	0.088	0.0077					

Tabla 5.11: Obtención del coeficiente de amortiguamiento del modelo elástico

Modelo con daño								
Nivel	Masa (kg)	Φ_i	Φ_{rj}^2	$\text{Cos}\theta$	$T_I(s)$	$\xi_d(\%)$	C2 (s/m)	(kg-
8	10674.00	1.000	0.0042					
7	12322.32	0.935	0.0130					
6	12322.32	0.821	0.0231					
5	12322.32	0.669	0.0303	Cos(25.24)	6.93	4.00	24759.00	
4	12322.32	0.495	0.0320					
3	12322.32	0.316	0.0250					
2	12322.32	0.158	0.0130					
1	12322.32	0.044	0.0019					

Tabla 5.12: Obtención del coeficiente de amortiguamiento del modelo con daño

C1	C2	$C_{diseño}$
88550.00	24759.00	113310.00

Tabla 5.13: Coeficientes de amortiguamiento y de diseño

Enseguida se determina la curva $CCSR$ de acuerdo con los puntos característicos Sd_y , Sd_o , R_y/m , y R_u/m , lo anterior se observa en la fig 5.6. De dicha curva, los puntos característicos definen los niveles de fuerza para los elementos que tendrá un comportamiento elástico e inelástico. Los niveles de fuerza se determinan con los espectros escalados, de acuerdo con las ecs (4.17) y (4.18), mismo que se observan en la fig 5.7.

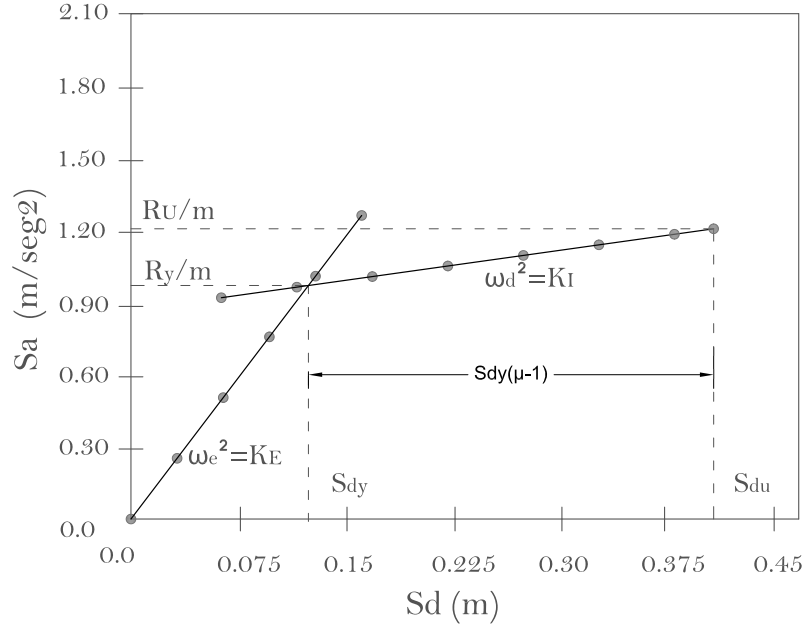


Figura 5.6: Curva de comportamiento del sistema referencia

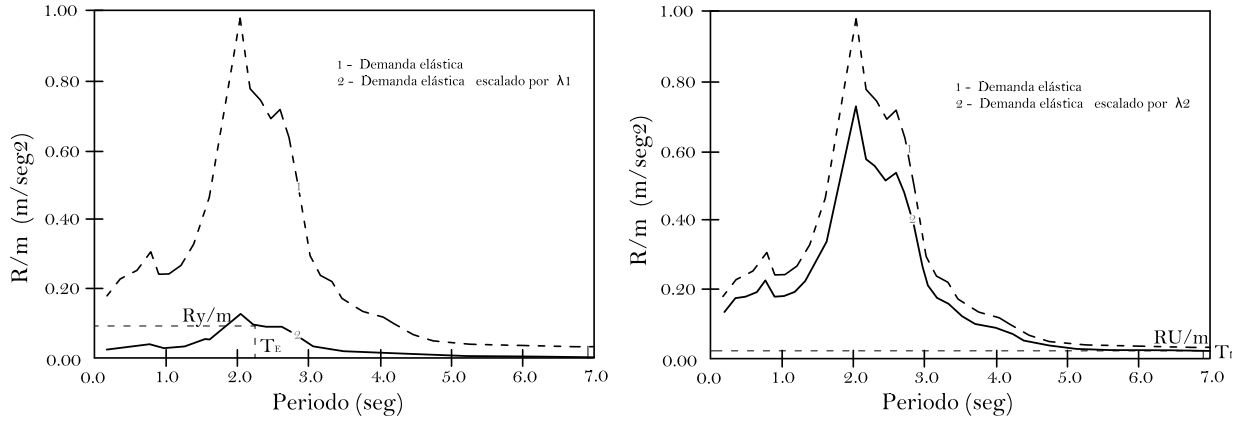


Figura 5.7: Espectros elásticos escalados

5.4. Resultados obtenidos y validación

5.4.1. Análisis dinámico no lineal paso a paso

Para validar los resultados obtenidos con el procedimiento simplificado propuesto, se realizó un análisis dinámico no lineal con el software OpenSees Versión 2.4.3 (Mazzoni *et al.*, 2013). Aplicándose las siguientes consideraciones para el modelo realizado en dicho software.

- Se utilizó un modelo histerético bilineal, sin degradación de resistencia, para vigas y columnas
- No se consideraron efectos P- Δ
- Se consideró un amortiguamiento inherente del 5.0 %, con una matriz proporcional a la masa y a la rigidez inicial (amortiguamiento de Rayleigh)
- Se utilizaron amortiguadores viscosos en la crujía central y en todos los niveles, utilizando el coeficiente de amortiguamiento de diseño obtenido del procedimiento simplificado y de exponente lineal
- Las resistencias de los elementos para el análisis no lineal corresponden a las resistencias nominales obtenidas con el método simplificado, no se consideran criterios de estandarización.
- Se incluyó un modelo de plasticidad concentrada para vigas y columnas mediante elementos longitud cero.
- En congruencia con las demandas del método simplificado, se utilizó el registro de aceleración sísmica en su componente E-W, registrada en la estación SCT durante el sismo del 19 septiembre de 1985.

El modelo utilizado en OpenSees (Mazzoni *et al.*, 2013) se presenta en la fig 5.8, en donde se identifican de nodos para control del análisis y lectura de resultados.

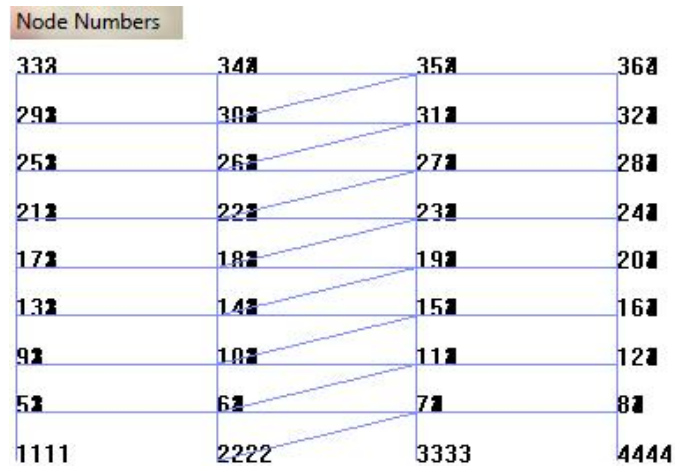


Figura 5.8: Modelo de análisis utilizado en OpenSees (Mazzoni *et al.*, 2013)

5.4.2. Comparación de resultados

Del análisis realizado con OpenSees se determinaron los perfiles de desplazamientos, *vid* fig 5.9, y de distorsiones, los cuales son superpuestos con los obtenidos con el método simplificado, como se observa en la fig 5.10. Del análisis no lineal, los máximos valores de desplazamiento y de distorsiones se obtuvieron en el paso 2933, siendo en dicho paso

la máxima intensidad del sismo.

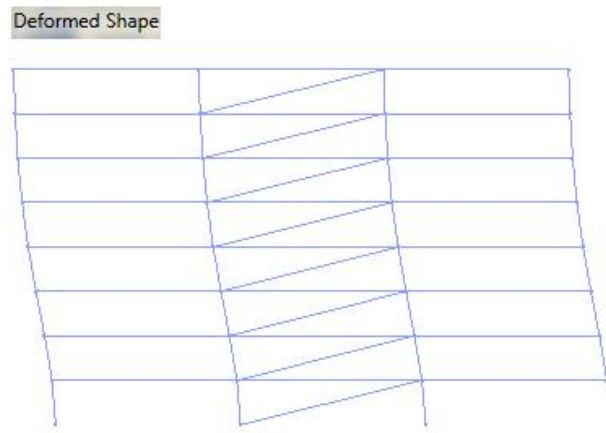


Figura 5.9: Perfil de desplazamientos, obtenido en un paso arbitrario

De acuerdo con la fig 5.10, se observa que el perfil de desplazamientos del análisis no lineal sigue una tendencia muy aproximada al obtenido con el método simplificado, teniendo una diferencia del 9.30 % en el desplazamiento de azotea. Sin embargo dicha diferencia no es significativa, pues el objetivo del procedimiento propuesto es limitar la distorsión máxima de entrepiso y no el desempeño local de cada nivel del marco.

Respecto al perfil de distorsiones se observa que, desde el cuarto hasta el último nivel, los valores de distorsión obtenidos con el análisis no lineal son menores con respecto a los obtenidos con el procedimiento propuesto; caso contrario ocurre del primer hasta el tercer nivel de dicho perfil. Lo anterior se justifica debido al valor constante del coeficiente de amortiguamiento de diseño, habiendo colocado los disipadores de energía en la misma proporción para todos los niveles, pero véase que la distorsión de diseño se satisface.

La máxima distorsión de entrepiso obtenida del análisis no lineal, ocurre en el tercer nivel, con un valor de 2,92 %, y la obtenida con el procedimiento simplificado, ocurre en el cuarto nivel, con un valor del 3,0 %. Lo anterior representa una diferencia del 2,66 %, respecto al distorsión de diseño.

En términos generales los valores presentados en los perfiles de desplazamientos y de distorsiones, con el método simplificado, son satisfactorios. Cabe decir que el procedimiento de diseño propuesto puede refinarse, si el valor del coeficiente de amortiguamiento de diseño, de cada amortiguado y de cada nivel, se asigna conforme a criterios de distorsión y/o velocidad relativa de entrepisos, es decir los coeficientes de amortiguamiento de cada nivel no se colocarían de forma.

En lo que respecta a las distribuciones de articulaciones plásticas propuestas en el

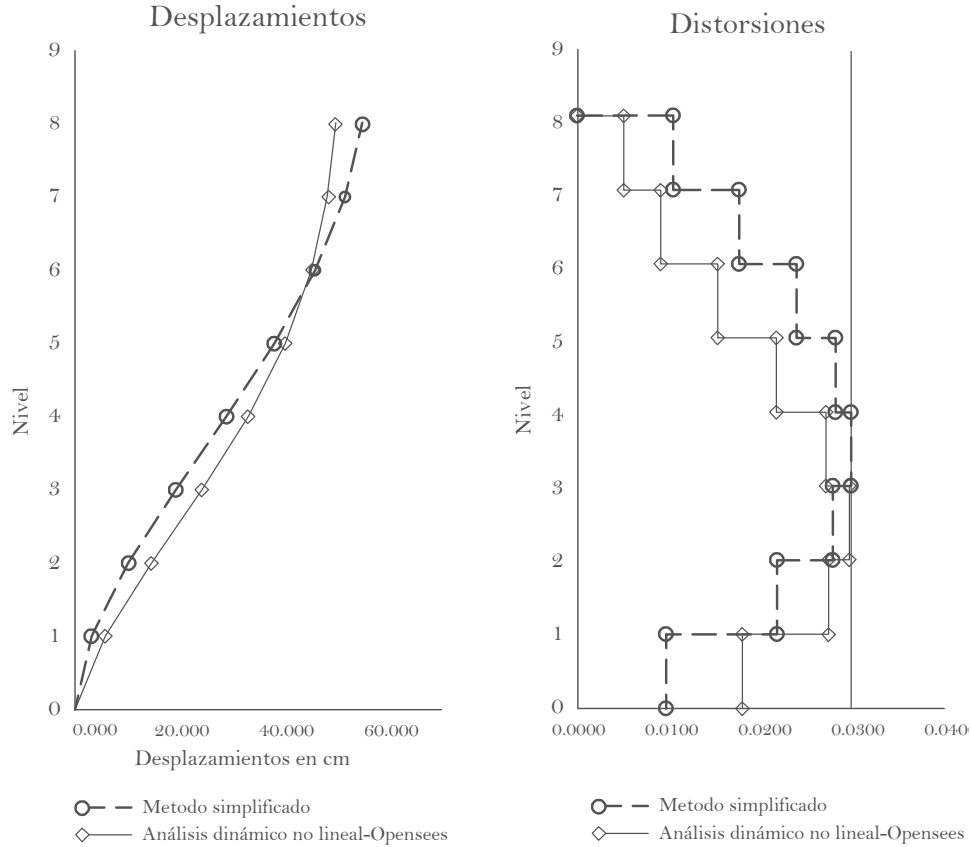


Figura 5.10: Comparación de respuestas entre el método simplificado y análisis no lineal

modelo con daño, *vid* fig 5.11a, éstas se compararon las obtenidas del análisis no lineal. Procediendo, primeramente, a determinar el paso donde ocurre la mayor distorsión de entrepiso (paso 2933) y, consecuentemente, a extraer la distribución de articulaciones plásticas formadas en dicho paso, *vid* fig 5.11b.

En la fig 5.11, se observan las distribuciones de articulaciones plásticas obtenidas con el procedimiento propuesto y con el análisis no lineal. Obsérvese que las distribuciones de daño en las vigas son semejantes y en las columnas, del primer nivel, son distintas. Dichas diferencias en las columnas ocurre por que las cargas actuantes superan las resistencias nominales de diseño, en una proporción de 6.23 % en el paso 2931. Es de esperarse ciertas variaciones en el procedimiento propuesto con respecto a un análisis no lineal, dado que se trabajo con un procedimiento simplificado, sin embargo dichas diferencias, antes señaladas, está dentro de los límites aceptables para el procedimiento.

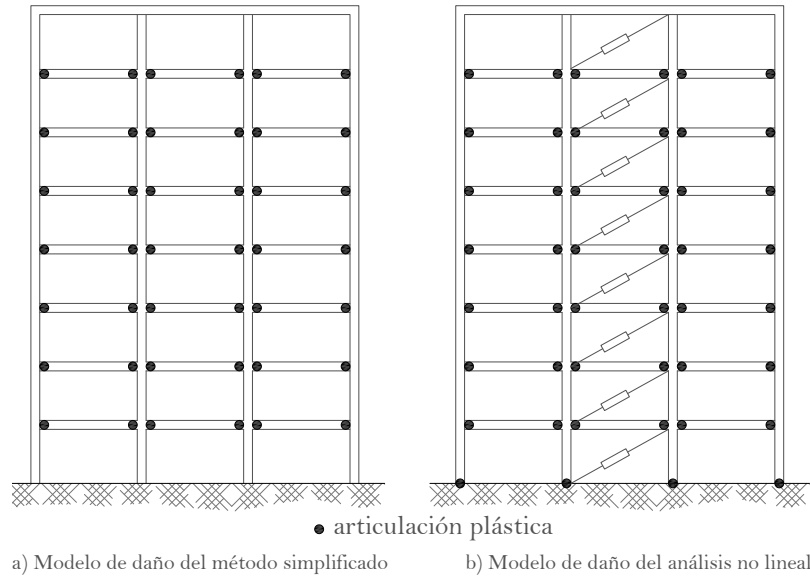


Figura 5.11: Comparación de distribuciones de daño

Para determinar la variación, en vigas y columnas, de las resistencias obtenidas con el procedimiento simplificado y el análisis no lineal, se calculo el cociente de éstas, obteniéndose los valores indicados en la fig 5.12b. En dicha figura, se observa que en el caso de vigas, la máxima diferencia obtenida entre los valores de resistencia es de 5.8 %, en el elemento 41, y la mínima es de 2.9 %, en el elemento 53. Así también en el caso de las columnas, presentando una diferencia máxima de 3.0 %, en las columnas centrales, y de 2.5 %, en las columnas de extremas.

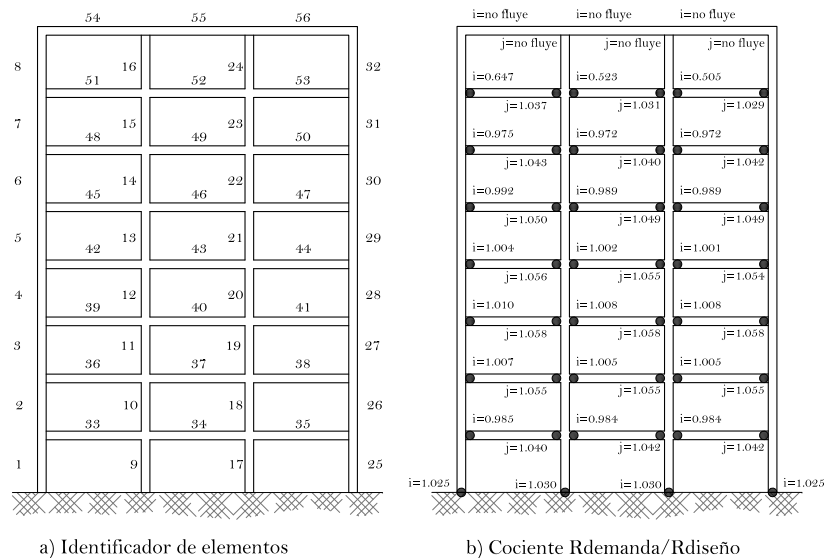


Figura 5.12: Cocientes de momentos resistente de demanda y diseño

En términos generales, el procedimiento simplificado proporciona buenos resultados para determinar las resistencias necesarias en vigas y en columnas, así como en la obtención de los coeficientes de amortiguamiento de diseño, requeridos para los disipadores de energía. El control de daño se satisface, al presentarse articulaciones plásticas en los elementos que se diseñaron precisamente para tal fin, como se comprobó en el análisis no lineal.

Además, se observa que con el amortiguamiento proporcionado por los disipadores y el daño propuesto en la estructura, se logra satisfacer las distorsiones permisibles de diseño.

Conclusiones

La actual tesis presenta una propuesta de un procedimiento simplificado para el diseño sísmico basado en desplazamientos con control de daño y disipación pasiva de energía con amortiguadores viscosos. Dicho procedimiento toma de base el método desarrollado por López y Ayala (2013) y lo adapta a un procedimiento en donde se incluyen la fracción de amortiguamiento crítico de la estructura y de los disipadores de energía.

Los resultados obtenidos con el procedimiento propuesto son comparados y validados con un análisis no lineal. De la comparación de resultados entre el procedimiento de diseño propuesto y del análisis no lineal, se obtuvieron resultados satisfactorios en la definición de las resistencia de diseño, de vigas y columnas, y en la obtención del coeficiente de amortiguamiento de diseño, requerido para los amortiguadores viscosos (disipadores pasivos de energía) lineales. Puntualizando en dichos resultados, se observó lo siguiente:

- La utilización de modelos lineales, como sistemas de referencia con amortiguamiento, aproximan de manera adecuada los valores de desplazamiento, distorsión y resistencia, con respecto a los obtenidos con un análisis no lineal. Por ejemplo, se observaron diferencias del orden 9.30 % en el desplazamiento de azotea, de 2.66 % en la distorsión máxima de entrepiso y de 5.80 % y 3.00 % en la resistencia máxima de diseño de vigas y columnas, respectivamente.
- Durante el desarrollo del procedimiento, en la determinación del desplazamiento objetivo, se observó que para una estructura con amortiguamiento y con características que la ubican dentro del espectro en la zona sensible a la aceleración, los desplazamientos no presenta diferencias significativas con respecto a otras curva con amortiguamiento, haciendo evidente lo poco aprovechable el uso de disipadores. Así mismo, si al diseño de una estructura la ubica en la zona sensible a la velocidad, con una alta ductilidad, el impacto del amortiguamiento es prácticamente nulo, pues el desplazamiento objetivo puede satisfacerse únicamente con el daño en la estructura.
- En lo que respecta al daño presentado, se observó que existe una buena correspondencia entre el modelo de daño predefinido y el obtenido con el análisis no lineal, con la diferencia que existen articulaciones en la base de las columnas, sin

embargo sigue representado, de manera aproximada, el comportamiento esperado.

Las ecuaciones definidas para el procedimiento propuesto utiliza ecuaciones prácticas y comunes de la dinámica estructural, mismas que presentan suficiente aproximación hasta valores del 20,00 % de la fracción del amortiguamiento crítico.

El procedimiento propuesto, en esta tesis, está basado en un método simplificado que utiliza modelos y diseños elásticos que aproximan la respuesta no lineal máxima del sistema, siendo natural que existan diferencias entre un método simplificado con respecto a un análisis no lineal, en donde la solución de éste último se basa en resolver directamente la ecuación de equilibrio dinámico, tomando directamente el comportamiento de los elementos y de los disipadores.

5.5. Recomendaciones

La actual tesis es una pequeña contribución al diseño sísmico con disipadores de energía, existiendo aún mucho trabajo de investigación que permita definir, con mayor detalle, el comportamiento de la estructura con disipadores, así como los efectos de éstos y del amortiguamiento en el diseño. Algunos de dichos trabajos se indican en la siguiente lista

- Estudiar la forma de optimizar el diseño de una estructura con disipadores de fluidos viscosos, basado en el número de disipadores por piso y en un arreglo regular.
- Estudiar otras formas de posicionar el disipador de fluidos viscosos dentro de la crujía del marco, de tal manera que para distintos análisis se determine cual es la posición más eficiente y sus implicaciones de diseño.
- Incluir los modos superiores en el diseño, para determinar el el impacto que tienen el incremento de las frecuencias en el valor del coeficiente de amortiguamiento.
- Asociar las distribuciones daño de la estructura con disipadores de energía a otros estado límite de diseño.
- Complementar el procedimiento con un diseño sísmico multinivel.
- Implementar en el diseño efectos de segundo orden.
- Complementar el diseño con interacción suelo-estructura.
- Complementar el procedimiento con disipadores viscosos no lineales.
- Implementar el diseño con estructuras metálicas.
- Explorar otras alternativas de diseño con disipadores histeréticos.

Referencias

- Ashour, S. A. y Hanson, R. D. (1987). Elastic seismic response of buildings with supplemental damping. Reporte Técnico UMCE 87-01, Universidad de Michigan, Ann Arbor, MI.
- Ayala, A. G. (2001). Evaluación del desempeño sísmico de estructuras-un nuevo enfoque. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 17(3):285–303.
- Castellanos, H. (2013). *Desarrollo y validación de un método de evaluación y diseño sísmico basado en desplazamientos para edificios de concreto reforzado*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico.
- CEN EC8, E. . (2004). *Design provisions for earthquake resistant structures*. Bruselas, Bélgica.
- CFE (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo*. México. pp 272.
- Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S. T., y Lai, M. L. (1991). Seismic response of a 2/5 scale steel structure with added viscoelastic dampers. Reporte Técnico NCEER-91-0012, National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), Buffalo, NY.
- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Constantinou, M. C., Ramirez, O. M., Kircher, C. A., Whittaker, A. S., Johnson, M. W., Gomez, J. D., y Chrysostomou, C. Z. (2000). Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems. Reporte Técnico MCEER 00-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), Buffalo, NY.
- Constantinou, M. C., Soong, T. T., y Dargush, G. F. (1998). Passive energy dissipation systems for structure design and retrofit. Reporte Técnico 1, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), Buffalo, NY.
- Constantinou, M. C. y Symans, M. D. (1993). Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. Reporte Técnico Vol. 2, No. 2, Structural design of tall buildings. pp 93-132.

- CSI (2005). *ETABS Integrated Building Design Software*. Berkeley, CA.
- FEMA-273 (1997). *FEMA, NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA-274 (1997). *FEMA, NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA-356 (2009). *FEMA NEHRP Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA-450-1 (2003). *FEMA, NEHRP Recommended provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA-P750 (2009). *FEMA, NEHRP Recommended seismic provisions*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Fib, T. G. . (2003). *Displacement based seismic design of reinforced concrete buildings*. Estado del arte, boletín No 25, Fédération internationale du béton, Lausana, Suiza.
- Freeman, S. A. (1978). *Prediction of response of concrete buildings to severe earthquake motions*. Publicación especial SP-55, 589-606.
- Garcia, D. L. (2001). *A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures*. Proc. of EERI Annual Meeting, Monterrey, C.A.
- GDF (2004). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus normas técnicas complementarias*. Distrito Federal, México.
- Grant, D. N., Blandon, C. A., y Priestley, M. J. N. (2005). Modeling inelastic response in direct displacement-based design. Reporte Técnico No ROSE-2005-03, ROSE School, Pavia, Italy.
- Hanson, R. D. y Soong, T. (2001). Seismic design with supplemental energy dissipation devices. Reporte Técnico 1, Earthquake Engineering Research (EERI), Oakland, CA.
- Kim, J. y Choi, H. (2006). Displacement based design of supplemental dampers for seismic retrofit of a framed structure. *Journal of Structural Engineering*, 132(6).
- Kowalsky, M. J. y Priestley, M. J. N. (1994). Displacement-based design, a methodology for seismic design applied to single degree of freedom reinforced concrete structures. Reporte técnico, Structural Systems Research, University of California, San Diego, CA.
- Liang, Z., Lee, G. C., Dargush, G. F., y Song, J. (2012). *Structural damping, applications in seismic response modification*. CRC Press, Taylor Francis Group, Boca Raton, FL.

- Lin, Y., Tsai, M., Hwang, J., y Chang, K. (2003). Direct displacement based design for building with passive energy dissipation systems. *Engineering Structures*, 25:25–37.
- López, S. E. (2009). Diseño por desplazamientos de estructuras de concreto. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
- López, S. E. y Ayala, A. G. (2013). Método de diseño sísmico basado en desplazamientos para marcos de concreto reforzado. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (88):91–111.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Fenves, G. L., y et al (2013). *Open System for Earthquake Engineering Simulation Version 2.4.3*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA. <http://www.berkeley.edu/OpenSees/copyright.html>.
- Naeim, F. y Kelly, J. M. (1999). *Design seismic isolated structures from theory to practice*. John Wiley Sons, Inc, NY.
- Niño, M. P. y Ayala, A. G. (2012). Determination of uniform hazard spectra for the performance based seismic design of structures considering uncertainties in structural properties. enviado para revisión y posible publicación en la revista Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
- Ordaz, M. y Montoya, C. (2012). *DEGTRA Version 9.1.0, Programa de análisis espectral de señales*. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Park, R. y Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. NY. pp 769.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., y Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement based seismic design of structure*. Instituto Universitario de Estudios Superiores de Pavia, Italia.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., y Seible, F. (1994). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley, NY.
- Priestley, M. N. J. (2000). Performance based seismic design. *12 World Conference on Earthquake Engineering*. paper 2831, Auckland, Nueva Zelanda.
- PTC (2010). *Mathcad*. Berkeley, CA.
- Sandoval, P. (2000). Procedimiento de diseño sísmico por desempeño, basado en un método simplificado de análisis no lineal. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
- SEAOC (1995). *VISION 2000, Performance based seismic engineering of buildings*. Sacramento, CA.
- SEAOC (1999). *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*. Sacramento, CA.

- Shibata, A. y Sozen, M. (1976). Substitute structure method for seismic design in rc. Reporte Técnico 102-1, Journal of the Structural Division, ASCE. pp 1-18.
- Sullivan, T. J. y Lago, A. (2012). Towards a simplified direct dbd procedure for the seismic design of moment resisting frame with viscous dampers. *Engineering Structures*, 35:140–148.
- Taylor, D. P. y Constantinou, M. C. (2003). Fluid dampers for applications of seismic energy dissipation and seismic isolation. Reporte técnico.
- Uang, C. M. y Bertero, V. V. (1988). Use of energy as a design criterion in earthquake resistant design. Reporte Técnico UCB/EERC-88/18, University of California, Berkeley, CA.
- Zhang, R. H. y Soong, T. T. (1992). Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications. *Engineering Structures*, 118(5):1375–1392.