CAPÍTULO 5

MODELAJE MATEMÁTICO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES PROVISTOS CON DISPOSITIVOS DISIPADORES

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

5.1 Modelado para análisis elásticos

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

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

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

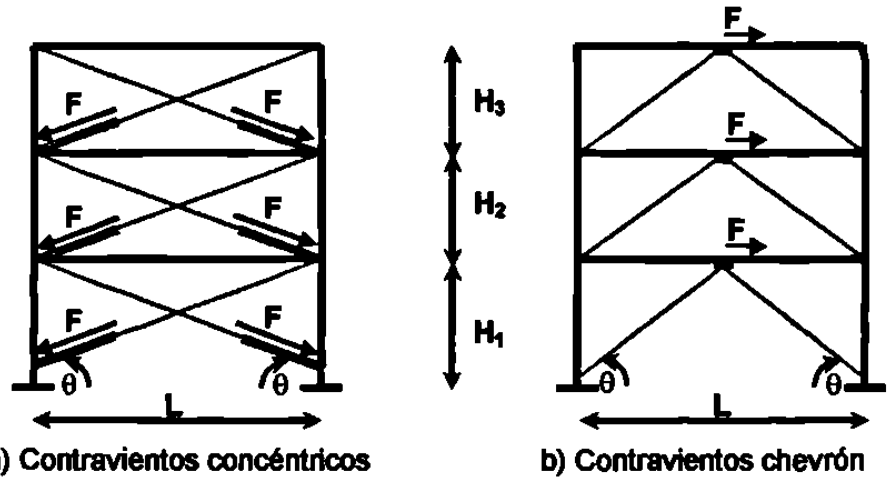


Fig. 5.1 Formas convencionales de colocar los dispositivos disipadores de energías.

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

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

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{1}{K_{dis}} \tag{5-1}$$

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

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

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{2Cos^2\theta}{K_{dis}} \tag{5-2}$$

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

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

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

5.1.1 Dispositivos solera

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

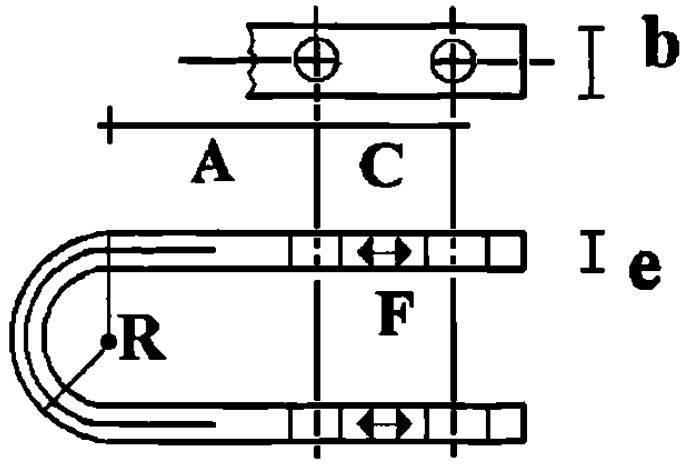


Fig. 5.2 Geometría típica de los dispositivos solera.

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

$$K_{dis} = 4.24\frac{F_u}{e} \tag{5-3}$$

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

$$F_u = F_{udis} = \frac{M_p}{R} = \frac{\sigma_u b e^2}{4R} \tag{5-5}$$

$$\Delta_y = 0.1782e \tag{5-6}$$

$$\Delta_u = 2e \tag{5-7}$$

$$F_y = 0.756F_{udis} \tag{5-8}$$

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

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

$$R = 3.57e \tag{5-9}$$

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

$$K_{dis} = n(0.297\sigma_u b) \tag{5-10}$$

$$F_u = n(0.07\sigma_u be) \tag{5-11}$$

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

5.1.2 Dispositivos ADAS

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

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

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

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

$$\Delta_y = \frac{V_{ADAS}}{K_{ADAS}} \tag{5-19}$$

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

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

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

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

5.1.3 Dispositivos TADAS

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

$$K_{dis} = K_{TADAS} = n\left[\frac{1}{6}Eb\left(\frac{t}{h}\right)^3\right] \qquad (5\text{-}20)$$

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

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

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

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

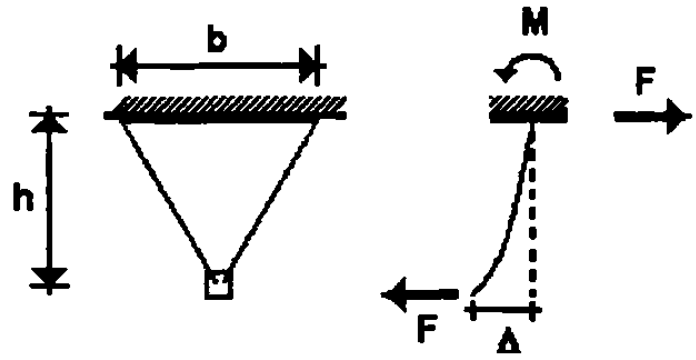


Fig. 5.4 Geometría y comportamiento los dispositivos TADAS.

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

$$\Delta_y = \frac{\sigma_y h^2}{Et} \tag{5-23}$$

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

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

5.2 Modelado para análisis no lineal

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

5.2.1 Rigidez efectiva de un disipador

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

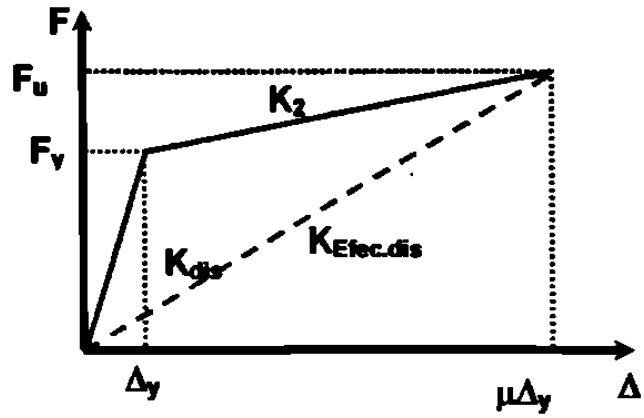


Fig. 5.5 Curva típica fuerza-deformación de un dispositivo con comportamiento bilineal.

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

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

5.2.2 Método de la diagonal equivalente

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

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

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

5.2.3 Método del elemento axial equivalente

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

5.2.4 Métodos rigurosos

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

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

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

i) El modelo de la diagonal equivalente debe utilizarse sólo en el análisis elástico y para fines de prediseño.

ii) Al hacer análisis no lineales de estructuras con disipadores de energía, conviene modelar con rigor y de forma independiente los disipadores y los contravientos para monitorear por separado el comportamiento de cada uno de los elementos del conjunto del conjunto mismo y así tener una mejor aproximación a la realidad y evaluar las incertidumbres que puedan surgir.

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

5.2.5 Modelos histeréticos

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

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

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

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

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

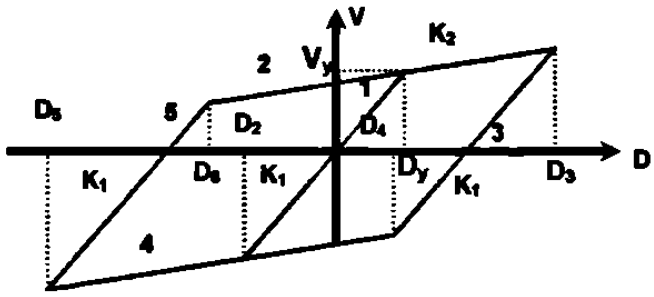


Fig. 5.6 Modelo bilineal.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Dmax = Dn + 2Dy
- Dmin = Dn

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

i) Una reducción de la rigidez a la descarga, por una cantidad que depende de la máxima rotación previa.

ii) La incorporación de una rigidez en la recarga variable, la cual es mayor que la del modelo de Takeda original y también depende de la historia de las rotaciones del extremo del elemento.

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

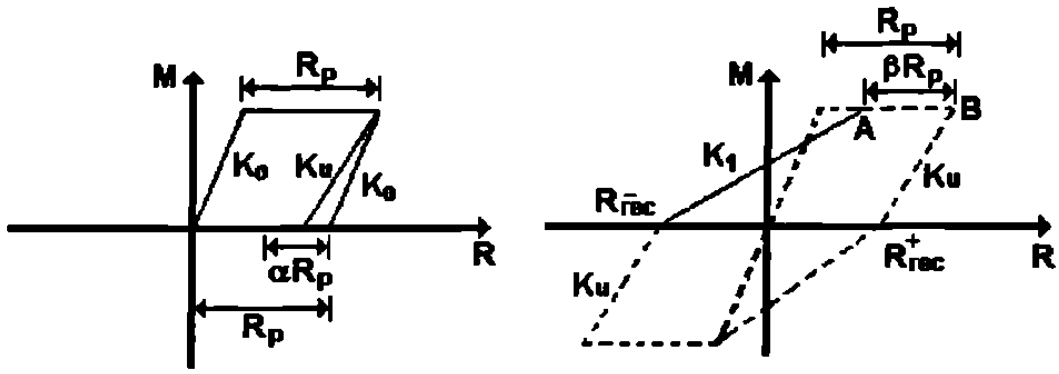


Fig. 5.7 Rigidez del modelo de Takeda.

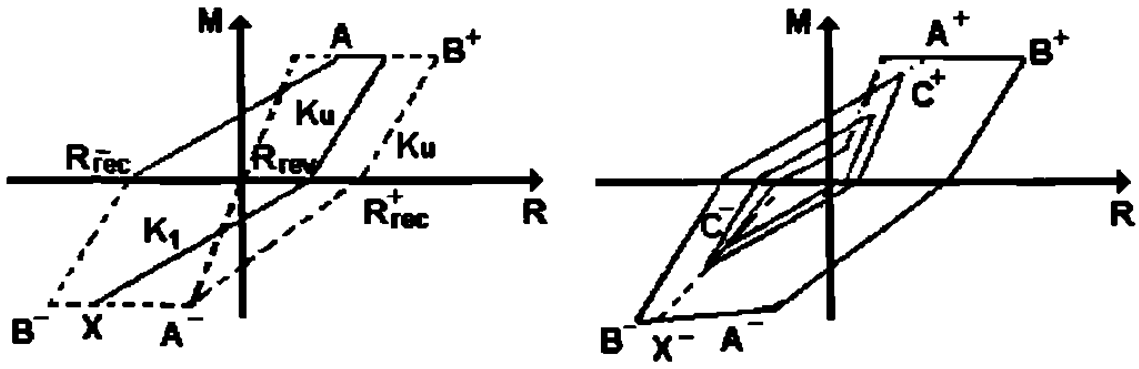
Las relaciones para las amplitudes pequeñas se suponen similares a las del modelo de Takeda, pero se formulan reglas adicionales para el cálculo de la rigidez a la recarga.

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

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

$$\frac{AX}{AB} = \left[\frac{R^+_{rec} - R_{rev}}{R^+_{rec} - R^-_{rec}}\right]^N \tag{5-25}$$

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



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

Fig. 5.8 Comportamiento en ciclos del modelo de Takeda.

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

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

El modelo de Ramberg-Osgood. Este modelo ha sido empleado sobre todo para idealizar el comportamiento no lineal de estructuras metálicas. Este modelo es atractivo matemáticamente debido a que posee muchas propiedades que simplifican la integración de las ecuaciones diferenciales de los sistemas. (González, 1995).

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

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

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

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

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

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

5.3 Modelaje de edificios

5.3.1 Generalidades del enfoque sismorresistente

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

$$E_I = E_S + E_K + E_D + E_H \qquad (5\text{-}25)$$

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

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

Dicho de otra manera, la energía que se disipa por ductilidad: E_H es, según los códigos actuales de diseño sísmico, la mayor fuente de disipación de energía de la estructura de un edificio, ya que se ha comprobado que las otras tres fuentes de disipación E_S, E_K y E_D, representan por lo general una pequeña porción de la disipación total de energía, es decir que: $E_H > E_S + E_K + E_D$.
De este enfoque reglamentario actual se derivan distintas formas de interpretar la reserva inelástica de resistencia de los sistemas estructurales y estimar su comportamiento inelástico, haciendo consideraciones tales que mediante la utilización de métodos de análisis lineales sencillos, ya sean planos o tridimensionales, se tome en cuenta de una manera global y simplista, la forma de las articulaciones plásticas del sistema estructural que definen los mecanismos de colapso y carga última de los mismo. Así, los valores de los factores **Q** de algunos reglamentos y **R** de otros, permiten reducir los espectros de diseño reglamentarios a otros, con los cuales las estructuras se comportan, supuestamente, de una manera elástico-lineal.

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

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

5.4 Tipos de análisis utilizados

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

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

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

5.5 Consideraciones de análisis

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

i) Análisis tridimensional de las estructuras. Se hace de esta manera para considerar la influencia de todos los elementos que componen el edificio, además, al hacer un análisis en tres dimensiones es posible tomar en cuenta fenómenos como el de torsión, que en algunos casos puede ser importante, sobre todo cuando la rigidez en planta no se haya distribuida de una manera más o menos simétrica.

ii) El material que constituye a los elementos que componen la estructura es homogéneo e isotrópico; es decir, que se comporta con las mismas propiedades en todas sus direcciones y que es elástico lineal.

iii) La unión entre elementos es tal, que se considera que existe una zona rígida en ese punto.

iv) Existe un diafragma rígido en cada entrepiso. Todos los puntos de un entrepiso se desplazan la misma distancia en su plano. Esta consideración es posible, gracias a que existe una losa que tiene suficiente rigidez en las direcciones ortogonales a su plano.

v) La unión entre columnas y la cimentación es infinitamente rígida, lo que permite no tomar en cuenta la interacción suelo-estructura.

vi) El sismo es linealmente independiente en dos direcciones perpendiculares en la planta del edificio. Para cada uno de los edificios se hace el análisis justamente en la dirección en que trabajan los disipadores de energía, es esa la dirección de análisis.

vii) Comportamiento bilineal de los disipadores. Para el análisis del comportamiento de los ADAS, se considera que éstos siguen las reglas de un modelo bilineal cuya pendiente post-fluencia es el cinco por ciento de la rigidez inicial.

viii) Los edificios tienen un amortiguamiento modal, cuyo valor es el tres por ciento del amortiguamiento crítico. Se considera que este valor es representativo del que tienen las estructuras, con características similares a los edificios analizados.