



01161
1
20

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

**RESPUESTA SISMICA DE MODELOS ASIMETRICOS
DE EDIFICIOS CON DISIPADORES DE ENERGIA**

ALVARO ARISTA CASTILLO

T E S I S

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO DE LA
Facultad de Ingeniería
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(E S T R U C T U R A S)**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN
CIUDAD UNIVERSITARIA**

1 9 9 4



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres:

*Florencio Arista Rosas e
Inés Castillo Molina*

*un humilde homenaje a su
consejo y apoyo de toda la vida.*

A mis hermanos:

Hugo y Dan

por su impulso y cariño.

A mis familiares y amigos.

INDICE

RESUMEN	i
1. INTRODUCCION	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. SISTEMAS REDUCTORES DE RESPUESTA SISMICA	2
1.2.1. SISTEMAS DE CONTROL PASIVO	3
1.2.2. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO	7
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2.1. OBSERVACIONES	9
2.2. ALCANCES Y OBJETIVOS	11
3. FORMULACION DEL MODELO ESTRUCTURAL	12

3.1.	GENERALIDADES	12
3.2.	MODELO ESTRUCTURAL	14
3.3.	CRITERIO DE DISEÑO	16
3.3.1.	ALTERNATIVA "A"	16
3.3.1.1.	PROPIEDADES Y PARAMETROS DEL SISTEMA	17
3.3.2.	ALTERNATIVA "B"	18
3.3.2.1.	RIGIDEZ, DEFORMACION Y CARGA DE FLUENCIA	20
4.	ANALISIS DE RESULTADOS	23
4.1.	ALTERNATIVA "A"	23
4.2.	ALTERNATIVA "B"	28
4.2.1.	ESTRUCTURAS SIMETRICAS	29
4.2.2.	ESTRUCTURAS ASIMETRICAS	38
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
5.1.	ALTERNATIVA "A"	44
5.2.	ALTERNATIVA "B"	45
	AGRADECIMIENTOS	47
	REFERENCIAS	48
	TABLAS Y FIGURAS	52

RESUMEN

Se presenta un estudio paramétrico de sistemas estructurales de un solo nivel con disipadores de energía, sometidos a excitaciones sísmicas registradas en la ciudad de México el 19 de septiembre de 1985 en las zonas de terreno blando, de transición y duro.

Se supone que asimetría es el producto de una mala instalación de los disipadores, de defectos en la construcción de los mismos o de un mal programa de mantenimiento. De esta manera se generan distribuciones asimétricas de rigidez y/o resistencia que pueden producir respuestas mayores a las esperadas en los elementos estructurales, cuando se presenta un evento sísmico.

La ductilidad máxima de los elementos de cortante se utiliza para analizar la respuesta de los modelos. Se estudian distintos periodos estructurales de los mismos y diferentes factores de comportamiento sísmico, así como distintos parámetros de los disipadores tales como: desplazamiento de fluencia, porcentajes de participación en la rigidez y resistencia de los modelos.

INTRODUCCION

1.1. ANTECEDENTES

En un diseño sísmico convencional los reglamentos permiten fuerzas de diseño menores que las obtenidas de un análisis elástico. Esto se basa en la capacidad que tienen las estructuras para disipar energía cuando un evento severo obliga a sus elementos estructurales a incursionar en el intervalo inelástico de su comportamiento. Diseñados de otra manera, por ejemplo elásticamente, los resultados serían imprácticos para estructuras comerciales típicas y con un alto impacto en los costos de construcción.

El comportamiento inelástico ocurre típicamente en regiones críticas de una estructura, usualmente en las vigas: cerca o en zonas adyacentes a las uniones viga-columna. En estas regiones, conocidas como articulaciones plásticas, se espera durante un sismo una disipación substancial de energía. Su rigidez y resistencia pueden degradarse por los ciclos de carga a que son sometidos. Consecuentemente, la respuesta puede o no incrementarse en función de las nuevas características dinámicas de la estructura. De hecho, los efectos de un sismo severo no se limitan a la situación anterior: es posible obtener daños más allá de una posible reparación de la estructura.

Recientemente, ante sismos importantes, varias estructuras se han dañado de manera considerable e incluso algunas han llegado al colapso; esto demuestra entre otras cosas, un control inadecuado de la disipación de energía a través de sus articulaciones plásticas. Al respecto, se han creado alternativas que incorporan elementos y dispositivos estructurales para reducir la respuesta sísmica, como las que se describen a continuación.

1.2. SISTEMAS REDUCTORES DE RESPUESTA SISMICA

Considere que la energía balanceada en la respuesta de una estructura ante una excitación severa pueda expresarse como

$$E_K + E_S + E_H + E_t = E_I \quad (1.1)$$

donde

E_I = energía de entrada.

E_K = energía cinética.

E_S = energía potencial o energía de deformación elástica.

E_H = energía histerética.

E_t = energía de amortiguamiento viscoso.

Si definimos la energía de vibración elástica E_E como la suma de E_K y E_S , y además que la energía disipada E_D es la suma de E_H y E_t , la ec 1.1 se puede representar como

$$E_E + E_D = E_I \quad (1.2)$$

En esta expresión visualizamos que la respuesta sísmica puede reducirse por el control de cada una de las energías que participan en ella. Para ello tradicionalmente se recurre al incremento de las secciones transversales en columnas y traveses, o a la incorporación de elementos estructurales como muros de concreto reforzado y diagonales de acero. Estas alternativas aumentan la resistencia y rigidez del marco y son benéficas para la respuesta ante sismo, si un mayor número de elementos estructurales pueden

permanecer sin daños. Esto equivale a incrementar la energía de vibración elástica y disminuir la disipada. Sin embargo, por las características del evento y del suelo en que se encuentra desplantado un edificio, estas alternativas convencionales pueden provocar que se experimenten mayores fuerzas sísmicas o incrementos significativos en las solicitaciones en la cimentación de la estructura.

Actualmente se tienen otras alternativas de implementación de dispositivos reductores que pueden ofrecer ventajas en comparación con las anteriores. Un ejemplo de éstas son los aisladores en la base de la estructura mediante los cuales la energía de entrada puede ser controlada o minimizada. Con esta alternativa el periodo fundamental de la estructura es alejado del periodo dominante del sismo. La demanda en la estructura y las aceleraciones transmitidas a los elementos no estructurales y equipos son también reducidos. Sin embargo, dadas las características del aislamiento su aplicación se ha limitado a edificios de poca altura desplantados en suelo duro o roca.

También es posible la disipación de la energía de entrada a través del uso de dispositivos disipadores de energía. Estos incrementan la energía histerética de la estructura.

Todas las alternativas con implementación de dispositivos se clasifican según su funcionamiento como de control pasivo o de control activo. En el primer tipo están incluidos aquellos con una respuesta predefinida por el diseñador ante cualquier excitación que sufra la estructura; en el segundo, los que ajustan sus características particulares de rigidez o resistencia de la estructura en cada instante de tiempo mediante mecanismos de control para cada uno de los eventos sísmicos.

En los últimos años la factibilidad de implementación de estas nuevas alternativas en edificios se incrementó como resultado de investigaciones recientes que las justifican como reductoras eficientes de la respuesta sísmica. Diversos institutos e investigadores en el mundo han propuesto un gran número de dispositivos. A continuación se presenta un panorama de los más importantes.

1.2.1. SISTEMAS DE CONTROL PASIVO

Se han desarrollado los siguientes dispositivos de control pasivo: osciladores resonantes, aisladores sísmicos y disipadores de energía.

OSCILADORES RESONANTES

Son sistemas vibratorios de una masa pequeña, cuyas características de rigidez y amortiguamiento pueden provocar una disminución de la respuesta en la estructura (ref 1). Generalmente estos dispositivos son colocados en el último nivel del edificio formando un nivel adicional (fig 1).

AISLADORES DE LA BASE

Estos dispositivos desacoplan la superestructura de su cimentación. Aunque en casos particulares, pueden encontrarse entre los dos primeros niveles.

Cuando un edificio ha sido construido sobre un sistema aislado, este deberá tener una frecuencia fundamental menor a la que tuviera con la base rígida y menor a la frecuencia dominante de la excitación. El primer modo de la estructura afecta la deformación precisamente en el sistema de aislamiento por lo que la estructura sobre el dispositivo permanece prácticamente rígida. Los modos superiores tienen poca participación. Así, cuando se presente un evento sísmico, la energía asociada a ellos no es transmitida a la estructura.

En las estructuras en las cuales han sido utilizados, el mayor beneficio obtenido ha sido en reducir los efectos de las fuerzas sísmicas en su contenido y equipo interno, más que justificar el incremento del costo de la construcción de la estructura aislada. El aislamiento resulta muy atractivo para proteger equipos muy sensibles y costosos en hospitales, plantas nucleares, centro de cómputo, centrales telefónicas, puentes, etc. Por muchos años los ingenieros estructuralistas con el objeto de amortiguar las expansiones térmicas en las losas de los puentes han usado soportes móviles para crear un aislamiento sísmico parcial (ref 2), además, de transmitir fuerzas horizontales debidas a sismo, viento y cargas de servicio.

En la actualidad se tiene numerosas estructuras que han sido construidas con este sistema a través de distintos tipos de aislamiento, los cuales podemos clasificar en: rodantes, de caucho, deslizantes y de suspensión de cables. En la fig 2 se muestran aisladores del tipo rodantes.

DISIPADORES DE ENERGIA

El objetivo de estos sistemas es disipar la energía inducida por un sismo en una estructura, y minimizar o en el caso ideal eliminar, la disipación en miembros tales como vigas, columnas o muros. Controlando la respuesta de esta manera, pueden reducirse los desplazamientos de entrepiso y la demanda de los elementos no estructurales.

De acuerdo a la forma de disipación de energía estos dispositivos pueden clasificarse en cuatro clases: de fricción, por extrusión, viscoelásticos y de deformación plástica de metales.

DISIPACION POR FRICCION

En 1982, Pall y Marsh, realizaron estudios usando dispositivos constituidos por amortiguadores de fricción y contraventeos en forma de X (fig 3). Sugieren su colocación en las crujeas centrales de un edificio de varios niveles.

La curva histerética que describen estos mecanismos resulta muy estable y de forma rectangular. Su funcionamiento óptimo para reducir la respuesta debe contemplar las propiedades de la estructura y del sismo. Se ha reportado reducción de la respuesta de marcos equipados con este tipo de disipadores (refs 3 y 4).

Pekaul y Guimond (1991) han estudiado la respuesta sísmica de estructuras asimétricas con estos dispositivos (ref 5), y su estudio revela que la máxima respuesta se reduce drásticamente comparada con la estructura excéntrica sin dispositivos, y además, aun en estructuras con excentricidades altas es posible limitar su respuesta a un nivel igual o menor que el correspondiente a la estructura simétrica no contraventeada. La introducción de estos amortiguadores eliminó el comportamiento inelástico en los marcos analizados.

DISIPACION POR EXTRUSION

Desde hace dos décadas, Robinson y Greenbank (ref 6), identificaron la disipación por extrusión como una forma efectiva de disipación de energía. Esta se basa en la utilización de un material disipador

(plomo) dentro de un tubo cuya sección transversal se reduce. Este sistema ha sido aplicado en estructuras construidas en Nueva Zelanda. Su comportamiento histerético es muy similar a la de los disipadores por fricción.

DISIPACION VISCOELASTICA

Estos dispositivos son placas de acero con materiales viscoelásticos (ver fig 4). Se colocan de manera que el cortante sísmico actúa directamente en ellos (ref 7). Los estudios han demostrado su efectividad atenuando la respuesta sísmica de estructuras. La implementación para su funcionamiento óptimo debe considerar las características de la excitación y la temperatura ambiente.

DISIPACION POR DEFORMACION PLASTICA DE METALES

Se han creado una gran variedad de este tipo de disipadores que utilizan la deformación por flexión, cortante, compresión y rolado.

Los dispositivos ADAS son elementos que utilizan la fluencia a flexión para la disipación de energía. El uso de los ADAS se ha justificado en diversas investigaciones (refs 8 y 9). Para reducir la respuesta de edificios nuevos o existentes se deben contemplar sus restricciones de implementación en altura y geometría. Usualmente se colocan como parte de los sistemas de contraventeo y por lo tanto su componente vertical puede incrementar las fuerzas axiales en las columnas.

El desplazamiento de diseño de un dispositivo ADAS puede oscilar entre 3 ó 5 veces su desplazamiento de fluencia. Sus principales características mecánicas son su rigidez elástica, resistencia y desplazamiento de fluencia. El número de ciclos de histéresis que desarrollan son función de la excitación sísmica. De pruebas experimentales les ha sido definida una curva histerética estable. De hecho, su efectividad para reducir las deformaciones puede ser aprovechada para disminuir la respuesta de estructuras construidas sobre terreno blando y duro (ref 10).

Por otra parte, en la deformación por rolado, se han desarrollado dispositivos que tienen como componentes básicos elementos hechos de solera de fierro, doblados en frío en forma de U, J u óvalo (fig 5). Su comportamiento histerético ha sido estudiado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (ref 11 y

12), mostrando ser muy estable y el número de ciclos de carga que soportan depende de la deformación a que sean sometidos. Estos dispositivos fueron en un inicio desarrollados como mecanismos de control de carga en pilotes de control. Sin embargo, como consecuencia de los sismos de septiembre de 1985 en la ciudad de México, se propuso su aplicación como disipadores de energía en la superestructura. Su implementación no se ha llevado a la práctica, sin embargo, se han concebido diversas formas de colocarlos en los edificios a semejanza de como fueron colocados en los modelos experimentales (ref 13).

1.2.2. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO

La tecnología desarrollada para el control activo constituye una innovación en los conceptos de protección estructural contra las demandas de fuerzas sísmicas. Se basa en un control o modificación de la respuesta de la estructura por medio de la acción de sistemas de control, a través de los cuales se suministra energía externa a la estructura (ref 14).

SISTEMAS DE DIAGONALES Y TENDONES ACTIVOS

Estos consisten en una serie de diagonales o tendones conectados a la estructura con las que se modifica el periodo fundamental de la estructura alejándolo del periodo dominante del sismo (ref 14). Las fuerzas de tensión en estos elementos son controladas por mecanismos (fig 6).

Para mejorar la respuesta sísmica en el caso de estructuras ya construidas, la instalación de estos mecanismos puede aprovechar miembros estructurales existentes. Como consecuencia, los costos adicionales por incorporación de este sistema son competitivos con otras alternativas de estructuración.

MASA ACTIVA

La variante pasiva de este mecanismo ha controlado la respuesta sísmica en edificios altos cuando el primer modo de vibrar es el dominante de su respuesta. Su aplicación como control activo se realiza al controlar y ajustar su movimiento en el último nivel por un algoritmo que depende de las características del sismo registradas por los sensores instalados previamente en la estructura (ref 14).

Resultados experimentales muestran una reducción de hasta un 50% en el máximo desplazamiento relativo

del último nivel de la estructura (ref 14).

SISTEMAS DE RIGIDEZ VARIABLE

El objetivo principal, es usar sistemas activos de tal manera que el periodo dominante de la estructura pueda ser alejado del periodo dominante del sismo. Hasta ahora este principio ha sido usado en prototipos a pequeña escala (ref 1). El control activo está suministrado por contravientos con depósitos cilíndricos (fig 7).

Cada unión marco-diagonal está ajustada para abrir o cerrar una válvula que modifica la rigidez estructural. Los estudios realizados hasta la fecha de este sistema muestran como atractivo su poca cantidad de energía externa requerida (ref 14).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. OBSERVACIONES

La instalación de los sistemas reductores de respuesta sísmica descritos en el capítulo anterior se ha llevado a cabo en algunas estructuras construidas recientemente. Esto ha sido motivado por los favorables resultados teóricos y experimentales.

En la literatura sobre el tema es común encontrar ideas básicas en el diseño de estructuras con dispositivos¹. Por ejemplo, algunas investigaciones sugieren que la distribución de los dispositivos con respecto a la altura de las estructuras debe ser similar a la distribución de la rigidez de entrepiso (ref 15). Esto evita el acoplamiento dinámico provocado por el amortiguamiento adicional e indirectamente se selecciona al primer periodo como el dominante de la respuesta estructural. Por otra parte, para configuraciones de disipadores en contraventeo, desde el punto de vista de respuesta estructural, se

¹ A partir de este momento haremos referencia de dispositivos entendiéndose a tales como disipadores de energía. Estos fueron los modelados en el estudio.

recomiendan aquellas que "diagonalizan" a todo el marco en su ancho y altura; y no las que cubren sólo algunas de las crujías del marco (ref 16). En algunos casos se logran incrementos en rigidez de hasta cuatro veces la de un marco sin disipadores para lograr un funcionamiento óptimo de los dispositivos (ref 17).

Aunque actualmente los Reglamentos permiten el diseño de una estructura con dispositivos, los análisis e investigaciones continúan refinando la viabilidad de su implementación. Aun existen cuestiones sobre la factibilidad de su instalación. Esto en parte obedece a que actualmente existe un gran número de ellos y no se han desarrollado las bases para la evaluación y comparación de todos los sistemas en diseños de estructuras comunes. Generalmente, cuando ciertos dispositivos se encuentran en estudio para entender su efecto en la respuesta estructural, nuevos dispositivos son desarrollados.

Por otra parte, es necesario seguir trabajando en algunas de las áreas siguientes para la consolidación de las bases de la aplicación de los sistemas disipadores de energía: 1) definición de la metodología y criterios de diseño; 2) evaluación de la seguridad a largo plazo, considerando deterioro, corrosión, etc; 3) requisitos de mantenimiento; 4) desarrollo de métodos de evaluación y comparación estandarizados para dispositivos; y 5) criterios de optimación.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) se plantearon algunos puntos de la problemática anterior y actualmente se realizan investigaciones que tienen como objetivo primordial sustentar las bases para el diseño sísmico de estructuras con dispositivos disipadores de energía. Se han hecho estudios analíticos y experimentales de elementos que disipan la energía por rolado. También han sido modelado dispositivos ADAS en estructuras. Con base en las características comunes de los disipadores se han propuesto algunos criterios de diseño.

Algunos de los resultados de las investigaciones en el IIUNAM indican que los disipadores por rolado decrecientan apreciablemente la respuesta de un prototipo sobre una mesa vibradora (ref 18), ver fig 8. En las primeras pruebas de este prototipo se detectaron durante la excitación movimientos importantes de torsión aun cuando no existió una excentricidad aparente entre el centro de masa y el centro de rigidez del sistema, consecuentemente fueron atribuidos a la construcción del modelo. Por esta respuesta asimétrica, se manifestó la posibilidad de obtener respuestas mayores a las esperadas en los elementos estructurales de edificios con disipadores. Una mala distribución de los dispositivos, así como errores en

la instalación y producción, y la falta de programas de mantenimiento de los mismos, provocará que al actuar una excitación sísmica en las estructuras, existan desplazamientos laterales y torsionales como resultado de no coincidir el centro de rigidez con el centro de masa. Por lo tanto, es necesario realizar estudios de sistemas estructurales asimétricos con disipadores de energía.

2.2. ALCANCES Y OBJETIVOS

Los objetivos principales del presente trabajo son evaluar la influencia que sobre la respuesta de elementos estructurales, provoca la implementación de los disipadores de energía y su distribución asimétrica -en planta- en rigidez y/o en resistencia.

En todos los casos estudiados en este trabajo, el principal parámetro utilizado para evaluar la respuesta es la máxima demanda de ductilidad de los elementos de cortante -como hemos idealizado a las columnas-, definida como desplazamiento último entre desplazamiento de fluencia. Este parámetro representa una medida del daño potencial (ref 19).

Hoy en día no existe un criterio de diseño en la colocación de los disipadores que produzca un funcionamiento óptimo. Por consiguiente, para realizar nuestra investigación, fueron formuladas dos alternativas de diseño de los modelos estructurales en función de la rigidez y resistencia suministrada por los dispositivos. En ellas se tratan algunos aspectos que pudieran existir en el diseño de modelos nuevos o el reforzamiento de sistemas con disipadores de energía.

El proceso de estudio consiste en crear modelos simétricos con disipadores con los dos criterios de diseño que cumplan con las disposiciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RDF87), y evaluar su respuesta ante registros sísmicos. Posteriormente, se evalúa la respuesta sísmica de modelos asimétricos creados por la alteración de las características mecánicas de alguno de sus disipadores. Finalmente, con base en el comportamiento obtenido se emiten observaciones y recomendaciones del diseño de sistemas con estos dispositivos.

FORMULACION DEL MODELO ESTRUCTURAL

3.1. GENERALIDADES

El concepto de simetría de una estructura depende de la posición de su centro de masa (CM) y del centro de rigidez (CS). Al respecto, en este estudio fueron utilizadas dos configuraciones de la estructura: simétrica y asimétrica. En la primera los dos centros coincidieron y en la segunda, sucedió el caso contrario.

Resulta evidente que cuando no coinciden el centro de masa y el centro de rigidez en la planta del edificio se producen desplazamientos laterales y torsionales ante una excitación sísmica.

El estudio de la respuesta sísmica de edificios con asimetría es relativamente reciente a pesar de ser una característica determinante en el comportamiento estructural. En los inicios del estudio de este tópico, la respuesta torsional fue evaluada exclusivamente con un comportamiento elástico de los elementos y los resultados así obtenidos sirvieron de base para expedir recomendaciones que aun hoy en día norman el diseño de estructuras en los reglamentos de construcción (ref 20).

En años recientes, con base en un mayor conocimiento del comportamiento sísmico observado en estructuras asimétricas y con mejores herramientas de cálculo, se han desarrollado investigaciones que incluyen en la respuesta el comportamiento inelástico de los elementos estructurales (refs 21 y 22). Esto obedeció a los cuestionamientos sobre la generación de respuestas sísmicas desfavorables observadas en años recientes (refs 23 y 24). Por ejemplo, al evaluar las estructuras afectadas en la ciudad de México por los eventos del 19 y 20 de septiembre de 1985, se aceptó que numerosos edificios sufrieron severos daños y colapsos debido principalmente a la presencia de asimetría en rigideces y/o en masas. Estos daños se incrementaron en forma violenta cuando los elementos ingresaron en el rango inelástico de su comportamiento.

Por otra parte, en los estudios de la respuesta inelástica de estructuras asimétricas se han usado modelos simples en los que se aíslan los parámetros más determinantes de la respuesta (refs 25 y 26). De esta forma se han evaluado cualitativamente los criterios de diseño existentes o propuestos en los reglamentos de construcción.

Con base en las formulaciones de modelos asimétricos con respuesta sísmica inelástica en investigaciones anteriores, en este trabajo se usaron modelos de estructuras sencillas de cortante, tridimensionales de un solo nivel y una cruzja. Con esto se simplificó enormemente el estudio de un gran número de estructuras con características dinámicas predefinidas de periodo fundamental, rigidez y resistencia.

Es importante la definición del criterio de diseño del modelo que contiene disipadores. En esta investigación, se plantean dos alternativas respetando las recomendaciones del RDF87 (ref 27). En la primera, la fuerza sísmica de diseño y la rigidez de la estructura permanecen constantes cuando los disipadores son implementados. Y en la segunda, la adición de dispositivos incrementa la resistencia y rigidez originales.

Para el estudio de la respuesta torsional, la asimetría en los modelos se crea al afectar la rigidez y/o la resistencia de un disipador por un factor menor a uno. Los modelos con disipadores diseñados con el primer criterio tienen en un inicio la rigidez y resistencia mínimas requeridas por el RDF87. Por lo que evidentemente, al decrementar las características originales de un disipador se obtiene una menor rigidez y resistencia del modelo que la requerida. Sin embargo, con el segundo criterio originalmente la estructura sin disipadores tiene la resistencia lateral pero no la rigidez lateral mínima. Los disipadores

son colocados para incrementar la rigidez, por lo tanto afectar las características mecánicas de uno de ellos puede únicamente disminuir la rigidez lateral mínima de todo el sistema.

3.2. MODELO ESTRUCTURAL

El modelo estructural es de un solo nivel, como se muestra en la fig 9. Los tres grados de libertad son los desplazamientos laterales u_x y u_y , a lo largo de los ejes principales X e Y, y el desplazamiento torsional u_z , alrededor del eje vertical Z. La base sobre la que se encuentra nuestro modelo es totalmente rígida.

Los elementos del modelo son: la losa, los elementos de cortante y disipadores de energía.

La losa tiene una masa traslacional m que en nuestros modelos es función del periodo fundamental $T = T_x = T_y$. Es rígida en su plano. Su relación ancho/largo es determinate en la respuesta torsional (ref 26). Sin embargo, por ser el primer trabajo sobre el tema se consideró un valor de 1.0 para dicha relación.

Los elementos de cortante son axialmente inextensibles. Su modelo de comportamiento carga-deformación fue elástico-plástico (fig-10a). La pendiente de la segunda rama de su comportamiento se definió con el 1% de la pendiente en el rango inelástico para evitar que el algoritmo del programa usado sufriera un mal condicionamiento numérico.

Por lo que respecta al disipador, en un inicio se consideró la deformación plástica por rolado y se seleccionó para su modelación dentro de las distintas alternativas propuestas para instalación (ref 13) el dispositivo en contraventeo formado por módulos (fig 8) que tiene la función precisa de disipar la energía sísmica. Entre otras razones, esta elección se justifica porque esta disposición en un prototipo construido en el IIUNAM (ref 18) atenuó efectivamente las aceleraciones de excitaciones debido al comportamiento inelástico de los disipadores.

La curva carga-deformación modelada de los disipadores fue bilineal histerética sin degradación de rigidez o resistencia (fig 10b), ya que en este mecanismo se ha observado un comportamiento histerético estable sin pérdida apreciable de rigidez y resistencia. Se consideró la deformación de fluencia de 0.3 cm del dispositivo desarrollado en el IIUNAM (refs 11, 12 y 13). La pendiente de la segunda rama de este comportamiento tuvo un valor de 5% con respecto a la primera. Por las características geométricas y

mecánicas de esta disposición los disipadores en el modelo fueron implementados como elementos armadura.

En un principio en la modelación del disipador se respetó su desplazamiento de fluencia. Sin embargo, esto provoca que el valor de su rigidez o carga de fluencia sean dependientes una de la otra, situación adversa si se desea que el modelo estructural tenga estas propiedades predefinidas independientemente para realizar un estudio paramétrico. En consecuencia se optó por ajustar su punto de fluencia en cada criterio de diseño según se explica en la sección 3.3. Entonces, rigurosamente el disipador modelado no es el mismo dispositivo por rolado aunque se mantengan algunas características originales de geometría e instalación. El disipador de esta forma se generaliza (puede representar diversos disipadores con características semejantes) y respeta el comportamiento bilineal histerético estable característico de ellos.

Se utilizaron tres registros sísmicos obtenidos en la ciudad de México el 19 de septiembre de 1985 en zona de terreno blando (SCT), de transición (VIV) y suelo duro (CU). Todos registrados en la dirección Este-Oeste. Fueron aplicados únicamente en la dirección X del modelo estructural, ver fig 9.

En el registro de terreno blando (SCT) se utilizó el concepto de Intensidad de Arias (ref 28) para el corte del tiempo de registro. Este concepto es una medida de la intensidad sísmica e indica el daño potencial como una suma de la energía disipada. Al considerarse el 90% del daño potencial, el corte en el registro originó el uso de sólo 39s contra 180s originales, lo que implicó un gran ahorro de tiempo de análisis. En los otros registros no se aplicó este concepto, porque quitar el 10% del daño potencial no producía un ahorro significativo de tiempo.

La respuesta dinámica inelástica de los sistemas estructurales fue obtenida con el programa DRAIN-TABS (ref 29), que emplea el método de cálculo de la respuesta paso a paso e idealiza a la estructura tridimensional como una serie de marcos independientes conectados por diafragmas rígidos.

El método que emplea este programa para resolver la ecuación diferencial de equilibrio dinámico es el de Newmark, en el que se elige una aceleración constante en cada instante de tiempo Δt analizado. La elección de Δt debe considerar el periodo de la estructura, la variación de la excitación, la complejidad de las funciones de amortiguamiento y rigidez, y el esfuerzo computacional. En general, se ha encontrado que el valor de este parámetro no debe ser mayor a un décimo del periodo más pequeño del sistema para

obtener una aproximación suficiente en los resultados ($\Delta t < T_n/10$). En este estudio se seleccionó el valor de 0.02 s para el intervalo de tiempo de integración porque los sistemas tuvieron periodos de 0.5 a 3.0 s , además, las excitaciones están registradas a cada 0.02 s.

3.3. CRITERIOS DE DISEÑO

3.3.1. ALTERNATIVA "A"

Considere que las propiedades totales de rigidez y resistencia lateral de una estructura están representadas por K_t y R_t . Y que éstas sean la suma de todos los valores individuales de cada uno de los elementos que contribuyen en ellas. Esto es, en el modelo, la resistencia y rigidez proporcionada por los elementos de cortante (K_c y R_c) y en su caso, por la de los disipadores (K_d y R_d).

Por lo tanto, podemos establecer que en un marco convencional²

$$K_t = K_c \quad (3.1)$$

y

$$R_t = R_c \quad (3.2)$$

En un marco con dispositivos disipadores de energía

$$K_t = K_c + K_d \quad (3.3)$$

y

$$R_t = R_c + R_d \quad (3.4)$$

² Entenderemos por marco o modelo convencional al diseñado sísmicamente según el RDF87 sin disipadores de energía.

En este criterio de diseño, la rigidez y la resistencia permanecen constantes aun cuando los dispositivos sean implementados, esto implica una reducción en los valores originales K_c y R_c . Simbólicamente este criterio se muestra en la fig 11a.

Este criterio se utilizó por dos razones principales. La primera consiste en crear modelos convencionales y modelos con dispositivos con un mismo periodo fundamental (T), para que la respuesta obtenida pudiera con ciertas limitaciones, ser comparable. La segunda razón se refiere a que la respuesta de una estructura con disipadores de energía puede ser menor a la convencional. Por lo tanto, en teoría puede ser diseñada para una menor fuerza sísmica si se desea obtener un mismo nivel de daño que en la convencional.

Desde un punto de vista general este diseño produce estructuras en las que a medida que se aumenta la participación de los disipadores se reduce la fuerza sísmica de diseño de los elementos estructurales. Como se comprobará en el siguiente capítulo, con base en la máxima demanda de ductilidad, la alternativa descrita permite encontrar un mismo nivel de daño en todos los modelos simétricos estudiados.

3.3.1.1. PROPIEDADES Y PARAMETROS DEL SISTEMA

Las estructuras simétricas sin disipadores consideradas en este estudio, ubicadas dentro de alguna de las zonas en que se divide el D.F. y con un periodo fundamental determinado, se diseñaron para la fuerza sísmica lateral obtenida de los espectros de diseño de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC, ref 27).

La reducción de las fuerzas sísmicas se hizo con valores del factor de comportamiento sísmico (Q) igual a 3 y 4, ya que representan las condiciones más desfavorables para que la estructura ingrese al intervalo inelástico de su comportamiento (ref 27).

Debido a que utilizar un solo registro sísmico puede producir efectos muy particulares en la respuesta sísmica inelástica, se utilizaron los registros obtenidos en la ciudad de México el 19 de septiembre de 1985 en terreno blando (SCT), de transición (VIV) y duro (CU).

Los periodos fundamentales de los modelos estudiados fueron $T = T_x = T_y = 0.5, 1.0$ y 1.5 s.

Cuando se incluyeron los disipadores en un modelo estructural, tanto la rigidez como la resistencia original de la estructura permanecieron constantes, y por lo tanto el periodo fundamental no se modificó.

Para visualizar la forma en que se crearon los modelos con disipadores, considere ahora que la formulación de la rigidez y la resistencia

$$K_t = K_c + K_d \quad (3.5)$$

y

$$R_t = R_c + R_d \quad (3.6)$$

esté expresada en porcentajes. K_d y R_d modificaron su participación desde un valor inicial nulo hasta un 90% en incrementos de 10%, y por lo tanto K_c y R_c se decrementaron en el mismo porcentaje. Por ejemplo, el caso en que K_d y R_d fueron iguales a cero el modelo creado corresponde al convencional (no existen disipadores); cuando K_d y R_d adquirieron un valor de un 20%, K_c y R_c participaron con un 80% del total.

Para estudiar los efectos de la asimetría causada por la distribución de los disipadores, la rigidez del disipador izquierdo fue multiplicada por valores de 0.6, 0.3 y 0.0, produciéndose tres tipos de excentricidades únicamente en la dirección Y que denominaremos: alta (tipo 1), media (tipo 2) y baja (tipo 3). Se crearon modelos con estas condiciones para cada periodo y participación en la rigidez de los disipadores, obteniéndose estructuras asimétricas con variación en la excentricidad. En la fig 12 se muestra la variación de la excentricidad e_y , normalizada con respecto a la dimensión a de la losa perpendicular a la dirección del sismo. Los puntos en cada línea corresponden a los 3 tipos de excentricidades y representan la magnitud de la asimetría creada, obviamente esta excentricidad es mayor a medida que la rigidez de la estructura depende más de la proporcionada por los disipadores.

3.3.2. ALTERNATIVA "B"

Las características definitivas de geometría y diseño de los elementos estructurales de un edificio son sometidas a procesos de adecuación que dependen de factores económicos, arquitectónicos y estructurales.

En lo estructural existe normatividad. De acuerdo con las recomendaciones de diseño del RDF87 (ref 27) toda estructura en la ciudad de México deberá diseñarse para cumplir cuando menos con los requisitos básicos de seguridad y servicio.

Para instalar disipadores, esta alternativa aprovecha el proceso de adicionar y dimensionar elementos estructurales en el diseño sísmico de edificios. Los requisitos mínimos generales de diseño ante efectos de sismo pueden ser las disposiciones definitivas de estructuración. Entre ellos uno de los más importantes se refiere a la limitación de las deformaciones laterales de entrepiso (ref 27). Resulta común que un dimensionamiento de los elementos estructurales previamente satisfactorio con otras disposiciones, sea modificado por este requisito. Es decir, puede suceder que aunque en la estructura se verifique un diseño adecuado contra fuerzas gravitacionales y fuerzas laterales, la rigidez lateral puede no ser suficiente y se opte por incrementar las dimensiones de los elementos o adicionar otros que contribuyan con esta propiedad dinámica.

Con base en lo anterior, se crearon modelos estructurales que tuvieran precisamente ese problema y cumplieran con los límites de desplazamiento laterales mediante la adición de disipadores.

Así entonces, cuando al modelo convencional le son implementados los disipadores, la resistencia y rigidez originales se incrementan. Simbólicamente

$$Kt_i = Kc < Kt_f = Kc + Kd \quad (3.7)$$

y

$$Rt_i = Rc < Rt_f = Rc + Rd \quad (3.8)$$

donde los subíndice i y f están asociados a los modelos sin y con dispositivos, respectivamente.

El modelo fue diseñado para las fuerzas sísmicas que define el RDF87 a través de su espectro de diseño. No se consideró en el diseño la contribución de los elementos disipadores.

En esta alternativa se estudiaron modelos con periodos de 0.5 a 3.0 s en incrementos de 0.5 s.

Únicamente se utilizó el registro de terreno blando (SCT).

En cada modelo la rigidez de los elementos de cortante se modificó para que los desplazamientos laterales de prediseño (D_{pre}), producto de las fuerzas horizontales aplicadas, excedieran en 1.2, 1.5 y 2.0 veces el límite de 0.012 de la altura H (D_{perm}) del modelo. Este requisito corresponde en el RDF87 a estructuras con elementos separados de la estructura principal incapaces de soportar deformaciones apreciables (ref 27).

Una vez creados estos modelos que cumplieron con la resistencia mínima requerida, pero no con el desplazamiento permisible, se procedió a incrementar su rigidez estructural. Dos opciones fueron consideradas. La primera es la tradicional, los elementos de cortante aumentaron su inercia. La segunda opción residió en la adición del área mínima de dispositivos (A_{dis}) para incrementar la rigidez estructural y cumplir exactamente con los desplazamientos máximos laterales del RDF87; sin embargo, para evaluar su efecto en la respuesta esta área de los disipadores se incrementó desde 2 hasta 10 veces. El área con esta variación se identificó con A_{dis} .

3.3.2.1. RIGIDEZ, DEFORMACION Y CARGA DE FLUENCIA

Como se mencionó anteriormente el disipador modelado en un inicio fue el desarrollado en el Instituto de Ingeniería con su desplazamiento de fluencia D_{yd} en 0.3 cm. Adicionalmente, para estudiar la influencia del desplazamiento de fluencia del disipador en la respuesta de los modelos se definieron otros dos valores: 0.1 y 0.4 cm. Estos valores de D_{yd} pueden ser los de los disipadores a ser utilizados en los edificios.

La carga de fluencia de los disipadores fue función de su desplazamiento de fluencia (D_{yd}) y de la rigidez necesaria del disipador (K_d) para que la estructura ante cargas laterales de diseño tuviera un desplazamiento lateral, identificado como D_{dis} , menor o igual que el desplazamiento permisible del RDF87 (D_{perm}). Al comparar entre uno y otro periodo los incrementos de resistencia en los modelos por la adición de los dispositivos, se observó que estos incrementos eran menores para periodos mayores. Se llevó a cabo un análisis preliminar para evaluar esta modelación y se obtuvo que los modelos con periodo de $T = 0.5$ y 1.0 s tuvieron una menor respuesta a pequeños incrementos del área de los dispositivos. Esta tendencia cambió en $T = 1.5$ s, donde la rigidez del modelo se incrementó hasta 10 veces la original para

lograr una respuesta elástica de los elementos de cortante. Esto se explica porque en esta formulación no existe un control para suministrar suficiente carga de fluencia por parte de los disipadores para que a través de su disipación de energía se disminuya efectivamente la demanda de ductilidad de los elementos de cortante. Ante esta anterior inconveniencia, se buscó plantear nuevamente la formulación del disipador del modelo estructural, para que al definir $D_{y,d}$ se lograra tener una suficiente carga de fluencia R_d en la disipación de energía para cualquier periodo del modelo.

Xia y Hanson (ref 17), obtuvieron que los ADAS limitaban sus ductilidades (menores a 10) ante sismos severos usando valores de $D_{y,d}$ iguales a 0.2 ó 0.3 plg, aproximadamente 0.0014 y 0.002 de la altura H del entrepiso. Además, encontraron reducciones efectivas en los desplazamientos de entrepiso para relaciones menores a 4 de la rigidez de los elementos ADAS a la rigidez estructural sin estos dispositivos.

Con base en lo anterior, se propuso que en nuestro estudio $D_{y,d}$ fuera función de la altura H (fig 9). Por lo que se definieron tres valores del desplazamiento de fluencia $D_{y,d}$: 0.0004, 0.0012 y 0.002 de H. El valor de 0.0012H es aproximadamente igual al valor del desplazamiento de fluencia del disipador desarrollado en el IIUNAM.

Como herramienta para evaluar las respuestas de los modelos estructurales simétricos se obtuvo el incremento en rigidez y resistencia suministrado por la colocación de los disipadores.

El incremento de la rigidez para cada modelo simétrico estudiado con las últimas consideraciones de $D_{y,d}$ descritas en los párrafos anteriores se encuentra en la tabla 1 y fue independiente del periodo fundamental del sistema. Este parámetro se representa en función del área de los dispositivos (A_{dis}) del modelo estructural normalizada por la mínima requerida (A_{disi}) para no exceder D_{perm} . En la tabla 1, por ejemplo, para un $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ y $A_{dis}/A_{disi} = 10$, el incremento de la rigidez K_t del modelo fue del 200% con respecto al del modelo convencional.

Debido a la modelación y a las características del espectro de diseño, se tuvieron únicamente dos variaciones distintas de resistencia en los modelos en los modelos estructurales para cada D_{pre} . En las figs 13, 14 y 15 para el periodo de 0.5 s, y en las figs 16, 17 y 18 para los periodos de 1.0 a 3.0 s, se muestra la resistencia de los modelos con disipadores de energía como el cociente de la resistencia total del marco R_t entre la resistencia de los elementos de cortante R_c para cada desplazamiento inicial de

prediseño D_{pre} y por cada incremento del área de disipadores A_{dis}/A_{dis1} . En estas gráficas cuando $A_{dis}/A_{dis1} = 0$ la estructura equivale a una convencional y por lo tanto $Rt/Rc = 1$.

En nuestro estudio después de evaluar las respuestas de las estructuras simétricas con las características descritas, para analizar el efecto asimétrico de los disipadores, se crearon modelos estructurales asimétricos multiplicando el área de uno de los disipadores en la estructura simétrica por factores de 0.75, 0.5 y 0.0, e identificándose como estructuras tipo A, tipo B y tipo C, respectivamente.

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. ALTERNATIVA "A"

La respuesta sísmica de todos los modelos estructurales se evalúa mediante la demanda de ductilidad máxima (Q_a) de los elementos de cortante, normalizada con respecto a la ductilidad requerida en una estructura simétrica sin disipadores (Q_s). Se deberá tener presente que no necesariamente la elección de Q_s representa el mejor comportamiento a esperarse en un evento sísmico, como habrá de mostrarse más adelante cuando comparemos la respuesta de los modelos asimétricos con los simétricos.

La fig 19 esquematiza la presentación de los resultados. Con T , K_t y R_t definidos de acuerdo con el criterio de diseño se obtienen estructuras simétricas (convencionales y con disipadores) cuya respuesta queda representada por una línea recta horizontal en una gráfica en la que el eje de las abscisas muestra el porcentaje (de 0 a 90%) de la rigidez asignada a los disipadores (K_d) y el eje de las ordenadas la relación de las demandas de ductilidad (Q_a/Q_s). La respuesta de la estructuras asimétricas tenderán a acercarse o alejarse de la simétrica en función del valor del factor de excentricidad. En la estructura tipo 1 se espera la mayor demanda de ductilidad y en la tipo 2 un caso intermedio entre la simétrica y la tipo

1. Por su pequeña excentricidad la tipo 3 se comportará de manera semejante a la estructura simétrica.

En las figs 20 a 22 y 40 a 42, el comportamiento de la estructura simétrica está representada por círculos unidos por una línea continua. La respuesta de la estructura con mayor asimetría (tipo 1) se encuentra definida por una línea continua. La línea unida con cuadros y la punteada están asociadas a los resultados de las excentricidades media (tipo 2) y baja (tipo 3), respectivamente. Cada figura está compuesta por tres gráficas que corresponden a cada uno de los tres periodos considerados con cada registro sísmico.

Las figs 20 a 22 consignan los resultados de los modelos que fueron analizados con fuerzas sísmicas reducidas por un factor de comportamiento sísmico $Q = 3$ (ref 27).

En la fig 20 se muestra la respuesta sísmica de los modelos cuando se utilizó el registro de SCT. Inicialmente estos fueron los que mayores demandas de ductilidad generaron, en contraste con las respuestas obtenidas con el uso de los registros de terreno de transición (VIV) y terreno duro (CU). Por esta razón, estos dos últimos registros fueron escalados para producir la misma demanda de ductilidad en la estructura simétrica utilizada para los periodos estudiados. Los resultados obtenidos con estos dos últimos registros se encuentran en las fig 21 y 22, respectivamente.

El uso del registro de terreno blando (SCT), originó diferentes respuestas en el comportamiento de las estructuras asimétricas (fig 20). La excentricidad tipo 1 con $T = 0.5$ s (fig 20a) mostró la mayor influencia en las estructuras con disipadores (hasta $Q_a/Q_s = 7.8$). La tendencia fue a incrementar Q_a/Q_s al adoptar los disipadores un mayor valor de rigidez, situación que en principio era de esperarse: a mayor excentricidad mayor demanda de ductilidad. Para un periodo de 1.0 s, fig 20b, la tendencia es semejante al de 0.5 s. En $T = 1.5$ s (fig 20c), en el intervalo de 10 a 30 Kd, la respuesta de las estructuras asimétricas tipo 1 fue hasta 10% menor que la estructura simétrica, situación imprevista si se considera que generalmente la asimetría siempre es desfavorable para la respuesta estructural. Después de 30 Kd la tendencia es a incrementar la ductilidad, como ya se comentó previamente.

Con respecto a las estructuras asimétricas tipo 2 y tipo 3, la tendencia en las demandas de ductilidad es semejante a la descrita en el párrafo anterior. Los modelos estructurales con periodos de 0.5 y 1.0 s requieren de una mayor ductilidad a medida que la asimetría aumenta. En el periodo de 1.0 s es notable que las estructuras con una excentricidad moderada requieren de igual o mayor ductilidad que la alta. En

menores que las simétricas.

El cambio en el uso del registro por el de Viveros, fig 21, produce un comportamiento previsto únicamente para el periodo de 1.5 s (fig 21c). Es decir, a menor simetría estructural mayor respuesta desfavorable. Contrariamente, para periodos de 0.5 y 1.0 s (figs 21a y 21b), las estructuras asimétricas, hasta en rangos de 60 Kd para las tipo 3, presentan ductilidades menores que aquellas en las que la torsión no existe.

Similarmente a los resultados anteriores, el uso del registro de CU (fig 22), también produce demandas de ductilidad menores para los modelos asimétricos comparativamente con los simétricos, particularmente para $T = 1.5$ s. También en la fig 22, para el periodo de $T = 1.0$ s se puede observar que no existe diferencia notable entre la respuesta de todos los tipos de estructuras (asimétricas y simétricas), y además, que el valor de Q_a/Q_s es cercano a 1.0.

Con el objeto de comprender el porqué en algunos casos la asimetría resultó favorable con respecto a la respuesta de los modelos simétricos en ciertos porcentajes de participación de rigidez de los disipadores de energía (Kd), se calculó la distribución de la fuerza sísmica en cada marco del modelo cuando a los disipadores se les asignó el 20 y 50 % de la rigidez total de la estructura para $T = 1.5$ s y se utilizó como excitación el registro de SCT (ver fig 20). Adicionalmente se analizó con detalle la historia del desplazamiento y giro del centro de masa de los modelos simétricos y asimétricos para los mismos valores de Kd mencionados.

En la fig 23 se presenta la fuerza como coeficiente sísmico (C.S.) que toma cada uno de los marcos (denominados 1 y 2 en la dirección X, 3 y 4 en la dirección Y) del modelo simétrico, y de los modelos con asimetría tipo 1, 2 y 3 cuando Kd es igual 20. Nótese que la participación de los marcos perpendiculares 3 y 4 en las estructuras se incrementa a medida que la excentricidad estructural es mayor. Por ejemplo, en la estructura tipo 1, toman el 12.5 % del cortante inducido y en la tipo 2 y 3, el 8 y 4 % respectivamente.

Para un valor de Kd igual a 50, la distribución de la fuerza sísmica en cada marco se representa en la fig 24. Comparando estos resultados con los de los modelos con Kd igual a 20 (fig 23), se observa aquí una mayor participación de la respuesta de los elementos perpendiculares a la dirección del sismo en el

modelo asimétrico: 59, 26 y 14% de la fuerza cortante total para las estructuras tipo 1, 2 y 3 respectivamente.

La distribución de la fuerza sísmica en los marcos perpendiculares de los modelos asimétricos descritos únicamente nos muestra que ésta se distribuye de manera proporcional a la excentricidad existente y por lo tanto no se justifica al efecto favorable de la asimetría; por el contrario, con esta evaluación se sitúa a los modelos asimétricos como la condición más desfavorable.

Una explicación tentativa de los efectos favorables de la excentricidad en la respuesta podría encontrarse si recurrimos a estudiar los movimientos de los modelos. Esto es, si la excentricidad de un modelo asimétrico reduce la respuesta sísmica se tendrá que la resultante de un giro del diafragma y un desplazamiento lateral moderados (en la dirección X despreciando la dirección perpendicular Y) será menor que la magnitud del desplazamiento lateral en una estructura simétrica o de alguna otra estructura que tienda a comportarse en forma semejante.

Para verificar la hipótesis anterior se obtuvieron las historias de los desplazamientos laterales y giros de los centros de masa de las estructuras simétrica, tipo 1 y tipo 2 para $K_d = 20$ y $K_d = 50$ con $T = 1.5$ s (figs 25 a 28). La identificación de cada estructura es la misma que en las figuras de demanda de ductilidad.

Para efectos de comparación las historias de los desplazamientos de todas las estructuras mencionadas con $K_d = 20$ se presentan en la fig 25. En ella se visualiza que la estructura más asimétrica responde con mayor desplazamiento aproximadamente hasta antes de los 5 s y después de los 28 s de excitación que tiene el registro cortado de SCT, pero no comprende el tiempo de fase intensa del sismo. En el intervalo intermedio, de los 5 a 39 s, el desplazamiento de la estructura simétrica dominó los de las estructuras asimétricas. Cuantitativamente en la fase intensa y alrededor de los 18 s se registraron los máximos desplazamientos: la estructura simétrica registro 32 cm; y la tipo 2 y 1, 28 y 26 cm respectivamente. Para que fuera posible que la estructura tipo 1 se desplazara menos que la tipo 2, se necesitaría una mayor componente de torsión. En la fig 27 se corrobora esta situación: la estructura tipo 2 nunca supera la componente torsional de la tipo 1.

En la fig 29 se representa esquemáticamente lo descrito en el párrafo anterior. Ante la excitación la

estructura tipo 2 se desplaza más que la tipo 1 y gira menos que ésta última. La estructura simétrica se encontraría aun más a la derecha de las posiciones de las otras dos estructuras y con una sola componente de desplazamiento.

Cuando K_d fue igual a 50, la estructura tipo 1 tuvo los mayores desplazamientos hasta los 15 s y después de los 25 s (fig 26). En el intervalo de 15 a 25 s la estructura simétrica y la tipo 2 comparten los mayores desplazamientos. Alrededor de los 18 s las estructuras obtuvieron los máximos desplazamiento: 30 cm para la simétrica, 33 y 32 cm para la tipo 2 y tipo 1. Aparentemente no existe ninguna diferencia cualitativa con las respuestas de $K_d = 20$. Sin embargo, los giros de la estructura tipo 1 (hasta del orden de dos veces la tipo 2), contribuyeron a que sus elementos de cortante tuvieran finalmente la mayor demanda de ductilidad (fig 20c).

Se considera que las conclusiones anteriores pueden ser extendidas a otras situaciones del estudio donde las estructuras asimétricas tuvieron menor demanda de ductilidad.

Aparentemente esta situación favorable de la asimetría tiene una mayor tendencia en los primeros valores de K_d cuando la excentricidad es relativamente menor que en los últimos casos. Sin embargo, el hecho de que esto ocurra en periodos distintos o en casos particulares del rango de K_d , puede depender de las características de cada excitación.

Por lo que respecta a los disipadores de las estructuras asimétricas, éstas tienden a comportarse a semejanza de los elementos de cortante, su ductilidad desarrollada fue menor que la simétrica, comparar inciso a) y b) en las figs 30 y 31.

Cuando se analizaron las historias de fluencia de los elementos de cortante se encontró que en las estructuras asimétricas se comportan más inelásticamente que en las estructuras simétricas. En la fig 34 se observa que uno de los elementos de cortante fluye aproximadamente 1.4 veces más que el correspondiente a la estructura simétrica (fig 32).

Por otra parte, aparentemente la asimetría no incrementa significativamente la respuesta de los disipadores. El único disipador en la estructura tipo 1 con $K_d = 20$ (fig 35) fluye el mismo número de veces que cuando es utilizado en la estructura simétrica (fig 33).

Por lo que respecta a las historias de fluencia de los elementos con $K_d = 50$ (figs 36 a 39), el análisis de su comportamiento arroja conclusiones semejantes a los del valor de 20 en K_d .

Si consideráramos que en los elementos estructurales el número de ingresos al rango inelástico y la alternancia de su sentido definen el daño mejor que la máxima demanda de ductilidad, concluiríamos del análisis mencionado en los últimos párrafos, que la estructura simétrica tiene el mejor comportamiento sísmico.

Sin embargo, se debe tener cuidado en la elección de la respuesta que sea más representativa o tenga más peso en la definición del comportamiento de la estructura. Aunque la estructura usada es un modelo, es posible jerarquizar cual es la respuesta más apropiada cuando definimos el tipo de estructuras que tratamos de modelar. Por ejemplo, es posible que en una estructura de concreto se tenga la misma valorización del número de veces y el sentido en que ingresa al intervalo inelástico sus elementos, y su desplazamiento máximo, porque usualmente son muy vulnerables a la degradación de rigidez y resistencia dependiendo de los desplazamientos desarrollados. En cambio en una estructura de acero posiblemente, debido a las características intrínsecas de ductilidad del mismo material, el mayor desplazamiento tenga más importancia.

Cuando las fuerzas sísmicas fueron reducidas por $Q = 4$, se encontraron valores de las relaciones Q_a/Q_s semejantes a los descritos en párrafos anteriores. Para el periodo de 1.0 s y el registro de SCT las demandas de ductilidad de todos los modelos son muy parecidas (fig 40b). En la fig 41 todas las demandas siguen la regla de mayor excentricidad mayor demanda de ductilidad. Se observa en la fig 42, para periodos de 1.0 y 1.5 s, que las respuestas de los modelos asimétricos son menores hasta en un 10 % con respecto al simétrico en buena parte del intervalo de rigidez asignada a los disipadores.

4.2. ALTERNATIVA "B"

Inicialmente, se estudian los resultados de los modelos simétricos con disipadores de energía para identificar los rangos de los parámetros donde existe reducción de la respuesta sísmica. Posteriormente se estudia la respuesta de las estructuras asimétricas.

Por la rapidez y facilidad de estudio de un gran número de modelos, la demanda de ductilidad siguió

siendo la principal respuesta para evaluar el comportamiento sísmico.

4.2.1. ESTRUCTURAS SIMÉTRICAS

En $T = 0.5$ s, para comprender inicialmente la influencia de los parámetros estudiados, en cada valor del desplazamiento de prediseño (D_{pr}) se analiza conjuntamente la demanda de ductilidad de los elementos de cortante y la de los disipadores. Con este antecedente, en los siguientes periodos, se completa primero el análisis de la demanda de ductilidad de los elementos de cortante para todos los valores de D_{pr} y después la de los disipadores. Durante este desarrollo se recurre frecuentemente a las figs 13 a 18 y a la tabla 1 obtenidas en el capítulo anterior.

Las máximas demandas de ductilidad de los elementos de cortante en las estructuras simétricas con periodo fundamental de 0.5 s se muestran para cada desplazamiento de prediseño, en las figs 43 a 45. En las figuras, cada gráfica está asociada a un valor del desplazamiento de fluencia del disipador expresado en función de la altura H del entrepiso del modelo. En el eje de las abscisas de cada gráfica se mide el cociente A_{di}/A_{dai} . En el eje de las ordenadas aparece la máxima demanda de ductilidad de los elementos de cortante (Q_c), definida como el cociente de su desplazamiento último (D_{uc}) entre el desplazamiento de fluencia (D_{yf}).

En cualquier de estas figuras, un valor de A_{di}/A_{dai} muy especial es la abscisa correspondiente al punto de intersección de las curvas de ductilidad con una recta horizontal de ordenada $Q_c = 1.0$, ya que define el área mínima necesaria en los disipadores para alcanzar un comportamiento elástico de los elementos de cortante. La región entre $Q_c = 0.0$ y 1.0 señala el comportamiento elástico del elemento, y su complemento, el comportamiento inelástico.

En la fig 43 se observa que el modelo con $D_{yd} = 0.0004 H$ describe una menor demanda de ductilidad para incrementos de área en los disipadores. Esta misma tendencia de decrementar la respuesta se observa en los modelos con $D_{yd} = 0.0012$ y 0.002 de H (fig 43). Aunque este comportamiento era de esperarse, como efecto del aumento de la rigidez y resistencia que produce la adición de disipadores, es necesario evaluar la importancia de todos los parámetros participantes y elegir el desplazamiento de fluencia del disipador así como los rangos óptimos de A_{di}/A_{dai} que produzcan la respuesta elástica de los elementos de cortante. Las líneas de máxima ductilidad muestran que este parámetro influye en los resultados de

manera más notoria y es muy sensible en los primeros incrementos de área de los disipadores: hasta A_{dis}/A_{disi} igual a 4 o 6; en los siguientes incrementos la respuesta tiene leves diferencias (fig 43). Por ejemplo, con $D_{yd} = 0.0012 H$, la respuesta inicial puede decrementarse en un 370 % cuando $A_{dis}/A_{disi} = 4$ y en un 463 % con $A_{dis}/A_{disi} = 10$. Apenas 93% de diferencia entre el uso de estas dos alternativas de área.

Para analizar los incrementos de resistencia y rigidez consideremos de nueva cuenta la tabla 1 y las figs 13 a 15. Cuando se colocan disipadores en los modelos con $D_{yd} = 0.0012$ y 0.002 de H con A_{dis}/A_{disi} igual a 1 (fig 43), el modelo incrementa su resistencia en un 6.9 y 11.4 % (fig 13), respectivamente, y la rigidez en un 20 % para ambos (tabla 1). Ante la excitación utilizada el sistema estructural con las características anteriores genera máximas demandas de ductilidad (Q_c) en cada caso de 3.7 y 2.8. A diferencia del modelo con $D_{yd} = 0.0004 H$, al que para un incremento de 2.3 y 20 % en la rigidez y resistencia, respectivamente, se obtiene $Q_c = 3.28$.

Considerando el concepto del uso de los disipadores para lograr un comportamiento elástico, en los modelos con $D_{yd} = 0.0004 H$ se alcanza $Q_c = 1.0$ con aproximadamente $A_{dis}/A_{disi} = 8$ (fig 43). Si recurrimos a la fig 13 esto significa un incremento de la resistencia total del 18.3 %. Para lograr la misma respuesta, si el desplazamiento de fluencia del disipador fuera 0.0012 o 0.002 de H , esto requeriría en cada caso de un valor de $A_{dis}/A_{disi} = 4$ (fig 43) un incremento en la resistencia total del sistema del 27.4 % ó 43.4 % (fig 13) en forma respectiva.

Como se observa existe una notable diferencia en los incrementos necesarios de resistencia del modelo para cada uno de los tres desplazamientos de fluencia del disipador con el objeto de lograr $Q_c = 1.0$. Esto es consecuencia de la disipación de energía que realiza cada dispositivo. Aparentemente esto implica que un desplazamiento de fluencia pequeño del disipador obliga a que sea óptima la disipación de energía. Sin embargo, debe recordarse que este valor también debe ser lo suficientemente grande para limitar la excesiva ductilidad que se pueda desarrollar ante excitaciones severas. Pero, no solamente la elección del desplazamiento de fluencia es la característica más importante de los dispositivos, se debe también considerar la fuerza de fluencia y su relación con los parámetros de la estructura. La combinación de estos parámetros hacen efectiva la reducción de la respuesta. Al incrementarse la fuerza de fluencia conservando el mismo desplazamiento de fluencia es posible aumentar la capacidad de disipación histerética del disipador. Aunque, al igual que D_{yd} existen límites para este parámetro: una gran carga

de fluencia puede resultar en un disipación ineficiente o inexistente. Ver los valores de Q_c para los últimos valores de A_{diu}/A_{dii} en la fig 43.

En forma análoga a los elementos de cortante para estudiar la capacidad de disipación de los dispositivos, en las figs 46 a 48 se presenta la máxima demanda de ductilidad de los disipadores de energía (Q_d). Estas gráficas resultan interesantes porque muestran si los disipadores fluyen ante la excitación, aunque no precisan la cantidad de energía disipada.

En la fig 46 se aprecia que la ductilidad desarrollada es muy sensible y distinta para cada valor de D_{yd} . Por ejemplo, cuando A_{diu}/A_{dii} es igual a 1.0 con $D_{yd} = 0.0004$ y 0.0012 el dispositivo desarrolla una ductilidad (Q_d) de 27 y de 10, respectivamente. Puede observarse que la tendencia de las ductilidades máximas de los disipadores, representada por la línea continua, es prácticamente semejante a la ductilidad de los elementos de cortante. Por ejemplo, con $D_{yd} = 0.0012$ H después de $A_{diu}/A_{dii} = 4$ (fig 46), la demanda de ductilidad permanece constante después de experimentar una severa caída en sus valores.

Para efectos de evaluar los disipadores se definen dos límites de su ductilidad: el superior en un valor de Q_d igual a 10 y el inferior cuando Q_d es igual a 1.0. Los límites representan respectivamente una máxima ductilidad recomendada (ref 17) y una disipación nula. En el último caso, la respuesta elástica de la estructura es únicamente producto de una gran rigidización.

Con base en lo anterior las ductilidades aceptables de los disipadores con $D_{yd} = 0.0004$ H ocurren después de $A_{diu}/A_{dii} = 6$; para todos los valores de A_{diu}/A_{dii} cuando D_{yd} es igual a 0.0012 H; y hasta $A_{diu}/A_{dii} = 6$ para $D_{yd} = 0.002$ H (fig 46).

El incremento en la resistencia del modelo que suministran los disipadores con 0.0004 H de desplazamiento de fluencia es el menor para lograr los objetivos de $Q_c = 1.0$ y $1 < Q_d < 10$. Esto puede justificar su elección como disipador para reducir la respuesta sísmica. Con su uso se necesitó en $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ una área equivalente de $A_{diu}/A_{dii} = 8$, al auxiliarnos de la tabla 1 esto significó un aumento a 2.6 veces la rigidez original del sistema.

Retomando el análisis de la demanda de ductilidad de los elementos de cortante, se observa que la tendencia de esta respuesta en $D_{pre} = 1.5 D_{perm}$ (fig 44) es la misma que la obtenida en $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$.

Entre mayor sea el desplazamiento de fluencia de los disipadores, la zona inicial de la respuesta con mayor decremento se reduce (obsérvense las ductilidades en los primeros valores de A_{di}/A_{dii}). Se aprecia que conforme se incrementa D_{yd} con $A_{di}/A_{dii} = 1.0$, los valores obtenidos de ductilidad son menores. Por ejemplo la ductilidad de los elementos de cortante con $D_{yd} = 0.0004 H$ es igual a 3, y con $D_{yd} = 0.002 H$ su valor es 1.35 (fig 44), con una ductilidad desarrollada en los disipadores de 28.5 y 2.5, en cada caso (fig 47).

También en la misma fig 44 se observa que el elemento de cortante se comporta elásticamente con $A_{di}/A_{dii} = 6$ y $D_{yd} = 0.0004 H$. Utilizando la fig 14 y tabla 1 se obtiene que el sistema aumenta sus características iniciales de resistencia a 1.32 veces y de rigidez a 2.2 veces. Con $D_{yd} = 0.0012 H$, para lograr el mismo valor en la respuesta de ductilidad se incrementa la resistencia 1.45 veces y la rigidez a 1.56 (fig 14 y tabla 1). Lo anterior significa un ahorro favorable en resistencia con $D_{yd} = 0.0004 H$ del 10%. Una comparación análoga entre 0.0004 H y 0.002 H muestra un ahorro favorable en resistencia para el primero del 13 % (fig 14 y 44). En la fig 47 se comprueba que para los valores de A_{di}/A_{dii} en que se logra el comportamiento elástico de los elementos de cortante ($Q_c = 1.0$) los elementos disipadores ingresan al comportamiento inelástico, sobre todo cuando D_{yd} es igual a 0.0004 H.

Como resultado de la comparación cualitativa entre los resultados de los modelos con $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ y $1.5 D_{perm}$ (figs 43 y 44), aparentemente la participación de los disipadores en la respuesta es más efectiva en los modelos que son más flexibles. Es decir, la estructura con un mayor desplazamiento lateral de prediseño cede mayor participación a los disipadores. Con $D_{pre} = 2.0 D_{perm}$ desde los primeros valores iniciales de A_{di}/A_{dii} para cualquier D_{yd} , los elementos de cortante están muy cerca o ya tienen un comportamiento elástico (fig 45), análogamente, los elementos disipadores se mantienen elásticos para la mayor parte de los valores de A_{di}/A_{dii} principalmente en $D_{yd} = 0.0012 H$ y $D_{yd} = 0.002 H$ (fig 48). La ventaja observada en un menor incremento de resistencia que ofrece el uso de disipadores con pequeño desplazamiento de fluencia para lograr $Q_c = 1.0$ se verifica de nueva cuenta: en $D_{yd} = 0.0004 H$ la sobrerresistencia es del 22 % y en $D_{yd} = 0.0012 H$ del 32 %. Lo desfavorable se encuentra cuando se analiza la ductilidad desarrollada por los disipadores en $D_{yd} = 0.0004 H$ porque desarrollan esta respuesta hasta un valor de 12 en comparación con un valor de 4 para $D_{yd} = 0.0012 H$. Por esta observación, se puede cuestionar el uso de $D_{yd} = 0.0004 H$ para implementación si se desea mantener la ductilidad del orden de $1 < Q_d < 10$.

Aunque ya se ha descrito parte de la respuesta de los disipadores con la evaluación de su ductilidad, resulta interesante el estudio cualitativo de su comportamiento a través de su curva de histéresis desarrollada ante la excitación sísmica utilizada. Como se ha mencionado se debe evitar que estos elementos desarrollen una poca o excesiva ductilidad. Cuando se ha colocado el área mínima de disipadores ($A_{dis}/A_{disi} = 1.0$) para cumplir con las recomendaciones de RDF87, es posible que con los valores pequeños de D_{yd} se obtengan grandes ductilidades de todos los elementos. Los aspectos mencionados pueden observarse en las figs 49 a 51. Todas ellas representan la respuesta histerética del disipador desarrollada durante toda la excitación para cada D_{yd} y para el caso particular de $A_{dis}/A_{disi} = 1.0$, identificado como caso I. En estas figuras se reafirma la demanda de ductilidad obtenida en las figs 46 a 48, y además se visualiza cualitativamente lo que se les exige a estos elementos cuando son colocados en los modelos estructurales.

Similarmente, para el caso denominado como II, se obtienen las curvas de histéresis de los dispositivos para lo que ocurra primero de las dos situaciones siguientes: cuando el valor de A_{dis}/A_{disi} (valor par más cercano al real de A_{dis}/A_{disi}) es suficiente para lograr el comportamiento elástico de los elementos de cortante o cuando A_{dis}/A_{disi} es igual a 10 (figs 52 a 54). Por su particularidad no necesariamente las curvas pertenecen al mismo valor de área de disipadores colocada. Para sistemas con el más pequeño valor de desplazamiento de fluencia ($D_{yd} = 0.0004 H$), en los tres valores de D_{pre} se muestra una mayor cantidad de energía disipada, aun cuando en las otras dos alternativas la fuerza de fluencia sea mayor.

Resumiendo, para el periodo de 0.5 s la respuesta sísmica de los modelos puede ser controlada hasta un nivel elástico por la colocación de disipadores de energía. Con $D_{yd} = 0.0004 H$ ó $0.0012H$ la resistencia del modelo deberá ser 35 % mayor a la convencional. La disipación no es efectiva con $D_{yd} = 0.002 H$ y la respuesta se reduce únicamente por rigidización.

Las demandas de ductilidad de los elementos de cortante en los modelos estructurales con periodo fundamental de 1.0 s (fig 55 a 57) son ligeramente mayores a las desarrolladas en los modelos con $T = 0.5$ s. En general las líneas de la demanda de ductilidad para $T = 1.0$ s no disminuyen rápidamente su ordenada como en $T = 0.5$ s y en consecuencia, para lograr una ductilidad de 1.0 se requiere de valores de A_{dis}/A_{disi} relativamente mayores. Por ejemplo, cuando $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$, con $D_{yd} = 0.0004 H$ (fig 55) y $A_{dis}/A_{disi} = 10$, apenas el incremento de la resistencia a 1.24 veces la original del modelo es suficiente para evitar el comportamiento inelástico de los elementos de cortante. Con $D_{yd} = 0.0012 H$ como para

$D_{yd} = 0.002$ H hasta un valor de $A_{dis}/A_{disi} = 6$ para que la fluencia de los elementos sea nula, esto es $Q_c = 1.0$. Sólo que para lograrlo, de acuerdo con la fig 16, en el primero la resistencia del modelo se incrementa a 1.43 y en el segundo 1.72. En estos dos casos de D_{yd} con $A_{dis}/A_{disi} = 6$, la rigidez se incrementa a 2.2 veces la rigidez de la estructura de prediseño (tabla 1). Al igual que en los casos descritos de 0.5 s de periodo, en estos sistemas también resulta conveniente para suministrar las menores resistencias, implementar dispositivos con 0.0004 H de desplazamiento de fluencia. Además, la demanda de ductilidad desarrollada por los disipadores de energía para $Q_c = 1.0$ con $D_{yd} = 0.0012$ H y $D_{yd} = 0.002$ H resulta aceptable, como se puede verificar en la fig 58.

Para los modelos con valores de $D_{pro} = 1.5 D_{perm}$ y $D_{pro} = 2.0 D_{perm}$ (fig 56 a 57), estructuras más flexibles, las demandas de ductilidad de sus elementos de cortante se decrementan con mayor rapidez, para los mismos incrementos de área de los disipadores, que cuando $D_{pro} = 1.2 D_{perm}$. La zona de mayor reducción en la demanda de ductilidad de $D_{pro} = 1.5 D_{perm}$ y $D_{pro} = 2.0 D_{perm}$, en los primeros valores de A_{dis}/A_{disi} , se amplía ligeramente a la izquierda.

Con $D_{pro} = 2.0 D_{perm}$ (fig 57), sucede lo contrario a lo observado con respecto a la influencia de los desplazamientos de fluencia pequeños. Para lograr $Q_c = 1.0$, con $D_{yd} = 0.0004$ H o $D_{yd} = 0.0012$ H la resistencia del sistema se tiene que incrementar hasta 1.437 veces la original y con $D_{yd} = 0.002$ H hasta 1.36 veces.

Pasemos a estudiar la respuesta de los disipadores. Prácticamente, en todos los valores de A_{dis}/A_{disi} las ductilidades desarrolladas por los disipadores de energía con $D_{yd} = 0.0004$ H, para todos los casos de D_{pro} , son mayores que $Q_d = 10$ (fig 58 a 60). Por lo tanto, de acuerdo con Xia y Hanson (ref 17), su implementación no es conveniente para modelos con $T = 1.0$ s en los rangos analizados.

Las curvas de histéresis de los disipadores de energía para $A_{dis}/A_{disi} = 1.0$ (caso I) desarrollan tanto en este periodo como el anterior una excesiva ductilidad (fig 61 a 63), y una respuesta menor para el caso II (fig 64 a 66). La ductilidad desarrollada es mayor para los desplazamientos menores de fluencia del disipador.

Para sistemas con periodo de 1.5 s las líneas de la máxima demanda de ductilidad de los elementos de cortante tienen una menor curvatura (figs 67 a 69) que las de los sistemas con $T = 0.5$ y 1.0 s. Esto

llevaría a pensar en el uso de mayores valores de A_{dis}/A_{disi} para obtener un comportamiento elástico de la estructura. La parte de estas líneas donde los incrementos de área del disipador prácticamente no produce efecto alguno, generalmente para la última mitad de valores de A_{dis}/A_{disi} , es menor que en cualquiera de los otros dos periodos anteriores. Todo esto significa que se requiere asignar una mayor resistencia y rigidez por los disipadores para reducir la respuesta a medida que los modelos tienen un mayor periodo fundamental.

Prácticamente los modelos con $D_{yd} = 0.0004 H$ no alcanzan respuestas elásticas de los elementos de cortante para los tres valores de D_{pre} (fig 67 a 69), a pesar de que los disipadores desarrollan una excesiva ductilidad (figs 70 a 72). Sin embargo, con el mismo D_{yd} para $A_{dis}/A_{disi} = 7$ y $D_{pre} = 2.0 D_{perm}$ (fig 69), con un aumento de resistencia de 48 % en la estructura, se logra un comportamiento elástico de la misma, a diferencia de los aumentos de 53 % y 57 % requerido con las otros dos opciones de D_{yd} (fig 18).

Para cualquiera de los tres valores de D_{pre} , la resistencia suministrada para lograr $Q_c = 1.0$ con $D_{yd} = 0.0012 H$ es menor (hasta en un 8%) que con $D_{yd} = 0.002 H$ (figs 16 a 18 y 67 a 69).

Al menos cuando se logra $Q_c = 1.0$ en $D_{yd} = 0.0012 H$ y $D_{yd} = 0.002 H$, la ductilidad desarrollada por los disipadores (figs 70 a 72) se encuentra en los rangos considerados como satisfactorios ($1 < Q_d < 10$).

En las figs 73 a 75 se presentan las curvas de histéresis cuando $A_{dis}/A_{disi} = 1.0$. Los disipadores desarrollan una excesiva ductilidad y no fueron suficientes en ninguno de los casos para obtener $Q_c = 1.0$. En todas las gráficas de la fig 78 y a excepción de las dos primeras gráficas en las figs 76 y 77 se muestran las curvas de histéresis correspondientes al área de los disipadores que lograron $Q_c = 1.0$ con una ductilidad desarrollada dentro de los límites establecidos como los recomendables ($1 < Q_d < 10$).

En principio, se atribuye a las características del registro sísmico los incrementos de la demanda de ductilidad de los elementos de cortante en los periodos de $T = 1.0$ y 1.5 s. Análogamente, se incrementan las ductilidades en los disipadores. Prácticamente en todas las respuestas con $D_{yd} = 0.0004 H$ se excede el rango de $Q_d < 10$. Por lo tanto, $D_{yd} = 0.0012 H$ resulta ser la mejor opción para obtener $Q_c = 1.0$ y otorgar la menor resistencia. En $T = 1.0$ s, con este valor de D_{yd} las resistencia del modelo con disipadores resultan en promedio 1.44 veces mayor que la convencional y en $T = 1.5$ s, 1.54 veces.

En apariencia, la demanda de ductilidad de los elementos de cortante en los modelos con periodos de 2.0 s tiende a diferir de los modelos antes analizados. La concavidad de la curva es contraria en todos los casos de $D_{yd} = 0.0004 H$ y en los casos iniciales de A_{dis}/A_{disi} de $D_{yd} = 0.0012$ y $0.002H$ (figs 79 a 81). El último valor de D_{yd} para $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ y los valores de $D_{yd} = 0.0012$ y $0.002 H$ para $D_{pre} = 1.5$ y $2.0 D_{perm}$ aparentemente son las opciones más viables para reducir la respuesta en los rangos analizados de A_{dis}/A_{disi} . Las respuestas obtenidas con estos modelos resultan de particular interés debido a que en este caso la estructura en la fase de prediseño coincide con el periodo dominante del registro sísmico.

Un sistema que originalmente sin disipadores de energía tenía un periodo fundamental de 2.0 s puede acercarse al mismo periodo dominante de 2.0 s de la excitación usada cuando los elementos disipadores fluyen en la estructura. A pesar de que esto puede resultar muy desfavorable para la estructura, según los resultados obtenidos, aparentemente no existe restricción para que los elementos disipadores sigan produciendo respuestas elásticas de los modelos. Esto obedece a que una gran rigidización otorgada a la estructura la lleve a aceleraciones sísmicas menores y a una mayor participación de los disipadores con mejor disipación de energía, como sucede en los casos de $D_{pre} = 1.5$ y 2.0 y no en el caso de $D_{pre} = 1.2$ (figs 79 a 81).

Al igual que con los otros periodos analizados sigue siendo válido que para un menor desplazamiento de fluencia del disipador se logra (dentro de los rangos analizados) un comportamiento elástico del elemento de cortante con una menor sobrerresistencia. Por ejemplo, para $D_{pre} = 1.5 D_{perm}$ (fig 80) con $D_{yd} = 0.0012 H$ se necesita incrementar la resistencia a 1.713 veces la resistencia del modelo, y para $D_{yd} = 0.002 H$ el incremento llega a 1.832 (fig 17). Nótese que esta sobrerresistencia (para lograr $Q_c = 1.0$) es mayor que la de los modelos con periodo de 1.5 s.

La misma tendencia en la demanda de ductilidad de los disipadores, con respecto a los elementos de cortante se mantiene en las figs 82 a 84. En los casos particulares de A_{dis}/A_{disi} que logran $Q_c = 1.0$ la ductilidad Q_d es aceptable dentro de los rangos establecidos.

En los últimos dos periodos estudiados, $T = 2.5$ y 3.0 s, la colocación de los disipadores puede no influir en la respuesta, como sucedió en $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ (fig 85 y 91), donde la demanda de ductilidad no se redujo para valores considerables de A_{dis}/A_{disi} . También puede obtenerse un comportamiento elástico de los elementos de cortante como sucedió en ciertos valores de A_{dis}/A_{disi} para $D_{pre} = 1.5$ y $2.0 D_{perm}$ con

$D_{yd} = 0.0012$ y $0.002H$ (figs 86, 87, 92 y 93). Cuando no se logra $Q_c = 1.0$ para los valores de A_{dis}/A_{disi} , la presencia de los disipadores en estos periodos puede en cambio incrementar la ductilidad, obsérvese $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ (figs 85 y 91). Esto significa que el incremento en el área de los disipadores no resulta suficiente en las estructuras menos flexibles.

Cuando puede obtenerse $Q_c = 1.0$, sigue siendo favorable la implementación del disipador con menor desplazamiento de fluencia (figs 86, 87, 92 y 93). En $T = 3.0$ s y $D_{pre} = 2.0 D_{perm}$ (fig 93) el uso de disipadores con desplazamiento de fluencia de $D_{yd} = 0.0012$ H con $A_{dis}/A_{disi} = 4$ produce un incremento en la resistencia 10 % menor que utilizar $D_{yd} = 0.002$ H con $A_{dis}/A_{disi} = 2.9$ (fig 18); y con incrementos respectivos en la rigidez a 4 y 3 veces la original.

La ductilidad de los disipadores de energía tiene aproximadamente la misma tendencia que la de los elementos de cortante y con un valor aceptable para cuando se logra $Q_c = 1.0$ (figs 88 a 90 y 94 a 96).

De acuerdo con los resultados obtenidos en $T = 2.0, 2.5$ y 3.0 s, con $D_{yd} = 0.0004$ H, la demanda de ductilidad de los elementos de cortante en los rangos estudiados de A_{dis}/A_{disi} no tiene una reducción significativa. Es conveniente una elección de $D_{yd} = 0.0012$ H con respecto a $D_{yd} = 0.002$ H por los menores incrementos de resistencia para obtener $Q_c = 1.0$. Por lo que respecta a D_{pre} , entre mayor es la flexibilidad de los modelos la resistencia otorga es menor para los objetivos mencionados.

Si partimos del supuesto de que el cociente R_t/R_c representa el costo inicial de la estructura con disipadores con respecto a la convencional. Con base en los resultados obtenidos, nos inclináramos por la elección del menor valor de este parámetro. Desde este punto de vista, el menor desplazamiento de fluencia del disipador que logre $Q_c = 1.0$ es el deseable. Con respecto a la bondad de los disipadores para reducir la respuesta, posiblemente con mayores valores de A_{dis}/A_{disi} a los considerados en el estudio se lograrían que para cualquier D_{pre} se obtenga comportamiento elástico de los elementos de cortante.

Resulta interesante comparar las respuestas de todas las alternativas de implementación de dispositivos con la de la rigidización de los elementos de cortante (fig 97). La demanda de ductilidad de los elementos en los modelos con disipadores no fue mayor que la de las estructuras convencionales. La diferencia es más notable para los mayores valores de D_{yd} excepto en algunos rangos de área de disipadores en los últimos dos periodos (2.5 y 3.0 s), donde las tendencias de ductilidad difirieron. También esta diferencia

fue mayor en los tres primeros periodos (0.5, 1.0 y 1.5s).

Los comportamientos desfavorables obtenidos con el incremento del área de los disipadores en periodos mayores o iguales a los 2.0 s son producto de las características del registro usado. Los mayores beneficios de la implementación -dentro de los rangos de los parámetros usados- se encuentran en los periodos de 0.5, 1.0 y 1.5 s. En la fig 98 se muestra el espectro de pseudoaceleraciones de SCT. Una rigidización del sistema decreta el periodo fundamental y lo aleja del periodo dominante del sismo (2.0 s). Sin embargo, para $T = 2.0, 2.5$ y 3.0 s la situación es adversa, la rigidización conlleva a un acercamiento al periodo dominante. No obstante, para todos los periodos fue posible lograr un comportamiento elástico de los elementos estructurales. Además de que se necesitó un menor incremento de resistencia para lograr $Q_c = 1.0$ entre mayor fue el desplazamiento de prediseño. Por esto, se puede afirmar que aparentemente no existen restricciones de uso de los disipadores desde el punto de vista del mejoramiento de la respuesta estructural. El incremento de la resistencia asociado al costo de la estructura es posiblemente lo más limitante y cuestionable.

4.2.2. ESTRUCTURAS ASIMÉTRICAS

De acuerdo al planteamiento descrito en el capítulo anterior se estudió la respuesta de los modelos estructurales con distribución asimétrica de los disipadores de energía. Se obtuvo la máxima demanda de ductilidad de los elementos para todos los incrementos de área de los disipadores (A_{dis}/A_{disi}) en los modelos.

En las figs 99 a 134 se incluyen las máximas demandas de ductilidad de los elementos de cortante de todas las estructuras asimétricas estudiadas para tres diferentes valores de D_{yd} . Se utiliza la siguiente identificación: la respuesta de la estructura simétrica se representa nuevamente con una línea continua; la respuesta de la estructura tipo A con cuadros unidos por una línea continua; las respuestas de las estructuras tipo B y tipo C con líneas con triángulos y círculos, respectivamente. Por cada periodo estudiado se analiza primeramente las respuestas de los elementos de cortante en la dirección X, para todos los desplazamientos de prediseño, y después las de los elementos en la dirección Y.

Para los modelos con periodo de 0.5s en la dirección X y un $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ la respuesta de las estructuras con menor asimetría (tipo A) prácticamente no difiere de la estructura simétrica, incluso con

el primer valor de A_{di}/A_{dai} y $D_{yd} = 0.0012$ y $0.002 H$ resulta menor (fig 99). Las respuestas de las estructuras tipo B y C son comparativamente análogas a las tipo A. Las demandas de ductilidad de las estructuras asimétricas son proporcionales a su excentricidad por lo que se encuentran a una distancia constante con respecto a la respuesta simétrica. Podemos afirmar que aun en estructuras asimétricas la demanda máxima de ductilidad Q_c es menor entre mayor sea el área colocada de disipadores en el modelo. Para cualquiera de los tres valores de fluencia de los disipadores (D_{yd}) estudiados, generalmente la máxima demanda de ductilidad Q_c se encuentra en los modelos estructurales tipo C, aunque existen valores de A_{di}/A_{dai} donde la máxima demanda de ductilidad puede ser desarrollada por las otras estructuras asimétricas, por ejemplo, en $D_{yd} = 0.0012 H$ es la estructura simétrica y en $D_{yd} = 0.002 H$ es la tipo B (fig 99).

Todos los sistemas estructurales con $D_{pre} = 1.5$ y $2.0 D_{perm}$, tienen más o menos la misma respuesta descrita en el párrafo anterior (figs 100 y 101). La demanda de ductilidad de los elementos sigue la misma tendencia de las estructuras simétricas correspondientes y son proporcionales a la excentricidad creada.

Dentro de los rangos de valores de área de los disipadores utilizados con los modelos de periodo $0.5 s$, los elementos de cortante de las estructuras simétricas, y estructuras tipo A y tipo B responden elásticamente ($Q_c \leq 1.0$). Difícilmente las tipo C para algunos valores de A_{di}/A_{dai} se acercan a $Q_c = 1.0$.

Como dato importante, cabe mencionar que ninguna estructura asimétrica con disipadores produce una demanda de ductilidad en sus elementos de cortante mayor que la obtenida en los elementos de las estructuras simétricas convencionales (fig 97, y figs 99 a 101). Por ejemplo, con $D_{pre} = 1.5 D_{perm}$, Q_c tiene el valor de 4.159 en la estructura convencional, mientras que la tipo C alcanza $Q_c = 3.15$ con $D_{yd} = 0.0004 H$.

Para este periodo la respuesta más severa de los elementos en la dirección Y ocurre en las estructuras tipo C con valores máximos de $Q_c = 0.4$ (figs 102 a 104), por lo que prácticamente los elementos de cortante en la dirección Y no son afectados por la asimetría de los disipadores.

La situación descrita para los modelos con $T = 0.5 s$ es análoga a los de $T = 1.0 s$. En este último

periodo los elementos en la dirección X de todas las estructuras asimétricas tipo A y tipo B, pueden obtener demandas de ductilidad análogas a la simétrica (figs 105 a 107) dentro del intervalo de A_{diu}/A_{dii} estudiado. En cuanto al comportamiento de las estructuras tipo C, los resultados muestran que es imposible lograr un comportamiento elástico de los elementos de cortante; puede diferir completamente la tendencia de la demanda de ductilidad, incrementándose para valores mayores de A_{diu}/A_{dii} , ver fig 107. Sin embargo, todas las estructuras con disipadores, aun con asimetría, no demandan más ductilidad que la estructura convencional (fig 97).

La respuesta de los elementos perpendiculares (fig 108 a 110) sufre apenas un ligero incremento con respecto a los resultados del periodo anterior. Como se esperaba, para cualquiera de los tres valores de D_{pro} siguen produciéndose las mayores ductilidades en la estructura asimétrica tipo C con un valor máximo en todo el periodo de $Q_c = 0.6$ (fig 110).

Como se comprobará al estudiar los últimos tres periodos estructurales contemplados en este estudio, el periodo fundamental de 1.5 s marca un límite para obtener respuestas asimétricas mas o menos predecibles (figs 111 a 113). A excepción de los resultados con $D_{yd} = 0.002 H$, $D_{pro} = 1.2 D_{perm}$ y $T = 1.5$ s (fig 111), las demandas de ductilidad entre los modelos difieren proporcionalmente a su excentricidad. Debido a que sus tendencias en la respuesta se encuentran más o menos paralelas y separadas a una distancia proporcional a su excentricidad, en los últimos valores de A_{diu}/A_{dii} se encuentran las mayores diferencias en las ductilidades desarrolladas: hasta de un 50 % (teniendo un promedio del 30%). La respuesta de la estructura tipo C sigue siendo, como era de esperarse, la más desfavorable. Sin embargo, al igual que con $T = 1.0$ s ninguna demanda de la estructura asimétrica con dispositivos es superior a la simétrica convencional.

Los elementos en la dirección Y de las estructuras tipo C con el comportamiento más desfavorable apenas alcanzan a demandar $Q_c = 0.6$ (fig 114 a 116).

Cuando se analizan las demandas de ductilidad de los elementos de cortante en la dirección X de los sistemas estructurales con un periodo fundamental de 2.0 s se observa que gran parte de éstas ya no responden a un patrón proporcional a su excentricidad. Puede notarse que en aquellos casos donde la relación A_{diu}/A_{dii} no produce una reducción significativa de Q_c , por ejemplo en $D_{yd} = 0.0004 H$ en las figs 117 y 118, la asimetría no produce ductilidades que difieran de los casos simétricos. Sin embargo,

cuando los disipadores reducen significativamente la respuesta en $D_{y,d} = 0.0012$ y 0.002 H, las estructuras simétricas, tipo B y tipo C describen el mismo comportamiento observado en los periodos fundamentales anteriores, y las estructuras tipo C generan las respuestas más desfavorables a veces con una tendencia completamente distinta, como la desarrollada en $D_{y,d} = 0.002$ H en la fig 117.

Las estructuras asimétricas tipo C con $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ (fig 117) produjeron demandas de ductilidad mayores ($Q_c = 3.2$) que la simétrica convencional ($Q_c = 2.618$, fig 97). Esto se explica porque adicionalmente a la pobre participación de los disipadores para este valor de D_{pre} , el hecho de la inexistencia total del disipador izquierdo acerca el sistema estructural al periodo dominante (2.0 s) del sismo.

Los elementos perpendiculares siguen sin tener gran afectación (figs 120 a 122), aunque puede predecirse que para periodos mayores, dada la tendencia observada, alcancen a desarrollar un comportamiento inelástico.

Las ductilidades de los elementos de cortante en la dirección X para $T = 2.5$ y 3.0 s (figs 123 a 125 y 129 a 131) son muy semejantes a las obtenidas con los modelos de $T = 2.0$ s. Se aprecia que en los valores de A_{dis}/A_{disi} donde los disipadores no producen reducciones significativas de respuesta, por ejemplo en $D_{y,d} = 0.0004$ H de las figs 123 y 124, los modelos asimétricos producen respuestas del mismo orden que los simétricos. Cuando el incremento del área de los dispositivos es efectivo en reducir la respuesta de las estructuras simétricas, por ejemplo en $A_{dis}/A_{disi} = 6$ con $D_{y,d} = 0.0012$ H en la fig 124, las respuestas de las correspondientes estructuras asimétricas guardan una relación proporcional a su excentricidad, excepto para las estructuras tipo C, cuyo comportamiento difiere completamente y puede producir demandas hasta 25 % mayores a las simétricas convencionales, como ocurre en $A_{dis}/A_{disi} = 10$ con $D_{y,d} = 0.002$ H en la fig 123. En cada uno de estos dos periodos los mayores valores de Q_c , producidos precisamente por las estructuras tipo C, ocurren en $D_{pre} = 1.2 D_{perm}$ (figs 123 y 129), es decir, donde la participación de los dispositivos es irrelevante.

Las ductilidades de los elementos en la dirección Y pueden llegar a desarrollar un comportamiento inelástico en estos periodos aunque ocurren para valores de A_{dis}/A_{disi} mucho mayores que los requeridos para lograr $Q_c = 1.0$ (figs 126 a 128 y 132 a 134).

Hasta antes del periodo de los 2.0 s la respuesta de cualquier estructura con disipadores, incluyendo las asimétricas, no resultó mayor que la alternativa de la estructura convencional. En los tres primeros periodos las respuestas entre las estructuras tipo A y B no difieren en más de un 40 %, y la tipo C, a pesar de tener el comportamiento más desfavorable, no superó la respuesta convencional. Para $T = 2.0$, 2.5 y 3.0 s, las respuestas de las estructuras tipo C, pueden generar mayores demandas de ductilidad que la convencional, sin embargo esto ocurre en rangos de parámetros donde la disipación no es adecuada.

Los elementos perpendiculares prácticamente no son afectados para los rangos de A_{di}/A_{di} que producen un comportamiento elástico de los elementos de cortante.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por la configuración sencilla del modelo estructural fue posible estudiar la influencia de diversos parámetros en su respuesta sísmica. En lo particular se evaluaron dos criterios de diseño de modelos con disipadores de energía que consideraron las disposiciones establecidas en el RDF87. En la primera alternativa la respuesta sísmica de la estructura simétrica con disipadores se aproximó a la convencional. En la segunda, el estudio paramétrico mostró la posibilidad de controlar la respuesta sísmica de los modelos hasta niveles predefinidos.

Por otra parte, resultó importante estudiar la respuesta del modelo simétrico convencional, como marco de referencia, para evaluar la eficiencia de los disipadores de energía en la respuesta sísmica. Además, las características de este modelo sirvieron de base para evaluar los incrementos en los niveles de resistencia y rigidez suministrados en las estructuras con disipadores. Vale la pena recordar que inicialmente las estructuras simétricas convencionales y con disipadores de energía tuvieron el mismo periodo fundamental.

Las conclusiones que a continuación son emitidas se limitan al contexto de los sistemas utilizados, es

decir, a las características dinámicas y registros sísmicos estudiados.

5.1. ALTERNATIVA "A"

Con este primer criterio de diseño se propuso crear modelos simétricos con disipadores que generaran la misma demanda de ductilidad que en los elementos de los modelos convencionales. Para algunos casos, se obtuvieron respuestas hasta 10 % menores que en los modelos convencionales para mayores niveles de participación de los disipadores en la rigidez y resistencia del modelo. Lo que muestra aun más la bondad del uso de los dispositivos.

Ante excitaciones sísmicas, con los niveles de asimetría creados por los disipadores de energía en las estructuras, se provocan en los elementos de los modelos demandas de ductilidad que son proporcionales a la excentricidad. Las mayores demandas de ductilidad ocurren generalmente en el periodo de 0.5 s, y las menores en los periodos de 1.0 y 1.5 s. Por lo tanto, la asimetría causada por la distribución de los disipadores resulta más sensible en los modelos con periodos cercanos a los 0.5 s.

Si utilizamos la respuesta de la máxima demanda de ductilidad para evaluar el comportamiento, es aparente en algunos niveles de excentricidad una menor respuesta sísmica en modelos asimétricos con respecto a los simétricos. Sin embargo, un análisis más detallado del comportamiento sísmico de estos mismos modelos considerando otros aspectos como la historia de fluencia o de desplazamiento de cada uno de los elementos estructurales, puede mostrarnos que el comportamiento más desfavorable se encuentra en las estructuras asimétricas. En nuestra evaluación, cuando esta situación se presentó, la mayor parte de las respuestas analizadas mostró que la asimetría era desfavorable, por lo tanto se concluyó que esta característica era más crítica que la simetría.

En las estructuras asimétricas analizadas los elementos estructurales pueden desarrollar ductilidades hasta de 2.0 veces la de la estructura convencional con excentricidades de rigidez relativamente pequeñas ($e_y/a = 0.1$). Se puede afirmar que ante una excitación sísmica, una estructura asimétrica diseñada originalmente con este criterio basado en la reducción de rigidez y resistencia de los elementos estructurales como consecuencia de la reducción de la respuesta por el funcionamiento de los disipadores, puede desarrollar severas concentraciones de ductilidad cuando no se consideran las posibles excentricidades causadas por los disipadores de energía.

En cuanto al uso de distintos registros, aparentemente por las características de los registros sísmicos la menor respuesta en los modelos con distribución asimétrica de disipadores se desarrolló con el uso del registro de CU, y en orden ascendente, con el de VIV y el de SCT.

5.2. ALTERNATIVA "B"

Con este criterio de diseño, al comparar las respuestas de los modelos simétricos en todos los periodos estudiados, se observó que con los niveles de participación de los disipadores de energía en los modelos se produjeron demandas de ductilidad de los elementos de cortante menores que las de una estructuración convencional. Es decir, por la transferencia de la energía histerética a los disipadores de energía, la colocación de estos dispositivos resulta más conveniente que redimensionar los elementos estructurales. Las mayores diferencias de ductilidad obtenidas entre las dos estructuraciones se observaron en los periodos de 0.5, 1.0 y 1.5 s; y las menores en los periodos de 2.0, 2.5 y 3.0 s.

Si se utilizan valores adecuados del desplazamiento de fluencia y del área de los disipadores de energía se puede lograr un comportamiento elástico de los elementos estructurales. De acuerdo con el criterio de diseño, esto involucra incrementos de rigidez y resistencia en la estructura. Por las características de la excitación usada, estos incrementos variaron de un periodo a otro, y se observó que se requiere mayor resistencia y rigidez entre mayor sea su periodo fundamental.

Para obtener una respuesta elástica en $T = 0.5$ s, la resistencia del modelo con disipadores de energía debe ser 40 % mayor que la convencional y en $T = 3.0$ s, 90 %. Para el mismo nivel de respuesta en $T = 2.0$ s, 76%. En los otros periodos, se requieren valores intermedios. Como consecuencia, no siempre es posible otorgar la resistencia necesaria en todos los desplazamientos de prediseño y en el rango estudiado de incrementos de área de los disipadores. Los desplazamientos de prediseño en que siempre se logra son: 1.5 y 2.0 D_{perm} , aunque existe una diferencia del 5 % entre la resistencia suministrada por estos valores. Lo mismo ocurre con los desplazamientos de fluencia de los disipadores 0.0012 H y 0.002 H. Para estos dos valores se logra $Q_c = 1.0$. Con base en los resultados obtenidos, con $D_{yd} = 0.0012$ H se garantiza la menor resistencia otorgada. Para los casos descritos en este párrafo, los disipadores demandan una ductilidad adecuada ($1 < Q_d < 10$).

Considerando lo anterior y tratando de generalizar, para reducir la respuesta sísmica en los modelos

estructurales y lograr un comportamiento elástico podemos sugerir las siguientes tres recomendaciones: 1) el disipador debe tener un desplazamiento de fluencia de 0.0012 H; 2) el sistema estructural sin disipadores ante cargas laterales de diseño debe tener al menos un desplazamiento lateral de 1.5 veces el permisible; y 3) aumentar el área de los disipadores hasta incrementar la resistencia 1.4 veces la del modelo original para $T = 0.5$ s, y 1.9 veces en el periodo de 3.0s.

En los periodos de 0.5 y 1.0 s con el disipador de $D_{yd} = 0.0004$ H se obtuvieron respuestas elásticas en el intervalo de A_{dis}/A_{disi} considerado. Aparentemente, un incremento en el rango de estudio de área de disipadores estudiada para periodos mayores, favorecería la elección de 0.0004 H como desplazamiento de fluencia.

Por lo que respecta a los modelos asimétricos con suficientes disipadores de energía para lograr una respuesta elástica, se encontró que la respuesta sísmica es menor que la de una estructura convencional. Esto siempre y cuando se tengan excentricidades en rigidez y resistencia provocada por los disipadores. Por ejemplo, en modelos con decrementos del 50 % de rigidez y resistencia del disipador su respuesta asimétrica está muy cercana a la simétrica y no supera ductilidades de 1.8. Sin embargo, la asimetría que pudiera existir en un modelo simétrico cuando no se logra la respuesta elástica con los disipadores de energía puede producir demandas de ductilidad mayores que la simétrica convencional. Por lo tanto, para seguir teniendo un comportamiento menor que el convencional se recomienda que las estructuras en cualquier periodo, sobretudo en los periodos mayores a 2.0 s, se asegure un diseño que produzca comportamiento elástico ante la excitación sísmica.

Así, con este criterio de diseño los elementos estructurales perpendiculares al sentido de la excitación y para diferentes excentricidades, prácticamente no son afectados. Su respuesta más desfavorable se encuentra en periodos mayores a 2.5 s en aquellos modelos estructurales con una cantidad de disipadores de energía mayor a la suficiente para el comportamiento elástico.

Finalmente, considerando las dos alternativas de diseño. Con el primer criterio de diseño se muestra que las excentricidades de rigidez y/o resistencia causadas por los disipadores, pueden provocar que sus elementos desarrollen grandes concentraciones de ductilidad ante un evento sísmico. Con el segundo, se puede lograr que aún en una estructura asimétrica se desarrollen ductilidades menores que las de una estructura simétrica convencional

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de Roberto Gómez Martínez. Agradezco sinceramente sus sugerencias y consejos como director de tesis, colega y amigo.

Las oportunas ideas de Roberto Sánchez fueron fundamentales en este trabajo. De igual forma, José Alberto Escobar me brindó apoyo incondicional.

Agradezco las ideas, el apoyo y la amistad de mis compañeros y amigos del Instituto de Ingeniería y de la Fundación Barros Sierra.

También agradezco al Instituto de Ingeniería la oportunidad y el apoyo brindado para mi desarrollo profesional.

Los recursos económicos fueron brindados por el proyecto ESP302793 de la Dirección General de Apoyo al Personal Académico de la UNAM.

REFERENCIAS

- [1] Villaverde, R., "Are Vibration Control Techniques a Competitive Alternative for the Seismic Design of Structures?", *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, pp. 870-878, Puerto Vallarta, México, octubre, 1993

- [2] Buckle, I. G. and Mayes, R. L., "Seismic Isolation -History, and Performance- A World View", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 2, pp. 161-201, 1990

- [3] Pall, A. S. and Marsh, C., "Response of Friction Damped Braced Frames", *Journal of the Structural Division, ASCE* 108, pp. 1313-1323, 1982

- [4] Filiatrault, A. and Cherry, S., "Seismic Test of Friction Damped Steel Frames ", *Proceedings of the 3rd Conference on the Dynamic Response of Structures, Engineering Mechanics Division of the ASCE*, Los Angeles, Calif., 1986

- [5] Pekaul, O. A. and Guimond, R., "Controlling Seismic Response of Eccentric Structures By

- Friction Dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 20, pp. 505-521, 1991
- [6] Robinson, W. H. and Greenbank, L. R., "An Extrusion Energy Absorber Suitable for the Protection of Structures During an Earthquake", *Int. Jnl. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 4, 1976
- [7] Aiken, I. D., Kelly, J. M. and Mahmoodi, P., "The Application of Viscoelastic Dampers to Seismically Resistant Structures", *Proc. of 4th National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, Calif.*, Vol. 3, pp. 459-468
- [8] Alonso, L. J., "Mechanical Characteristic of X-Plate Energy Dissipators", CE 299 Report, University of California at Berkeley, May 1989
- [9] Whittaker, A. S., Bertero, V.V., Alonso, L. J. and Thompson, C. L., "Passive Energy Dissipation Using Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements", *Proceedings of the International Meeting on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, Assisi, Italy, June 1989*
- [10] Scholl, R. E., "Site Zonation Effects on the Performance of Structures with Added Damping and Stiffness Elements", *Fourth International Conference on Seismic Zonation Stanford, California, August 1991*
- [11] Aguirre, M. y Sánchez, R., "Pruebas de Elementos Disipadores de Energía Sísmica", *Revista Construcción y Tecnología, IMCYC*, Vol. I, No. 10, pag. 7-18, 1989
- [12] Aguirre, M. y Sánchez, R., "Disipadores de Energía Sísmica", *Revista Construcción y Tecnología, IMCYC*, Vol. III, No. 27, pag. 15-19, 1990
- [13] Sánchez, R. "Alternativas para Instalar Dispositivos Disipadores de Energía en Edificios", *Informe del Instituto de Ingeniería para la DGAPA, UNAM, septiembre, 1992*
- [14] Soong, T. T., Masri, S. F. and Housner, H. M., "An Overview of Active Structural Control

under Seismic Loads", *Earthquake Spectra*, Vol. 7, No. 3, pp. 483-505, 1991

- [15] Hanson, R. D., Aiken, I. D., Nims, D. K., Richter, P. J. and Bachman, R. E., "State-of-the-Art and State-of-the-Practice in Seismic Energy Dissipation", *Proceeding of ATC-17-I Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, San Francisco, California, pp. 449-471, March 1993
- [16] Urrego, O. E., Ruiz, S. E. y Silva, F. L., "Influencia de la Distribución de Disipadores de Energía en la Respuesta Sísmica de un Edificio", *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, pp. 849-855, Puerto Vallarta, México, octubre, 1993
- [17] Xia, B. and Hanson, R. D., "Influence of ADAS Elements Parameters on Buildings Seismic Response", *Journal of Structural Engineering*; Vol. 118, No. 29, pp. 1903-1918, July 1992
- [18] Ramírez, O., "Respuesta Experimental Inelástica de una Estructura Metálica Provista de Elementos Disipadores de Energía", Trabajo final presentado a la DEPEFI, UNAM, como requisito para obtener el grado de Maestro en Ingeniería (Estructuras), febrero, 1992
- [19] Escobar, J. A., "Comportamiento de Estructuras Asimétricas Inelásticas con parámetros inciertos", Tesis doctoral en proceso, DEPEFI, UNAM, 1994
- [20] Esteva, L., "Earthquake Engineering research and Practice in Mexico after the 1985 earthquakes", *Bulletin of New Zealand Nat. Society for Earthquake Engrg.*, 20(3), pp. 159-200, 1987
- [21] Kan, C. L. and Chopra, A. K., "Linear and Nonlinear Earthquake Response of Simple Torsionally Couple Systems", Report No. UCB/EERC-79/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, February, 1976
- [22] Kan, C. L. and Chopra, A. K., "Torsional Coupling and Earthquake Response of Simple Elastic and Inelastic Systems", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 107, pp. 1569-1588, August, 1981

- [23] Gómez, R., Ayala, G. y Jaramillo, J. D., "Respuesta Sísmica de Edificios Asimétricos", Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1987.
- [24] Dany, J., "Comentarios al Inciso 8.6 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", Ingeniería Sísmica, No. 33, pp. 66-99, agosto de 1988
- [25] Rakesh, K. G. and Chopra, A. K., "Inelastic Seismic Response of One-Story, Asymmetric-Plan Systems: Effects of Stiffness and Strength Distribution", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, pp. 949-979, 1990
- [26] Escobar, J. A., Ayala, G. y Gómez, R., "Respuesta no Lineal de Estructuras con Parámetros Inciertos", Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Vol. II, E105-E114, Acapulco, México, 1989
- [27] Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Diario Oficial, 3 de julio de 1987, México, D.F.
- [28] Arias, A., "A Measure of Earthquake Intensity", Seismic Design for Nuclear Power Plants, Robert J. Hansen, editor, England, 1971, pp. 438-483
- [29] Guendelman-Israel, R. and Powell, G. H., "DRAIN-TABS: A Computer Program of Inelastic Earthquake Response of Three Dimensional Buildings", Report No. UCB/EERC-77/08, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1977

TABLAS Y FIGURAS

Adis/Adisi	ΔKt (%)		
	Dpre= 1.2Dperm	Dpre= 1.5Dperm	Dpre= 2.0Dperm
1	20	50	100
2	40	100	200
4	80	200	400
6	120	300	600
8	160	400	800
10	200	500	1000

Tabla 1. Incremento de rigidez para cada valor de Adis/Adisi

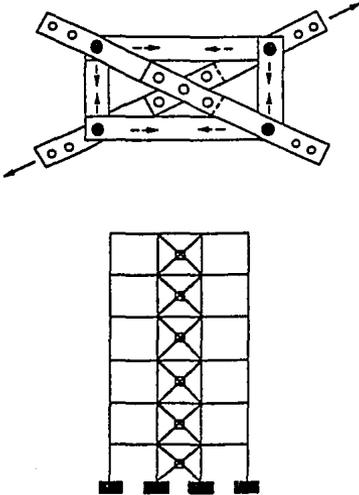


Fig 3. Amortiguadores de fricción

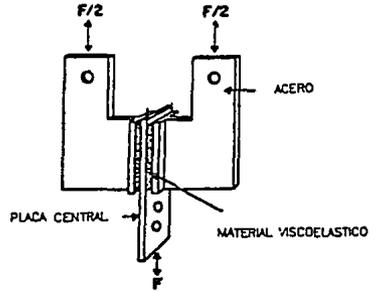


Fig 4. Disipador viscoelástico.

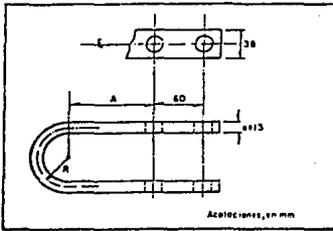


Fig 1 Elemento "U"

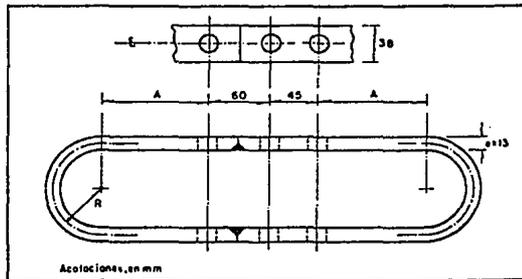


Fig 2 Elemento óvalo

Fig 5. Elementos disipadores desarrollados en el IUNAM.

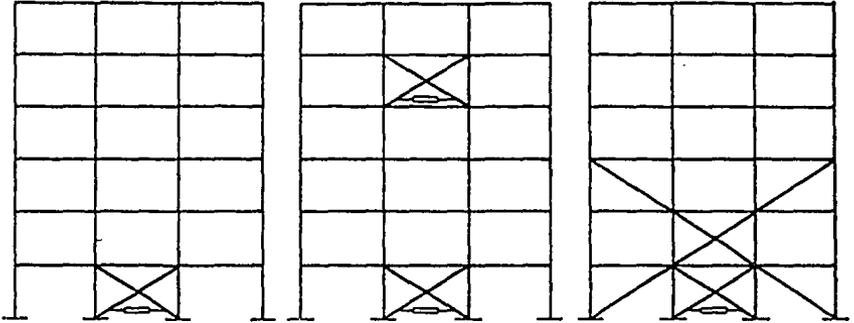


Fig 6. Tendones activos.

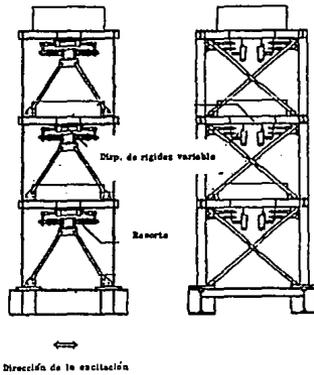
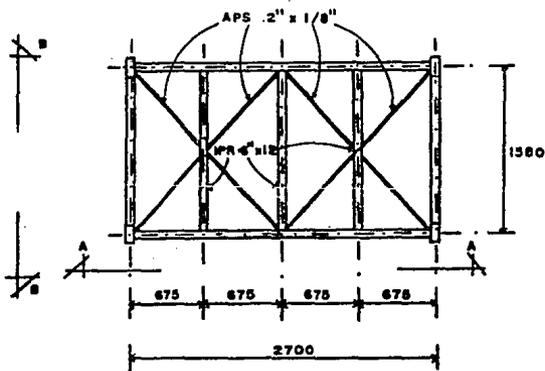
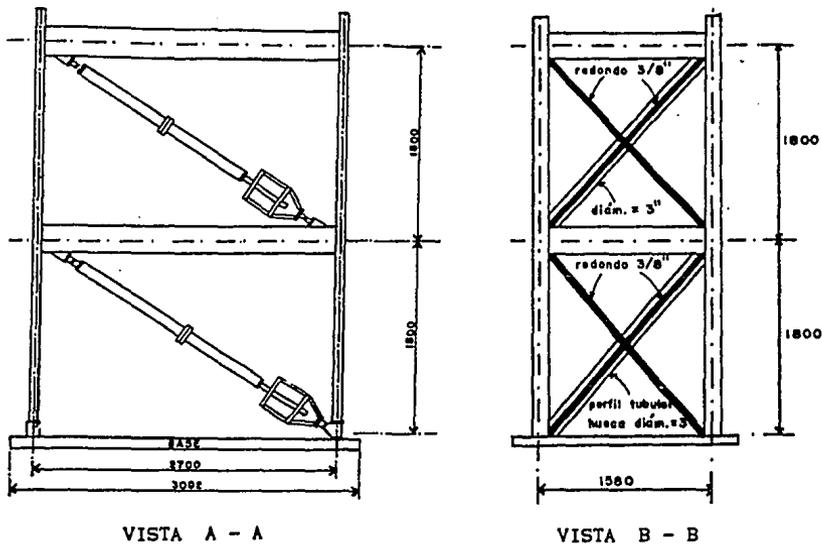


Fig 7. Sistema activo de rigidez variable.



Nota: distancias en mm

Fig 8. Prototipo con disipadores desarrollados en el IUNAM

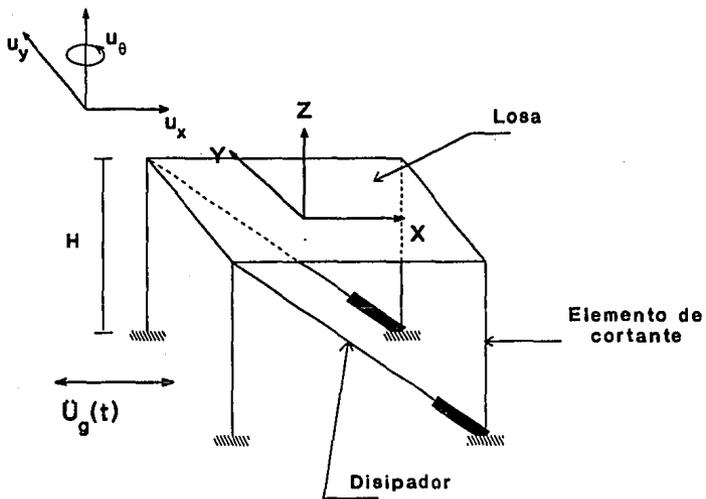


Fig 9. Modelo estructural.

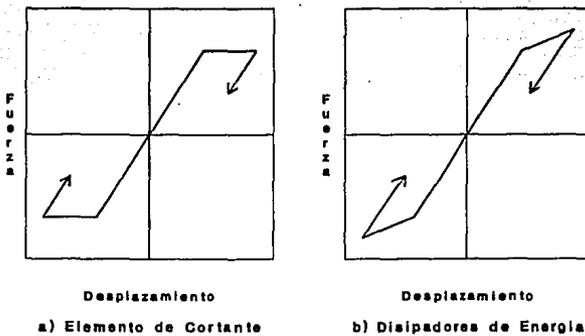
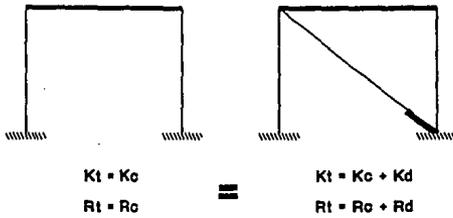
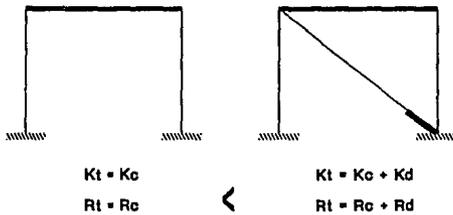


Fig 10. Modelos de la relación carga-deformación.



a) alternativa "A"



b) alternativa "B"

Fig 11. Criterios de diseño.

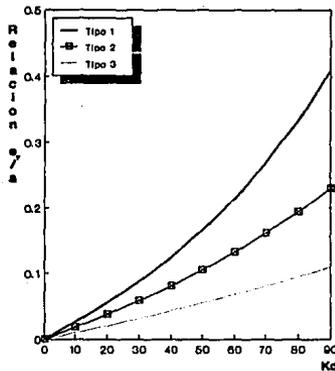


Fig 12. Variación de la excentricidad en función de Kd.

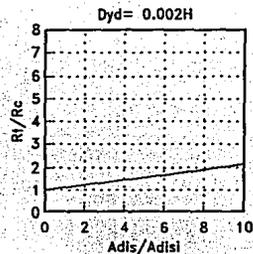
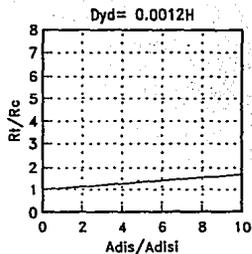
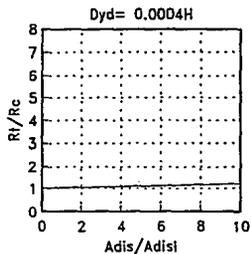


Fig 13. Incremento de resistencia del modelo, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

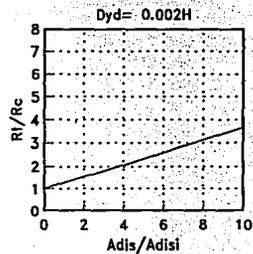
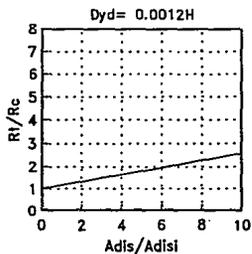
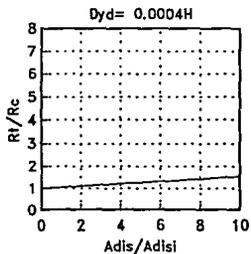


Fig 14. Incremento de resistencia del modelo, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

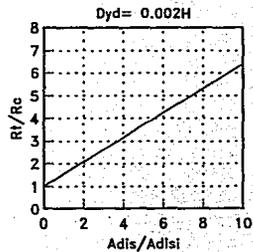
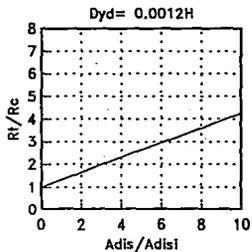
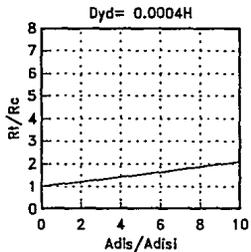


Fig 15. Incremento de resistencia del modelo, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.

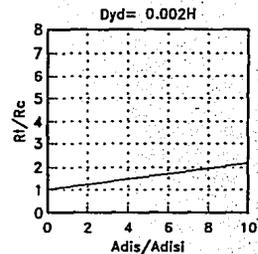
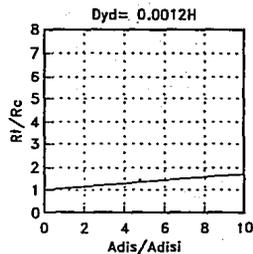
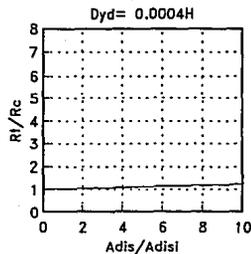


Fig 16. Incremento de resistencia del modelo, $T=1.0$ a 3.0 s, $Q=3.0$, $Dpre=1.2Dperm$, registro SCT.

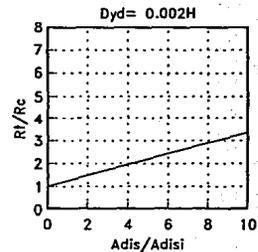
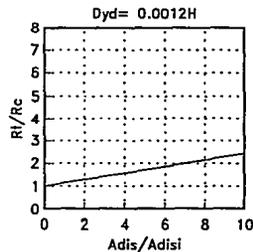
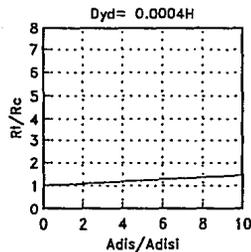


Fig 17. Incremento de resistencia del modelo, $T=1.0$ a 3.0 s, $Q=3.0$, $Dpre=1.5Dperm$, registro SCT.

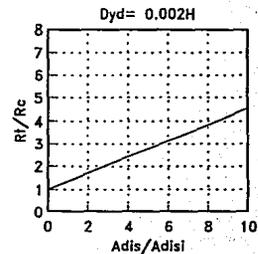
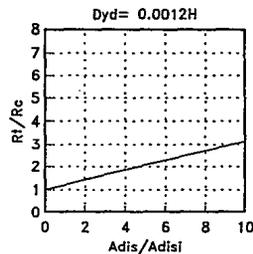
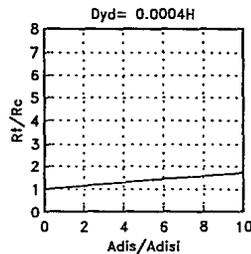


Fig 18. Incremento de resistencia del modelo, $T=1.0$ a 3.0 s, $Q=3.0$, $Dpre=2.0Dperm$, registro SCT.

S
i
m
é
t
r
i
c
a

Consideremos : T

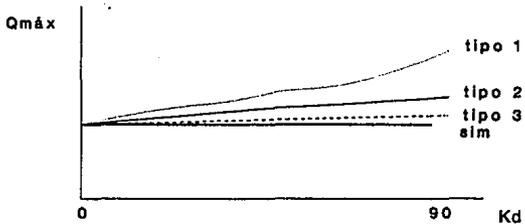
$$KT = Kc + Kd$$

$$RT = Rc + Rd \text{ (RDF)}$$

constantes

Est. simétricas podemos variar (%):

Kc, Rc	Kd, Rd
100	0
90	10
80	20
⋮	⋮
10	90

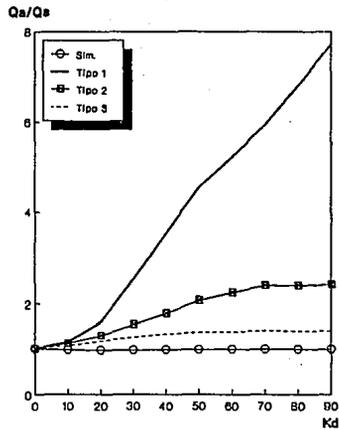


A
s
i
m
é
t
r
i
c
a

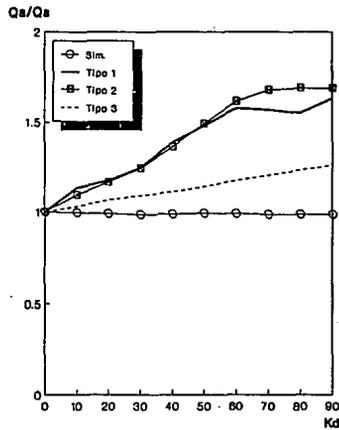
Factores de $Kd1$:

- * 0.0 0.3 0.6
- tipo 1, tipo 2, tipo 3

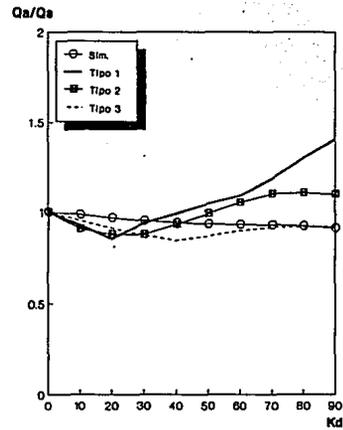
Fig 19. Forma general de la presentación de los resultados.



(a) T=0.5s

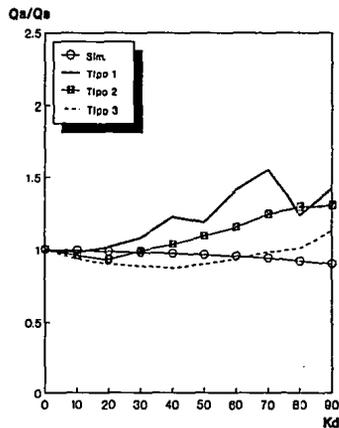


(b) T=1.0s

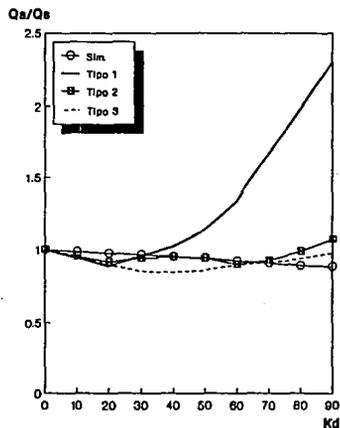


(c) T=1.5s

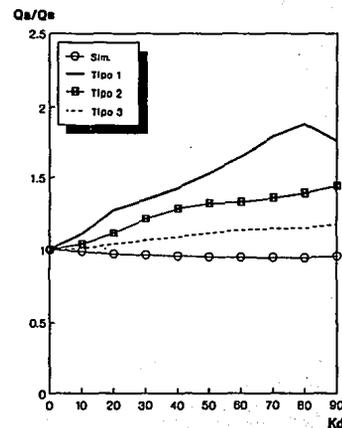
Fig 20. Demanda de ductilidad máxima, Q=3.0, registro SCT.



(a) T=0.5s

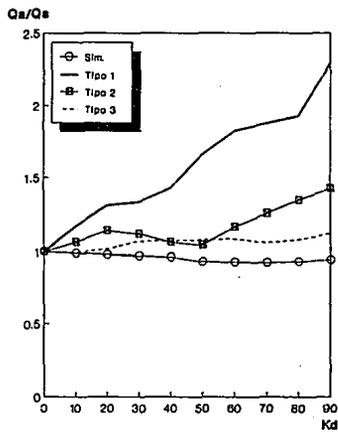


(b) T=1.0s

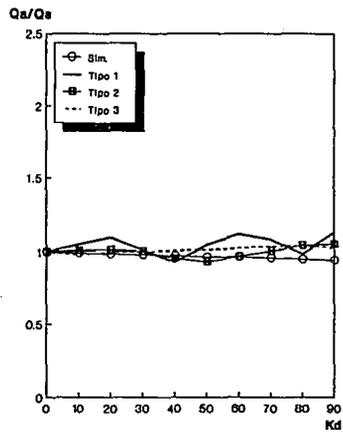


(c) T=1.5s

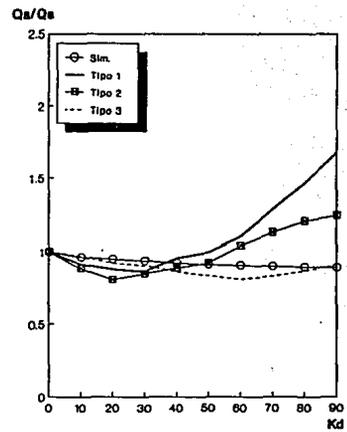
Fig 21. Demanda de ductilidad máxima, Q=3.0, registro VIV



(a) T=0.5s



(b) T=1.0s



(c) T=1.5s

Fig 22. Demanda de ductilidad máxima, Q=3.0, registro CU

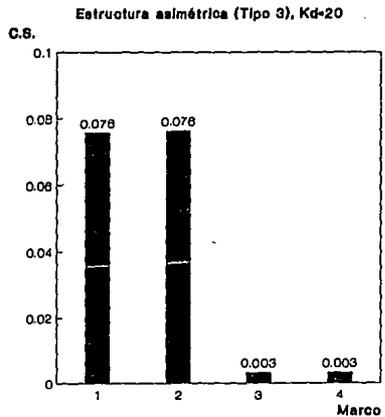
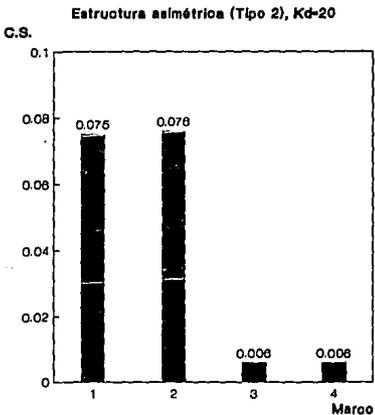
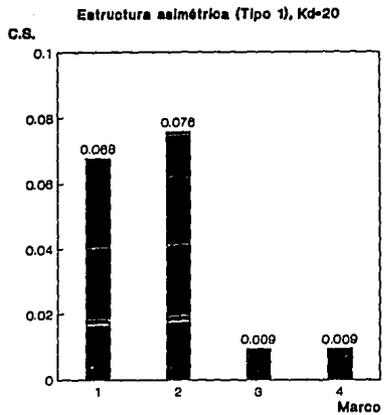
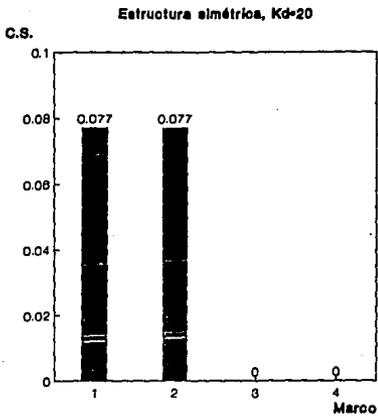


Fig 23. Coeficiente sísmico, Kd=20, Q=3.0, registro SCT

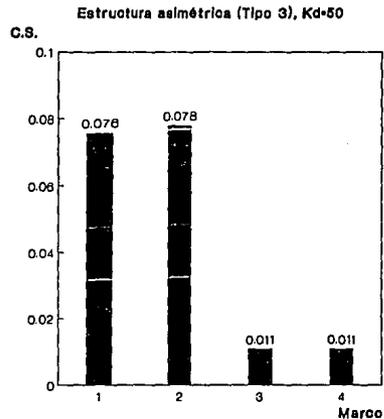
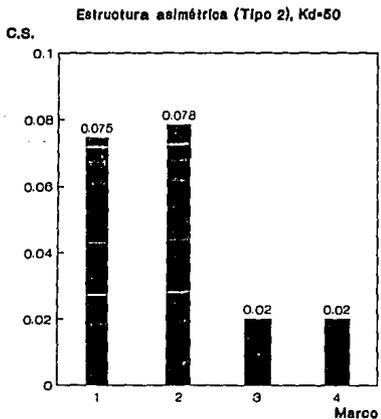
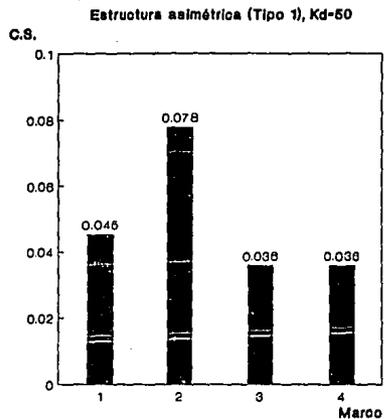
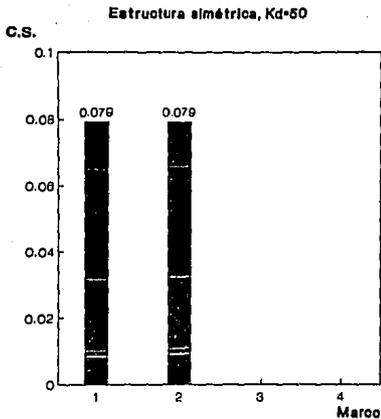


Fig 24. Coeficiente sísmico, Kd=50, Q=3.0, registro SCT.

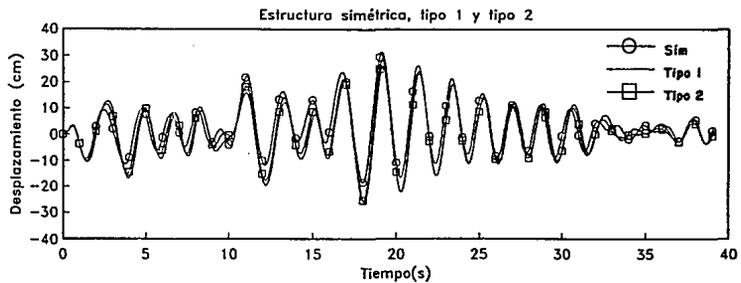


Fig 25. Historia del desplazamiento del centro de masa, $K_d=20$, registro SCT.

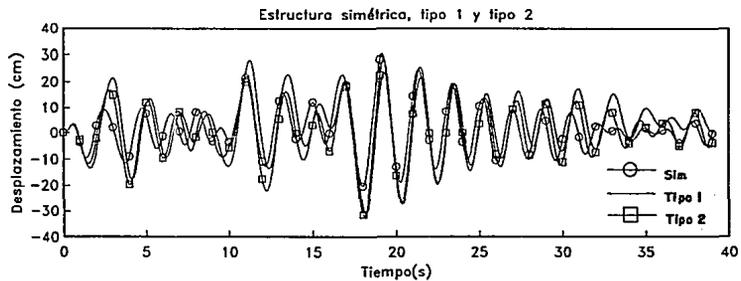


Fig 26. Historia del desplazamiento del centro de masa, $K_d=50$, registro SCT.

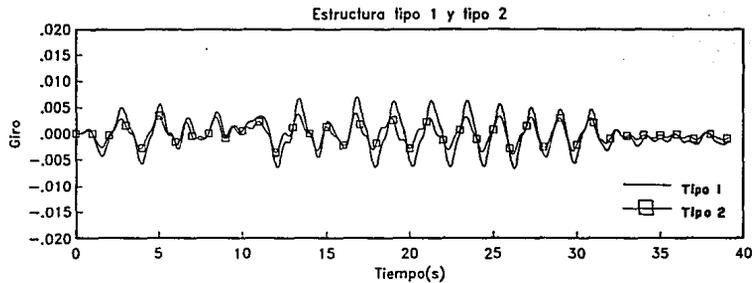


Fig 27. Historia del giro del centro de masa, $K_d=20$, registro SCT.

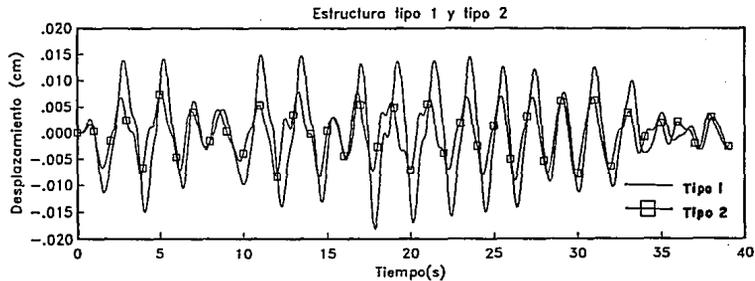


Fig 28. Historia del giro del centro de masa, $K_d=50$, registro SCT.

Est. tipo 1

Est. tipo 2

Estado inicial

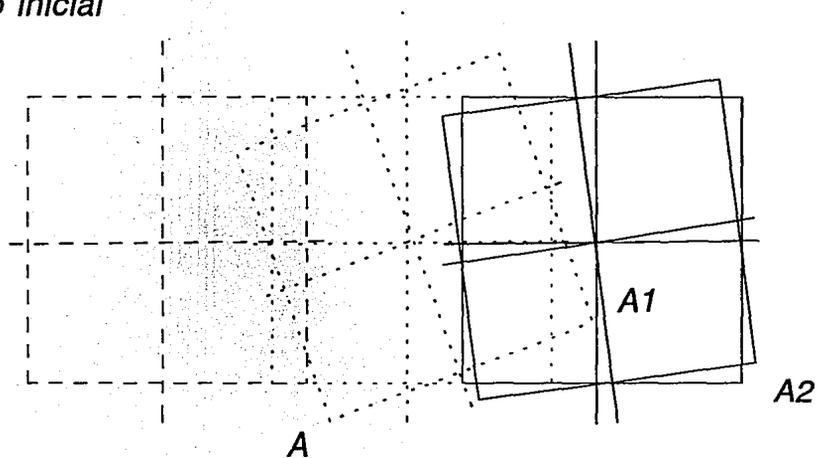
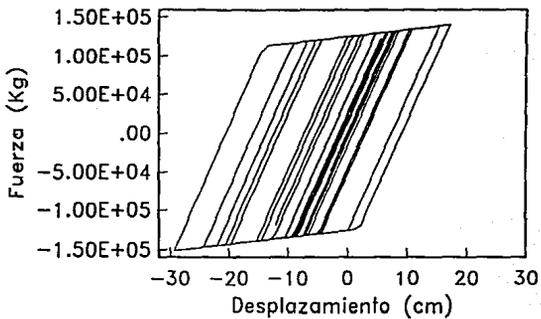
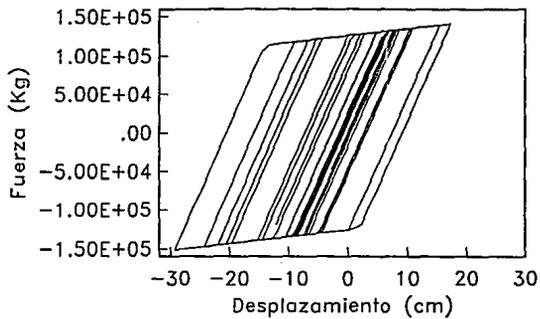
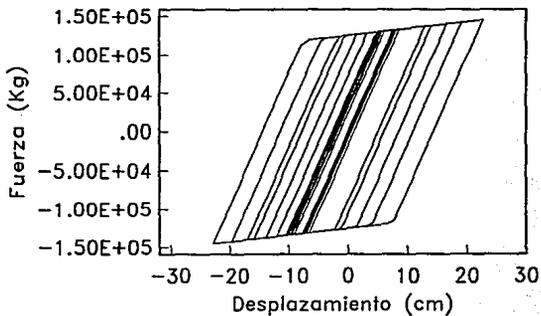
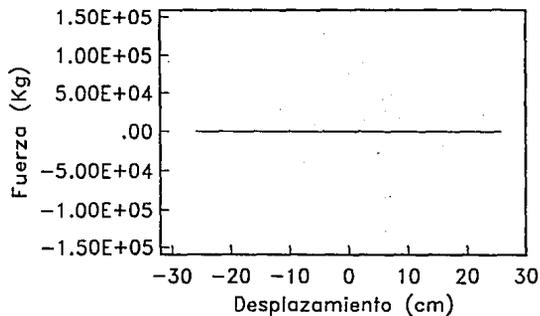


Fig 29. Respuesta de estructuras asimétricas, $K_d = 20$.

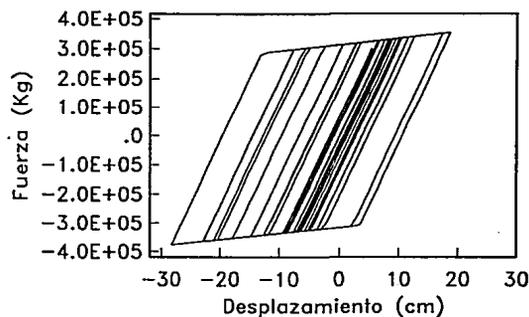
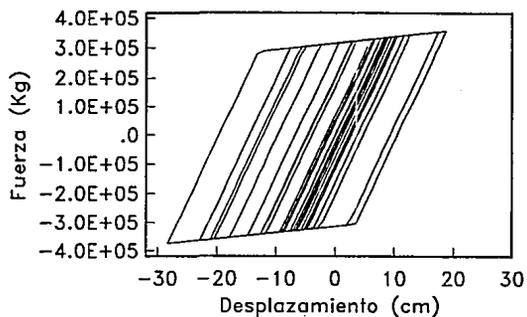


a) Estructura simétrica

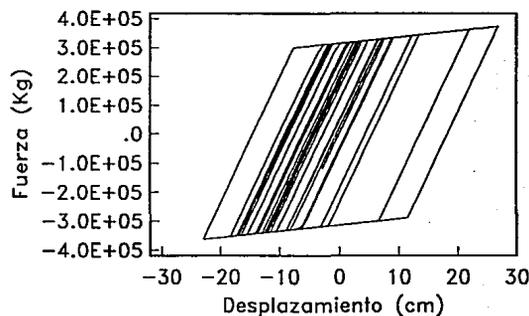
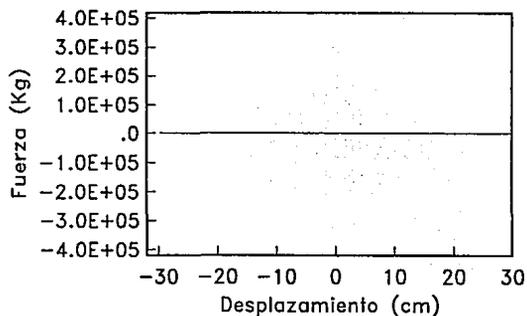


b) Estructura asimétrica, tipo 1

Fig 30. Diagrama de histéresis de los elementos disipadores, $K_d=20$, $Q=3.0$, registro SCT



a) Estructura simétrica



b) Estructura asimétrica, tipo 1

Fig 31. Diagrama de histéresis de los elementos disipadores, $K_d=50$, $Q=3.0$, registro SCT.

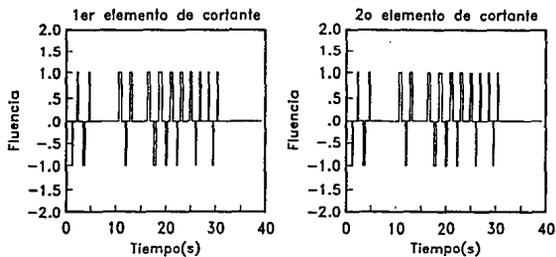


Fig 32. Historia de fluencia de los elementos de cortante, estructura simétrica, $K_d=20$, $Q=3.0$, registro SCT

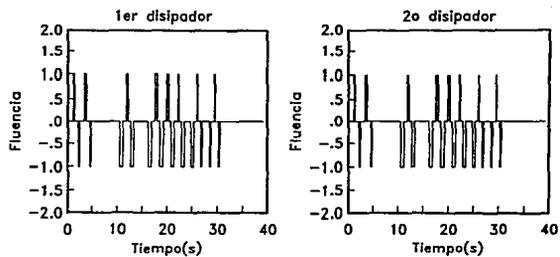


Fig 33. Historia de fluencia de los elementos disipadores, estructura simétrica, $K_d=20$, $Q=3.0$, registro SCT

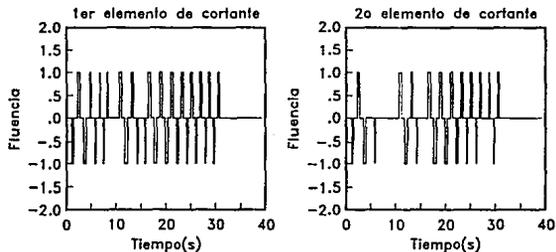


Fig 34. Historia de fluencia de los elementos de cortante, estructura asimétrica, $K_d=20$, $Q=3.0$, registro SCT

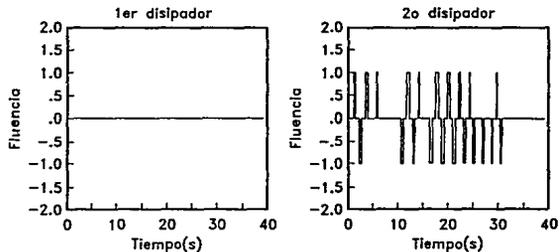


Fig 35. Historia de fluencia de los elementos disipadores, estructura asimétrica, $K_d=20$, $Q=3.0$, registro SCT

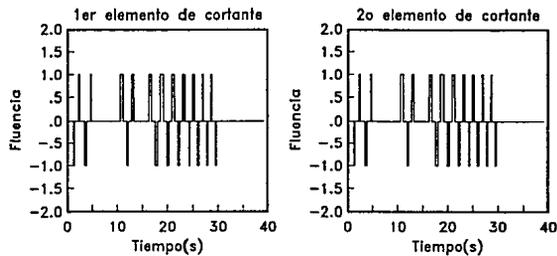


Fig 36. Historia de fluencia de los elementos de cortante,
estructura simétrica, $K_d=50$, $Q=3.0$, registro SCT

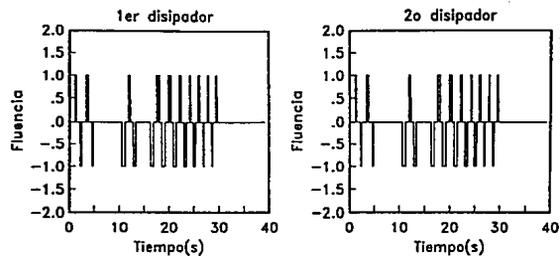


Fig 37. Historia de fluencia de los elementos disipadores,
estructura simétrica, $K_d=50$, $Q=3.0$, registro SCT

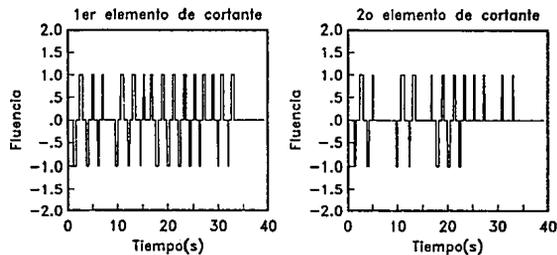


Fig 38. Historia de fluencia de los elementos de cortante,
estructura asimétrica, $K_d=50$, $Q=3.0$, registro SCT

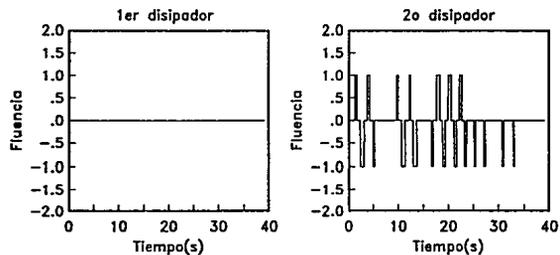
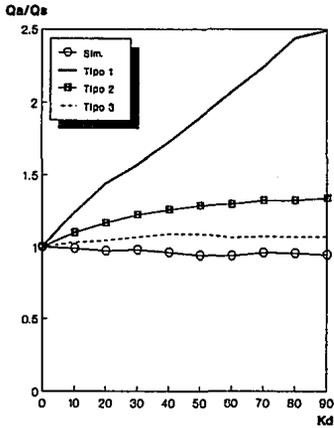
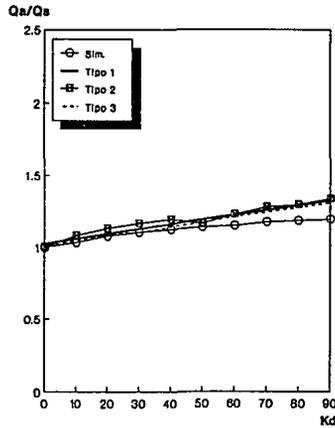


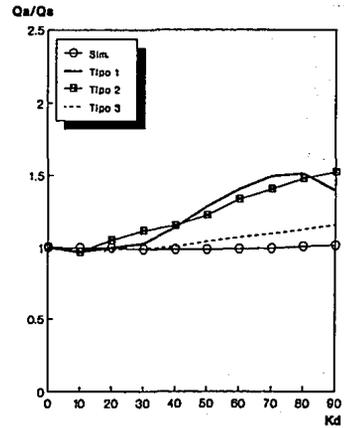
Fig 39. Historia de fluencia de los elementos disipadores,
estructura asimétrica, $K_d=50$, $Q=3.0$, registro SCT



(a) T=0.5s

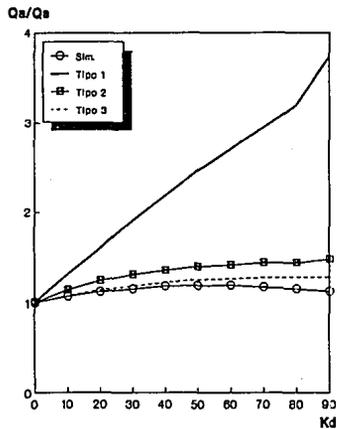


(b) T=1.0s

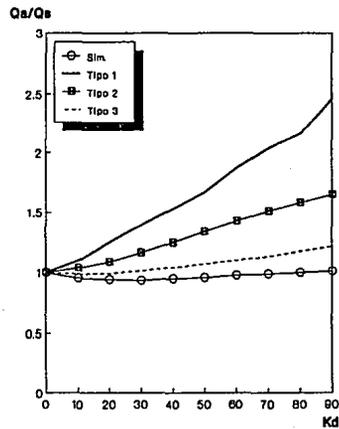


(c) T=1.5s

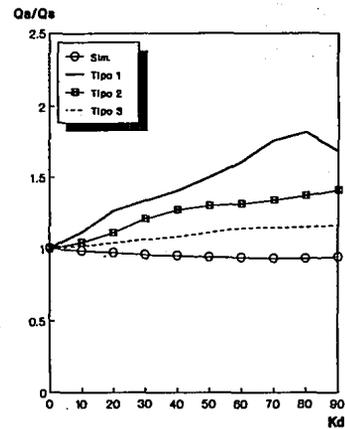
Fig 40. Demanda de ductilidad máxima, Q=4.0, registro SCT.



(a) T=0.5s

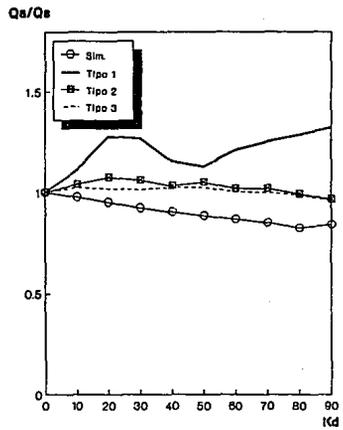


(b) T=1.0s

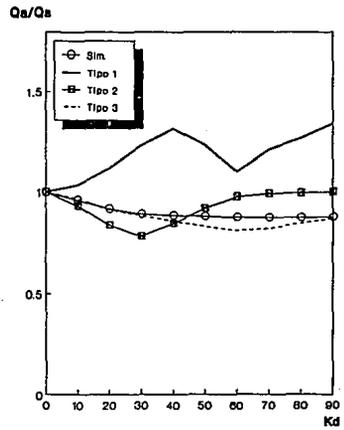


(c) T=1.5s

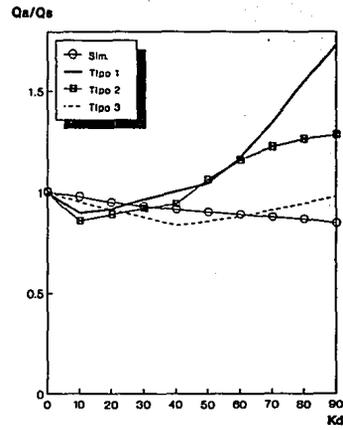
Fig 41. Demanda de ductilidad máxima, Q=4.0, registro VIV.



(a) $T=0.5s$



(b) $T=1.0s$



(c) $T=1.5s$

Fig 42. Demanda de ductilidad máxima, $Q=4.0$, registro CU.

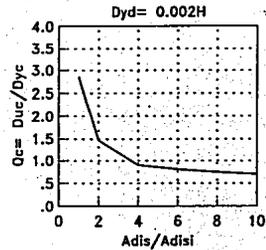
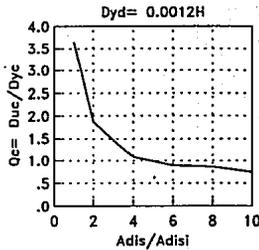
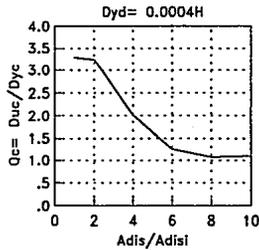


Fig 43. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 1.20perm, registro SCT

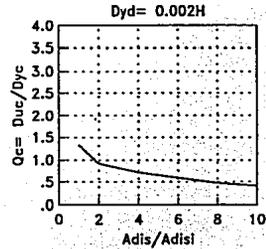
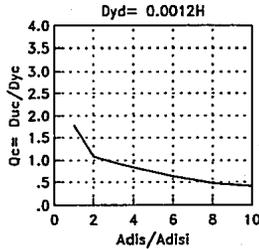
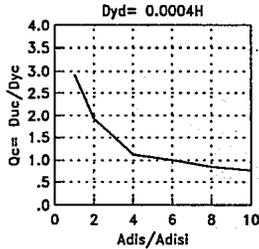


Fig 44. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 1.50perm, registro SCT

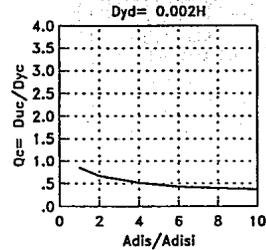
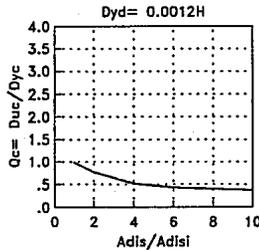
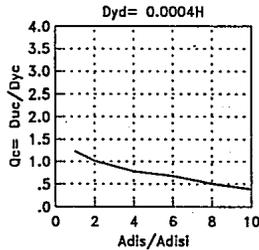


Fig 45. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 2.00perm, registro SCT

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

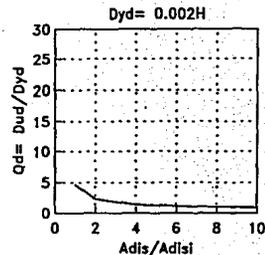
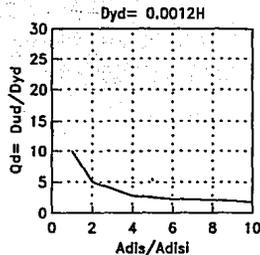
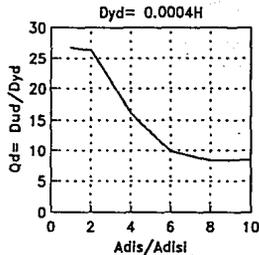


Fig 46. Ductilidad máxima de los disipadores, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 1.20perm, registro SCT

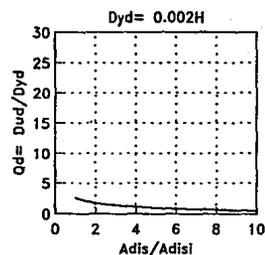
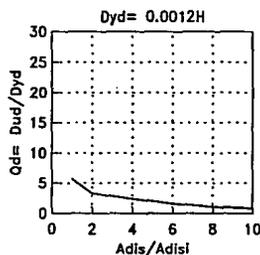
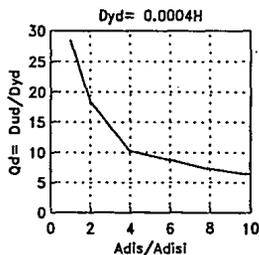


Fig 47. Ductilidad máxima de los disipadores, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 1.50perm, registro SCT

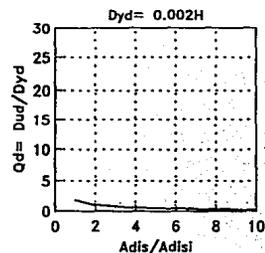
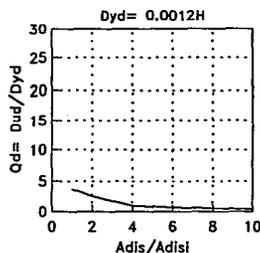
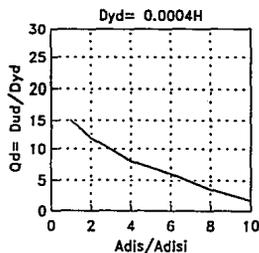
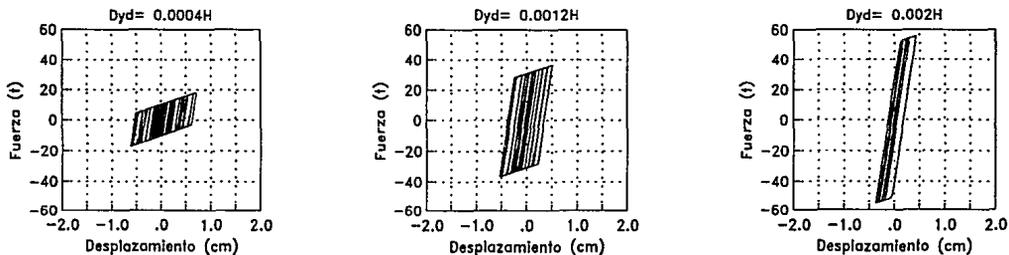
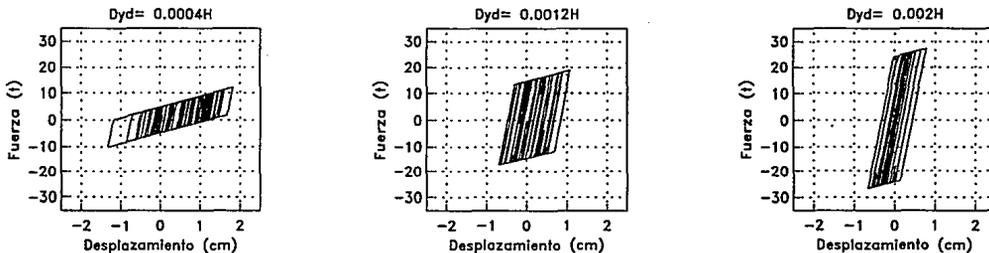
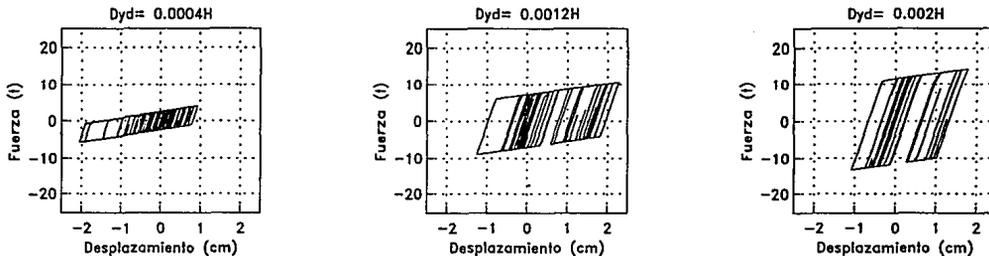


Fig 48. Ductilidad máxima de los disipadores, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 2.00perm, registro SCT



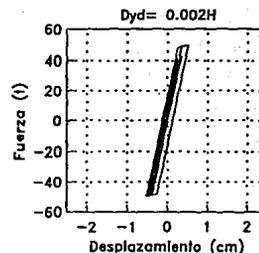
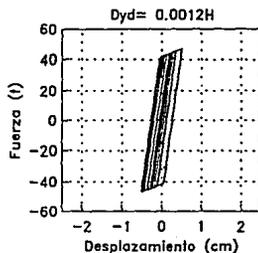
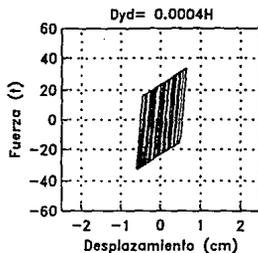


Fig 52. Curvas carga-desplazamiento de los disipadores, $T=0.5s$, $Q=3.0$, $Dpre= 1.2Dperm$, registro SCT, caso I

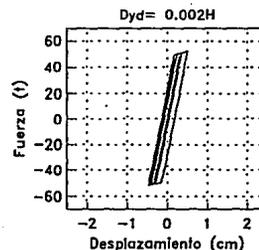
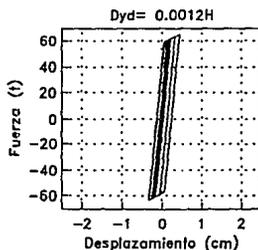
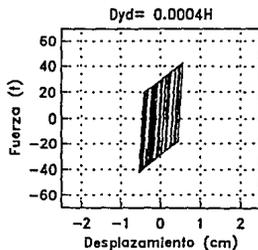


Fig 53. Curvas carga-desplazamiento de los disipadores, $T=0.5s$, $Q=3.0$, $Dpre= 1.5Dperm$, registro SCT, caso I

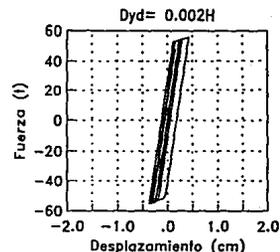
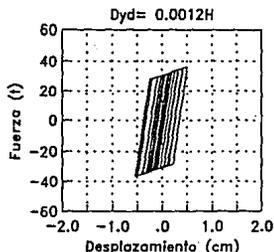
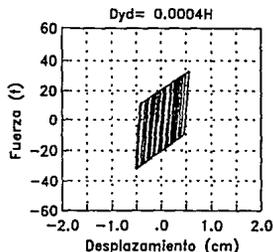


Fig 54. Curvas carga-desplazamiento de los disipadores, $T=0.5s$, $Q=3.0$, $Dpre= 2.0Dperm$, registro SCT, caso I

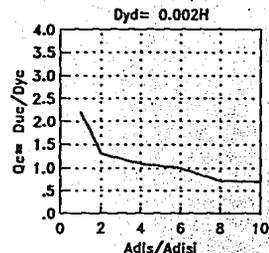
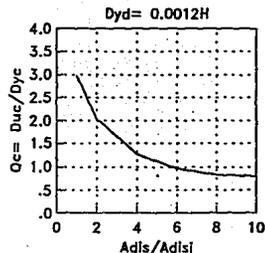
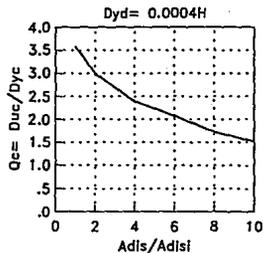


Fig 55. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.0s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

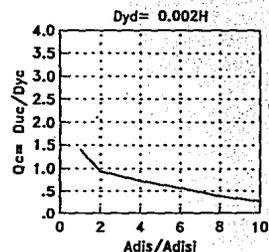
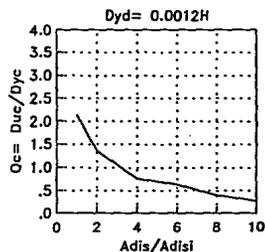
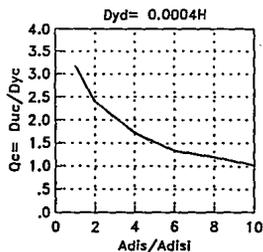


Fig 56. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.0s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

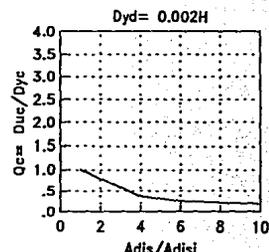
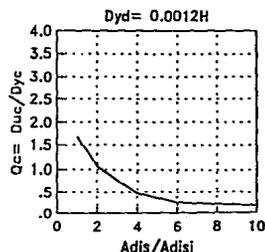
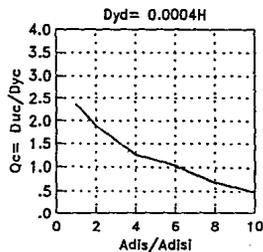


Fig 57. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.0s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.

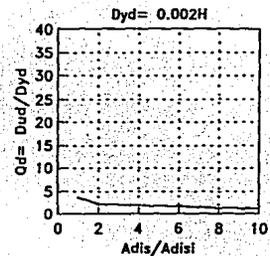
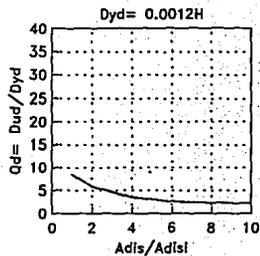
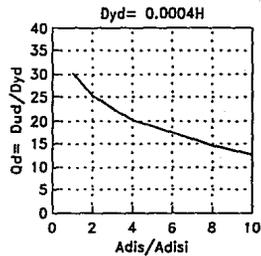


Fig 58. Ductilidad máxima de los disipadores, T=1.0s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

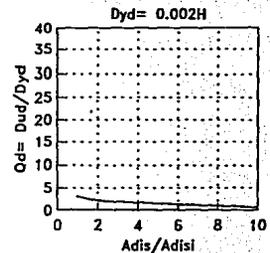
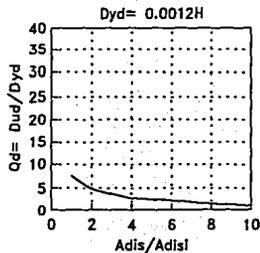
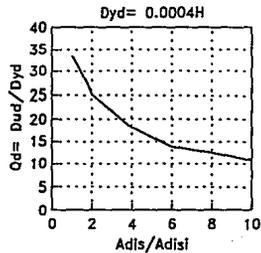


Fig 59. Ductilidad máxima de los disipadores, T=1.0s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

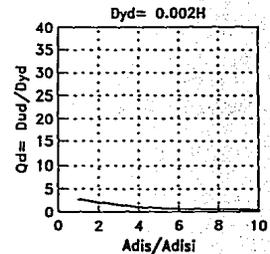
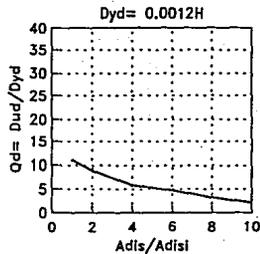
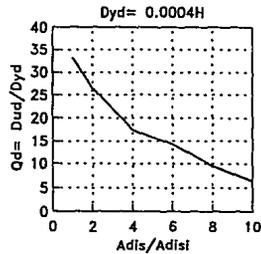
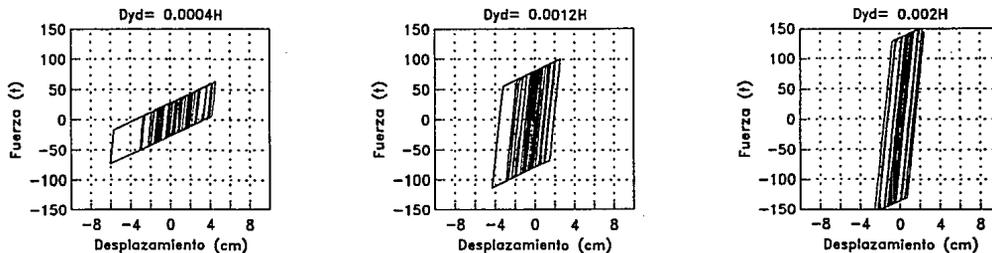
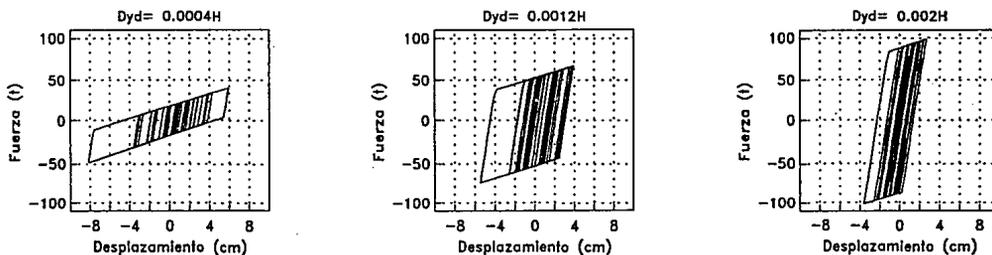
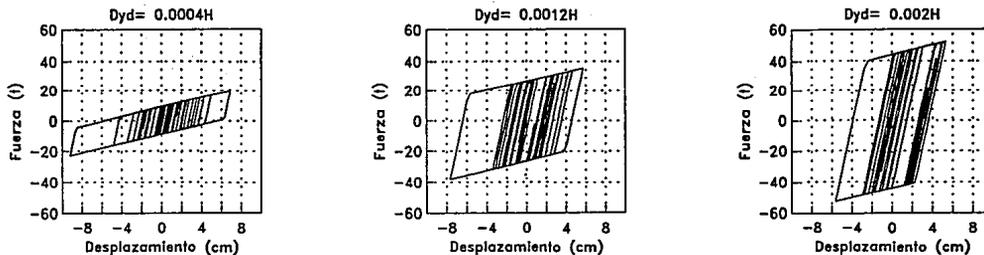
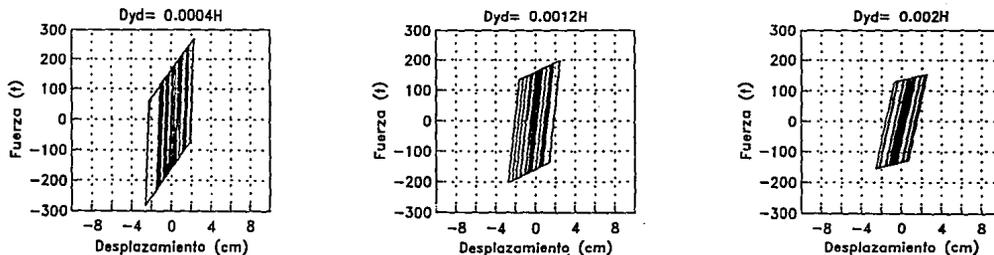
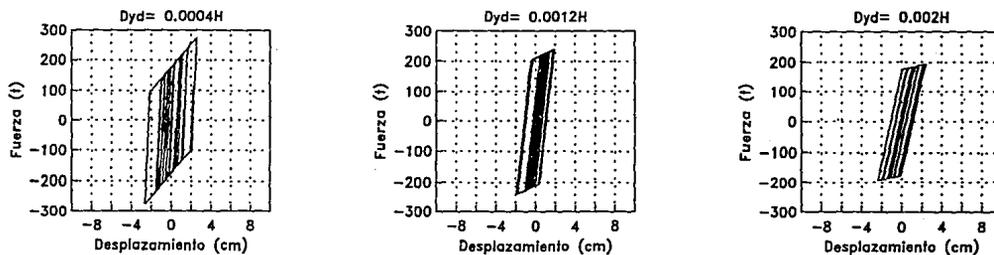
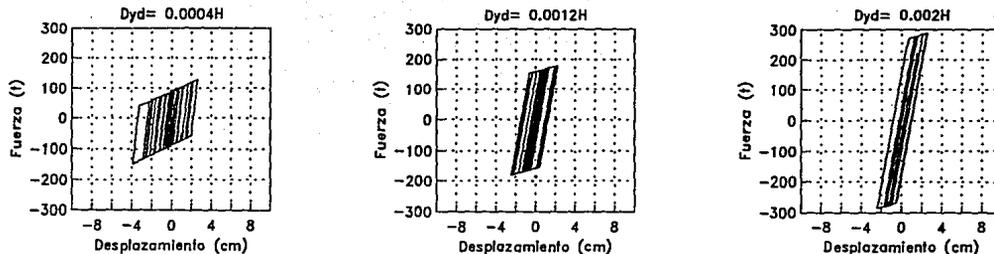


Fig 60. Ductilidad máxima de los disipadores, T=1.0s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.





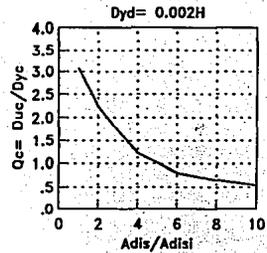
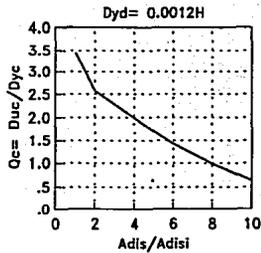
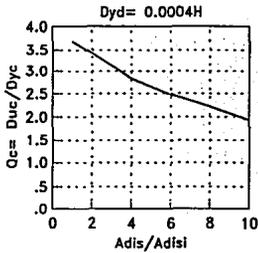


Fig 67. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

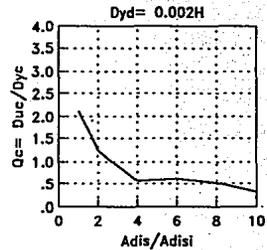
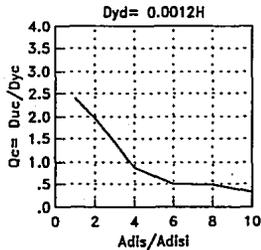
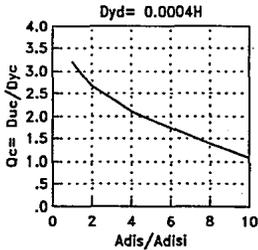


Fig 68. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

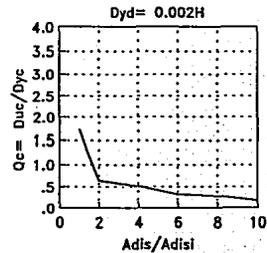
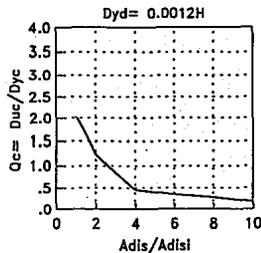
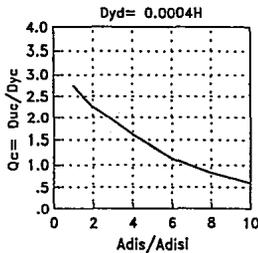


Fig 69. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.

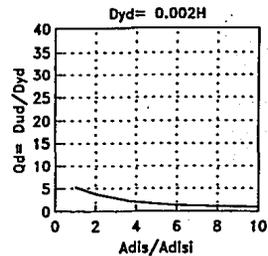
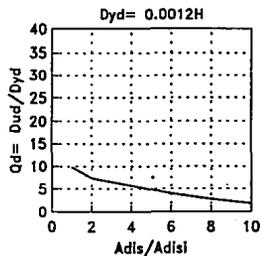
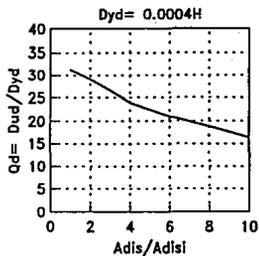


Fig 70. Ductilidad máxima de los disipadores, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

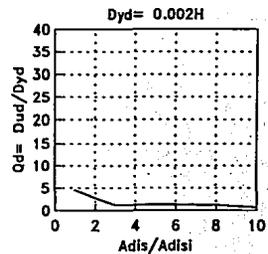
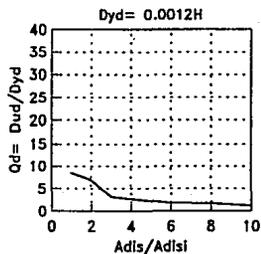
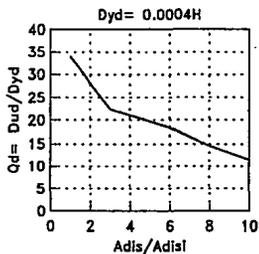


Fig 71. Ductilidad máxima de los disipadores, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

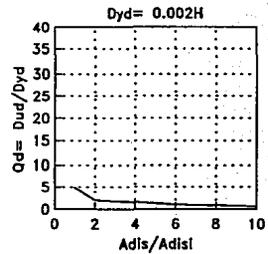
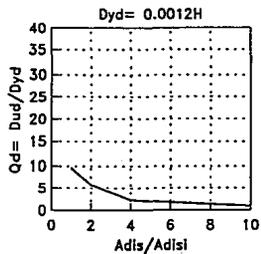
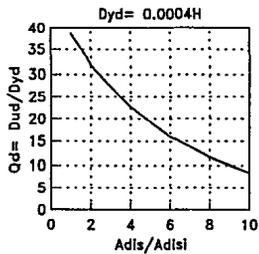
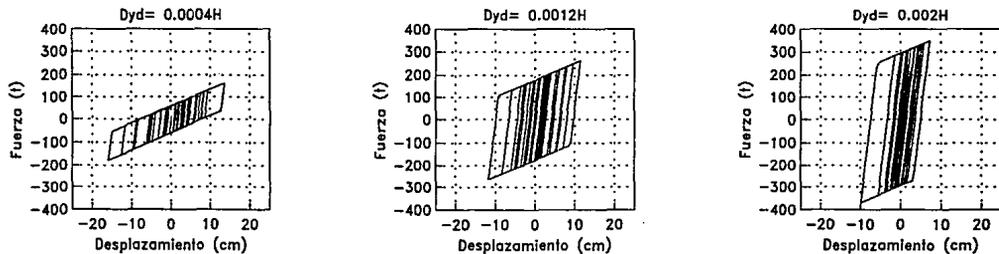
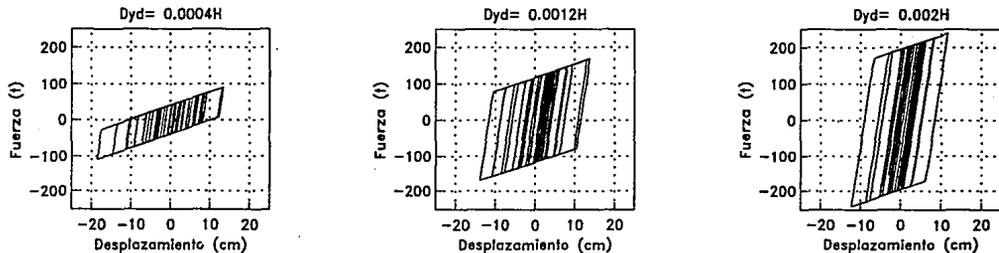
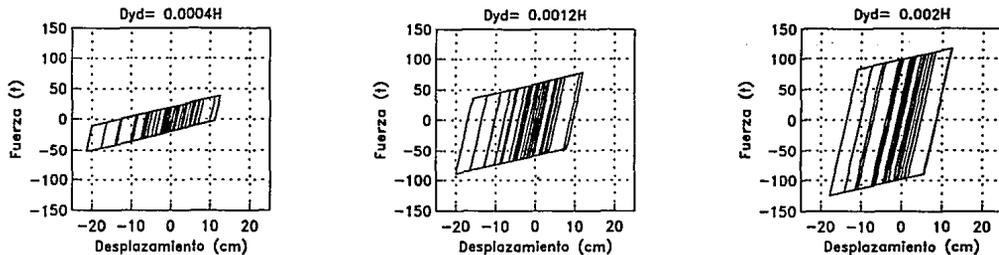
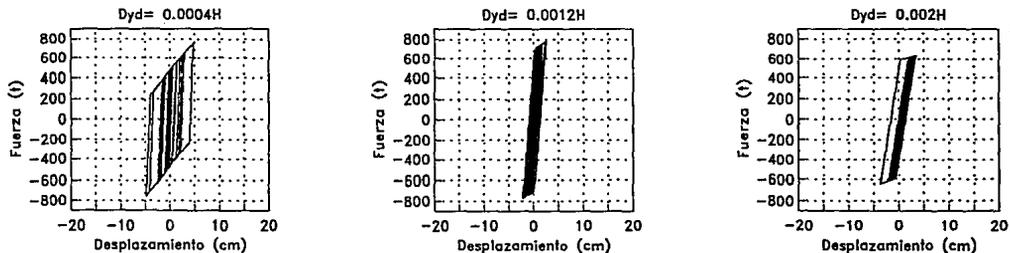
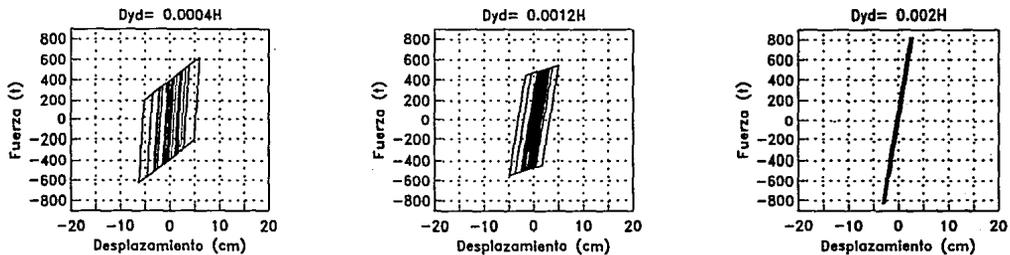
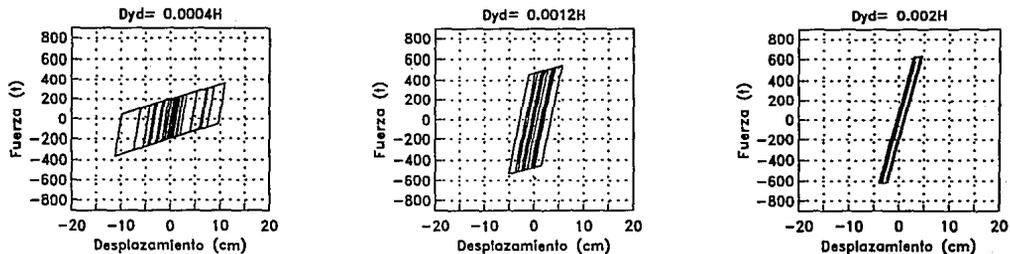


Fig 72. Ductilidad máxima de los disipadores, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.





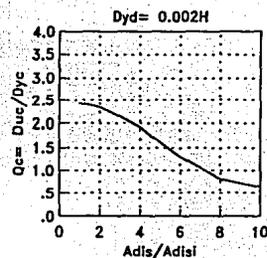
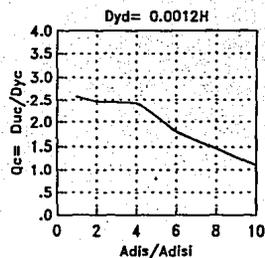
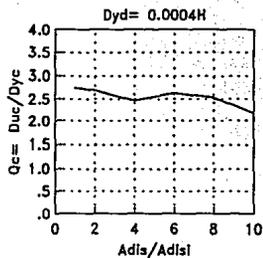


Fig 79. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

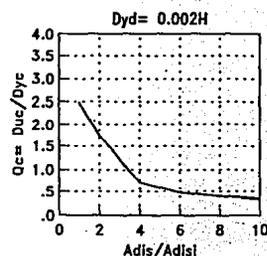
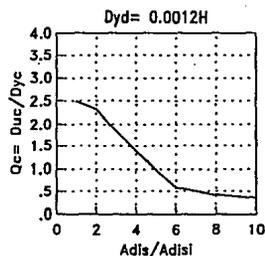
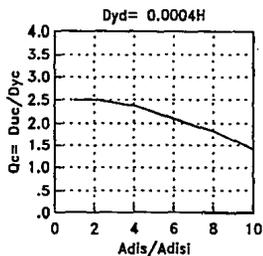


Fig 80. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

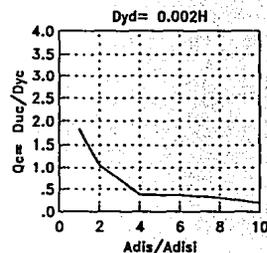
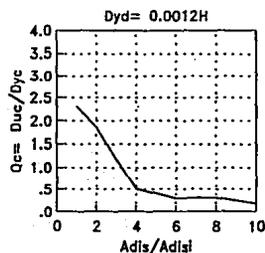
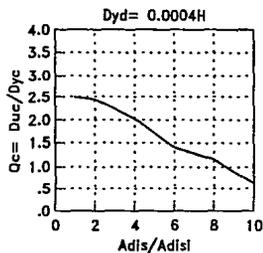


Fig 81. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.

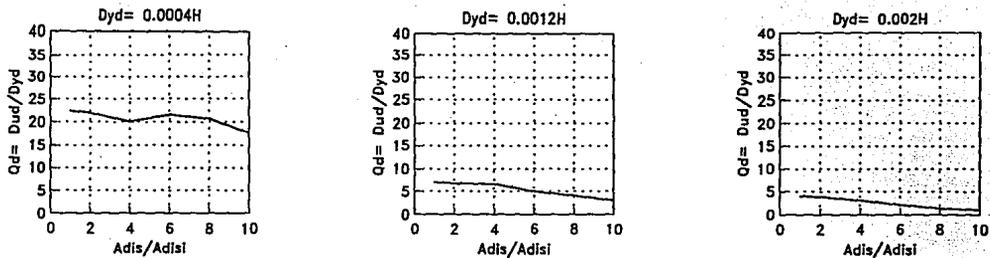


Fig 82. Ductilidad máxima de los disipadores, $T=2.0s$, $Q=3.0$, $D_{pre}=1.2D_{perm}$, registro SCT.

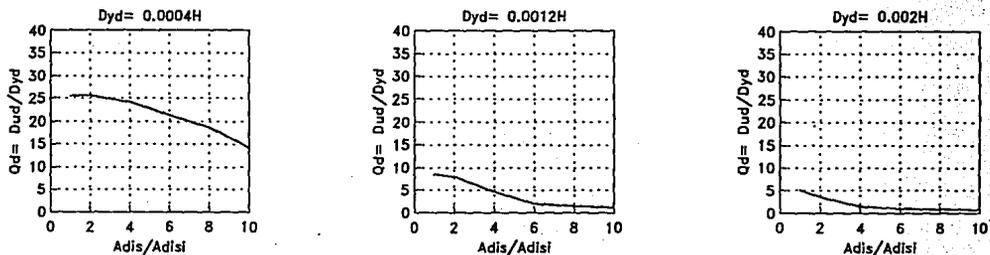


Fig 83. Ductilidad máxima de los disipadores, $T=2.0s$, $Q=3.0$, $D_{pre}=1.5D_{perm}$, registro SCT.

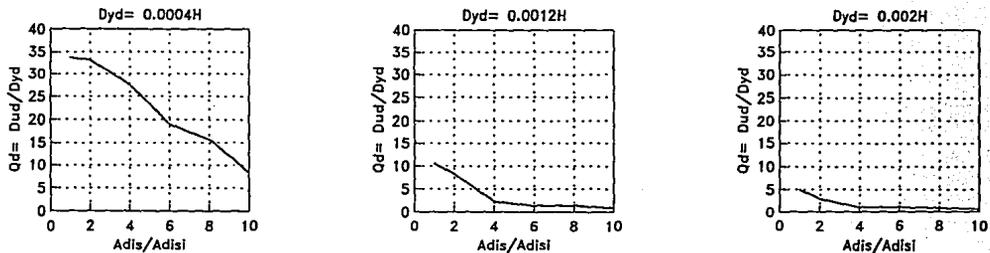


Fig 84. Ductilidad máxima de los disipadores, $T=2.0s$, $Q=3.0$, $D_{pre}=2.0D_{perm}$, registro SCT.

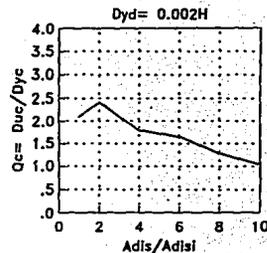
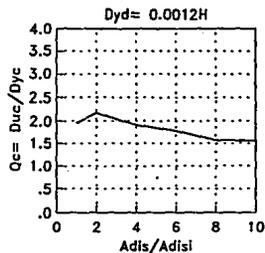
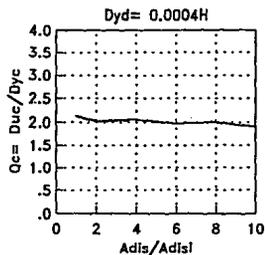


Fig 85. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

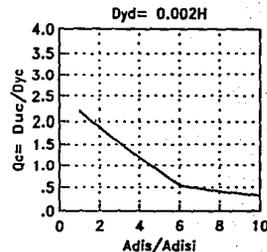
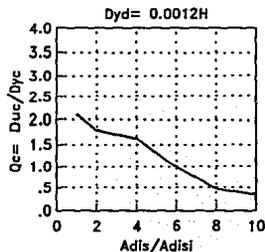
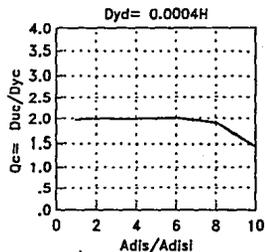


Fig 86. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

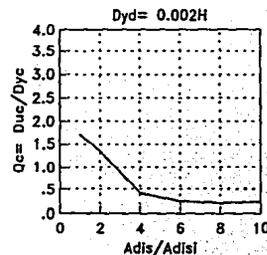
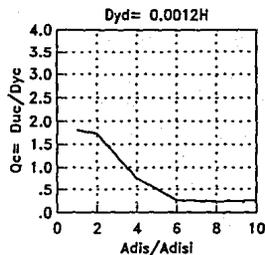
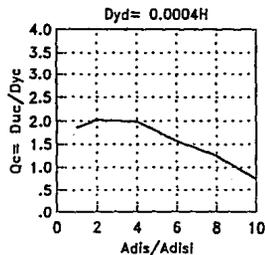


Fig 87. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.

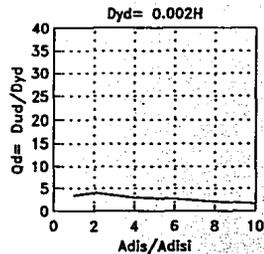
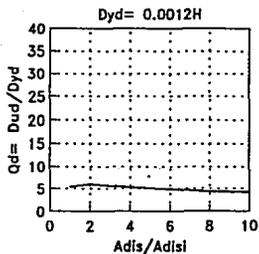
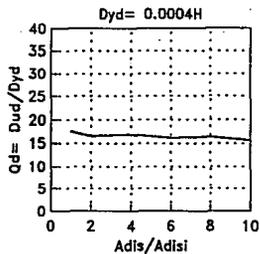


Fig 88. Ductilidad máxima de los disipadores, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

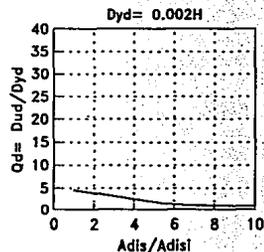
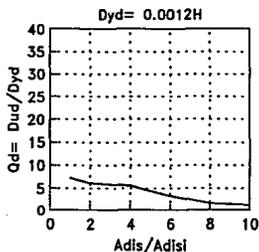
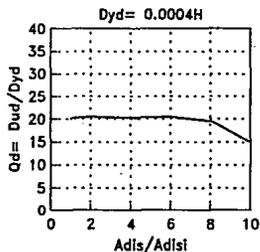


Fig 89. Ductilidad máxima de los disipadores, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

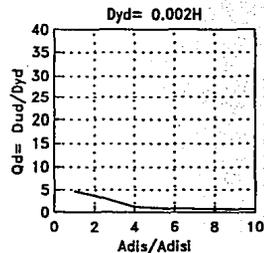
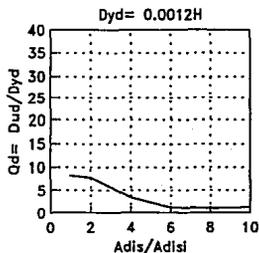
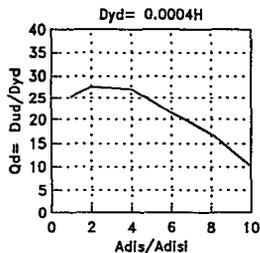


Fig 90. Ductilidad máxima de los disipadores, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.

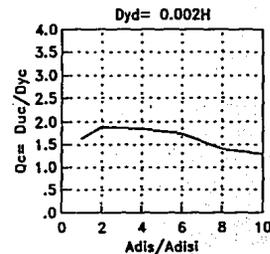
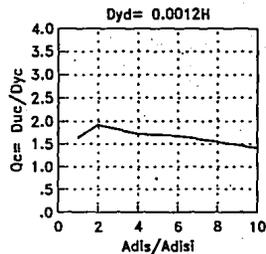
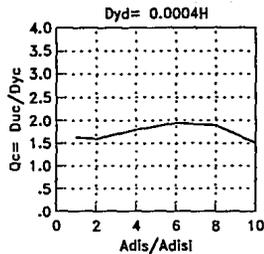


Fig 91. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=3.0s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT.

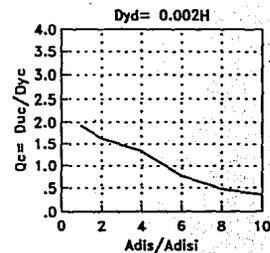
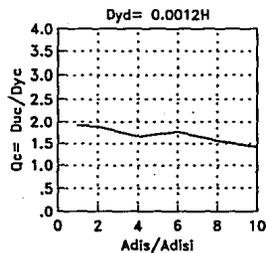
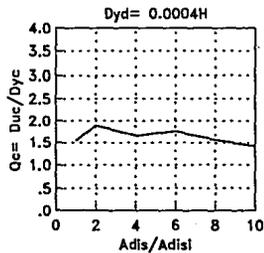


Fig 92. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=3.0s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT.

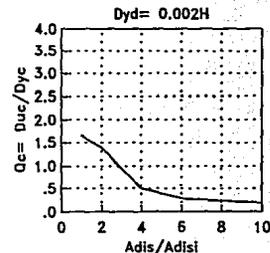
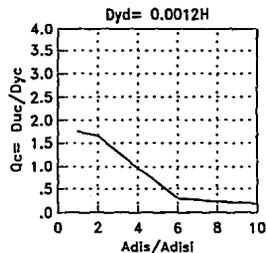
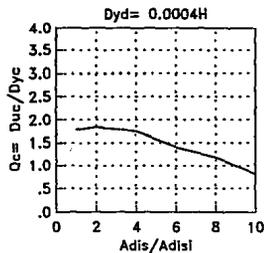
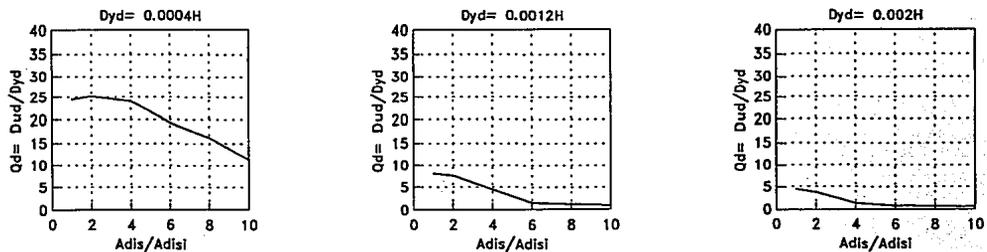
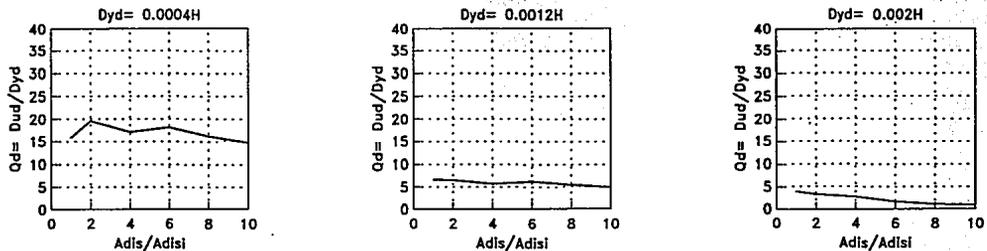
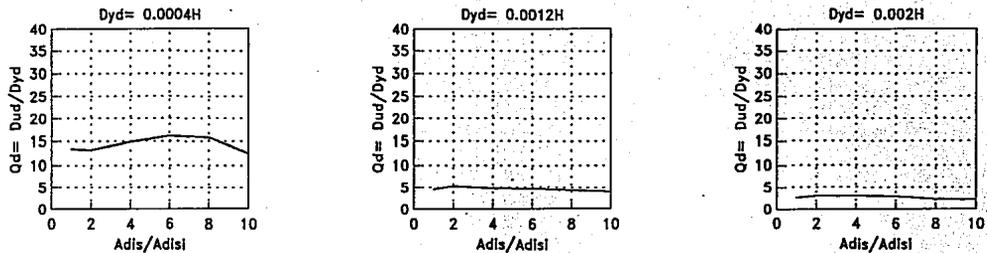


Fig 93. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=3.0s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT.



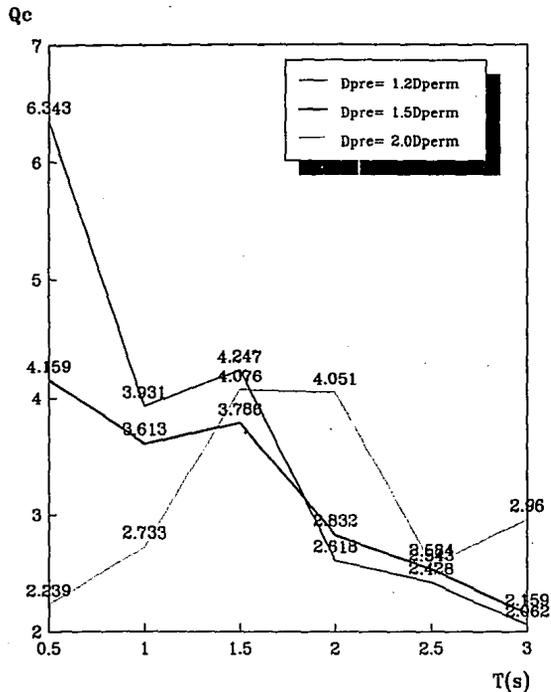


Fig 97. Ductilidad máxima de los elementos de cortante en los modelos convencionales.

Espectros de Seudoaceleraciones SCT-EW

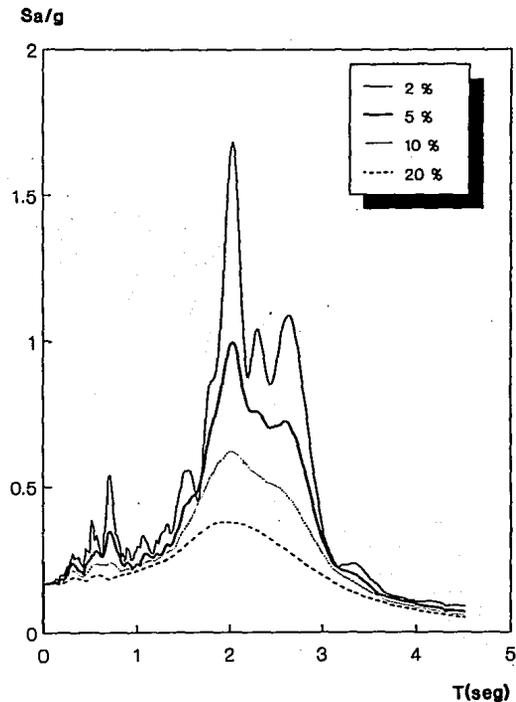


Fig 98. Espectro de respuesta SCT:

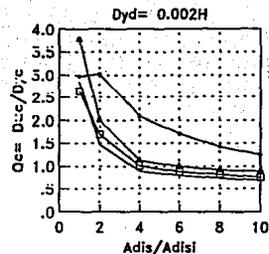
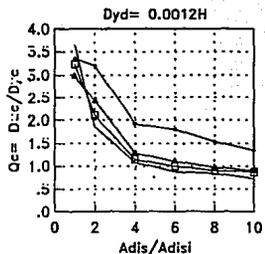
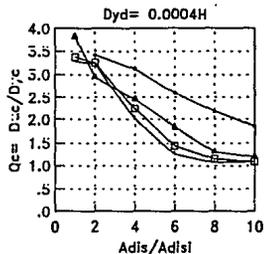


Fig 99. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT, X.

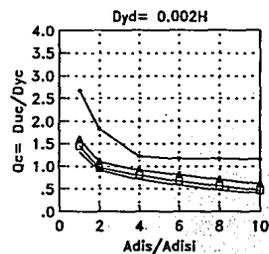
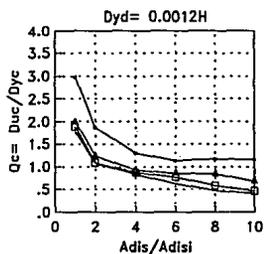
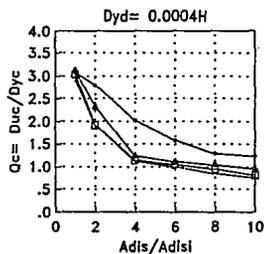


Fig 100. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT, X.

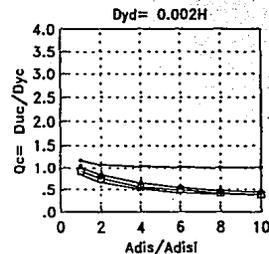
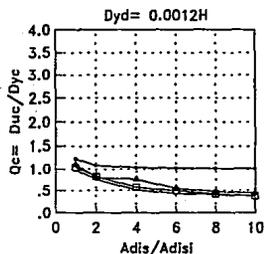
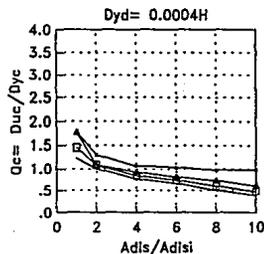


Fig 101. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=0.5s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT, X.

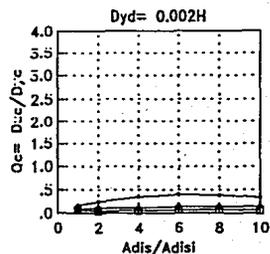
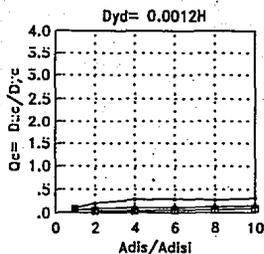
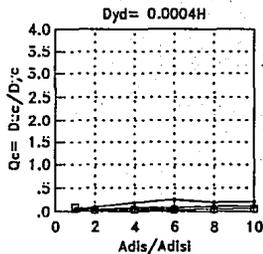


Fig 102. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=0.5s$, $Q=3.0$, $Dpre=1.2Dperm$, registro SCT, Y.

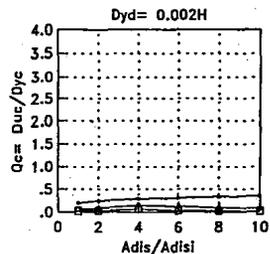
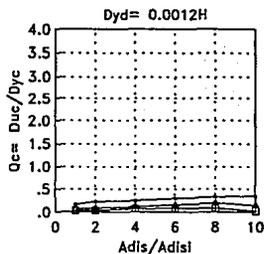
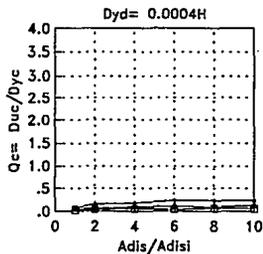


Fig 103. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=0.5s$, $Q=3.0$, $Dpre=1.5Dperm$, registro SCT, Y.

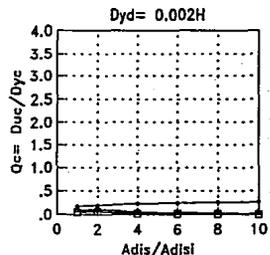
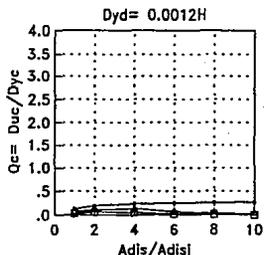
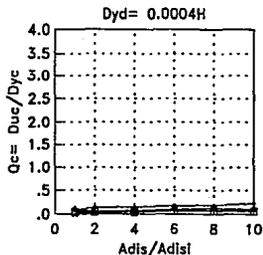


Fig 104. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=0.5s$, $Q=3.0$, $Dpre=2.0Dperm$, registro SCT, Y.

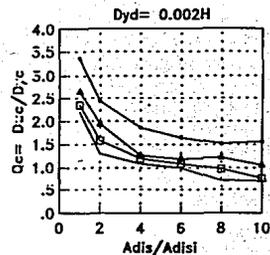
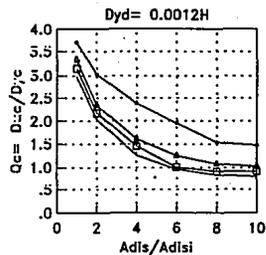
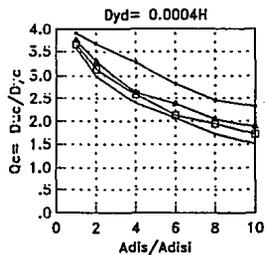


Fig 105. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=1.0s$, $Q=3.0$, $Dpr= 1.2Dperm$, registro SCT, X.

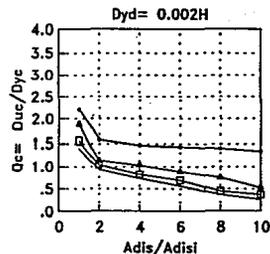
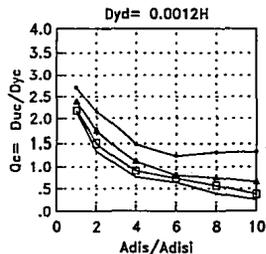
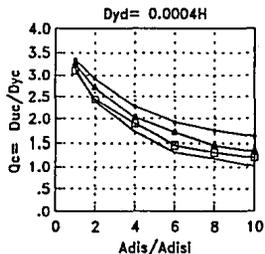


Fig 106. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=1.0s$, $Q=3.0$, $Dpr= 1.5Dperm$, registro SCT, X.

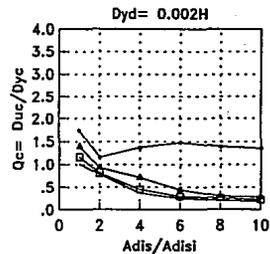
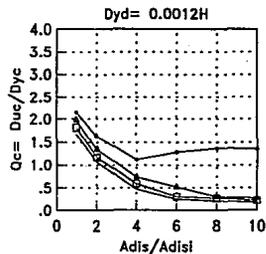
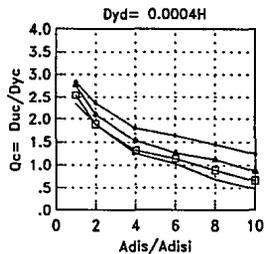


Fig 107. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=1.0s$, $Q=3.0$, $Dpr= 2.0Dperm$, registro SCT, X.

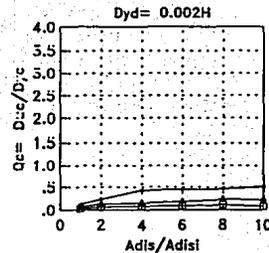
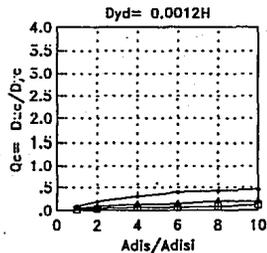
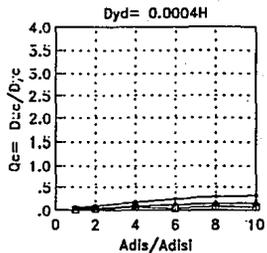


Fig 108. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.0s, Q=3.0, Dpre = 1.2Dperm, registro SCT, Y.

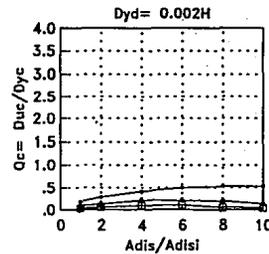
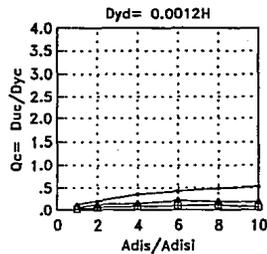
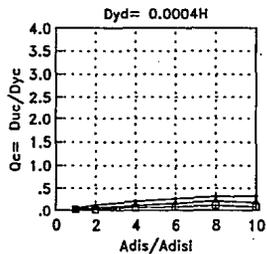


Fig 109. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.0s, Q=3.0, Dpre = 1.5Dperm, registro SCT, Y.

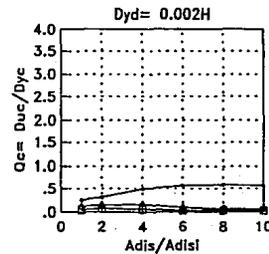
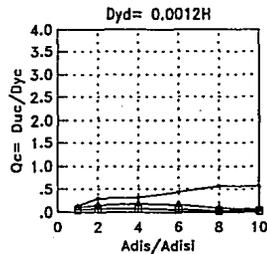
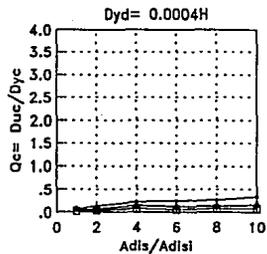


Fig 110. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.0s, Q=3.0, Dpre = 2.0Dperm, registro SCT, Y.

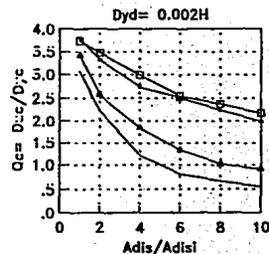
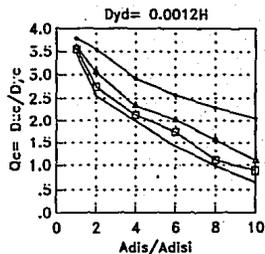
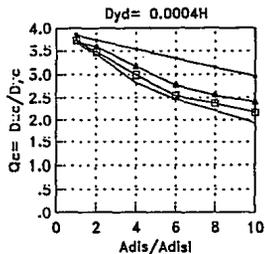


Fig 111. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT, X.

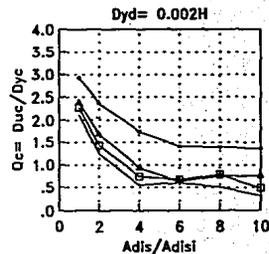
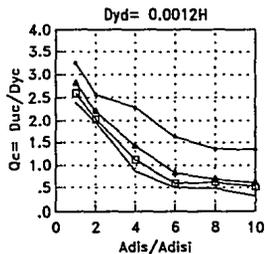
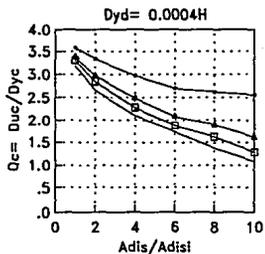


Fig 112. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 1.50Dperm, registro SCT, X.

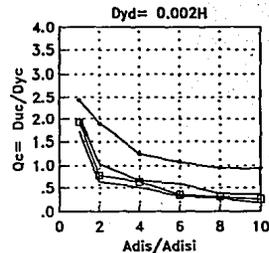
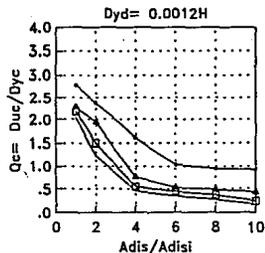
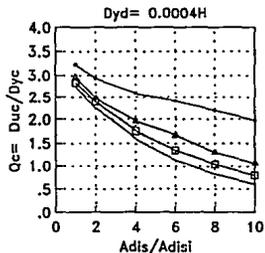


Fig 113. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=1.5s, Q=3.0, Dpre= 2.00Dperm, registro SCT, X.

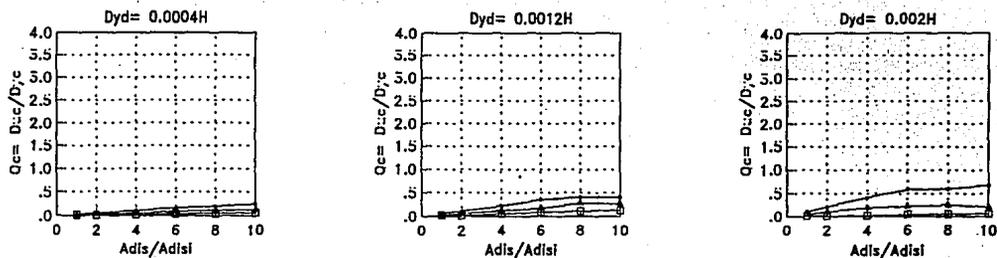


Fig 114. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=1.5s$, $Q=3.0$, $D_{pre} = 1.2D_{perm}$, registro SCT, Y.

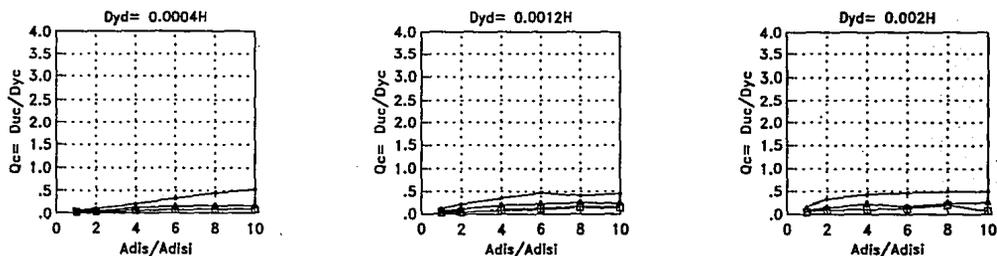


Fig 115. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=1.5s$, $Q=3.0$, $D_{pre} = 1.5D_{perm}$, registro SCT, Y.

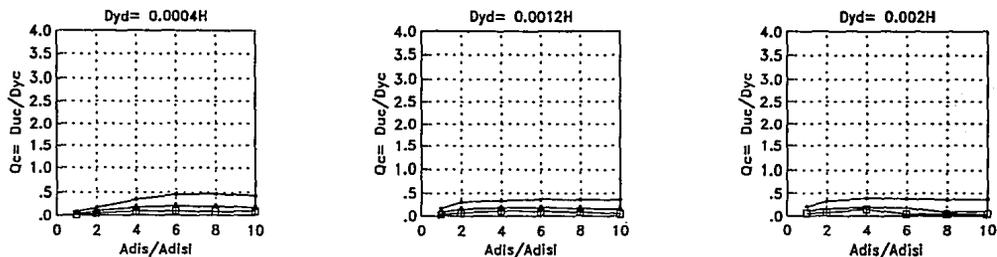


Fig 116. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, $T=1.5s$, $Q=3.0$, $D_{pre} = 2.0D_{perm}$, registro SCT, Y.

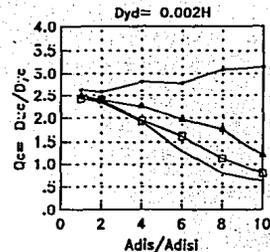
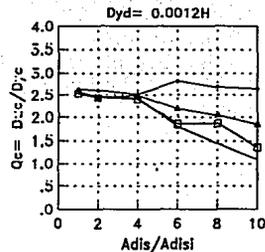
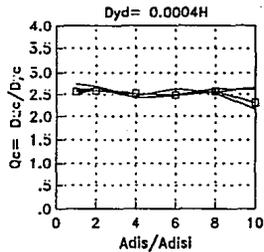


Fig 117. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 1.20perm, registro SCT, X.

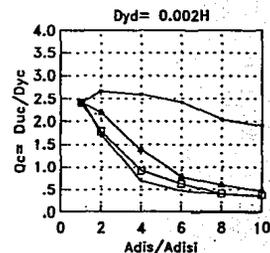
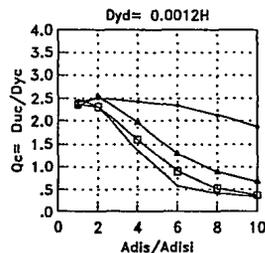
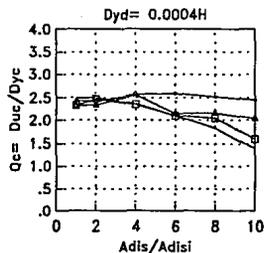


Fig 118. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 1.50perm, registro SCT, X.

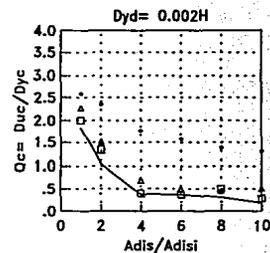
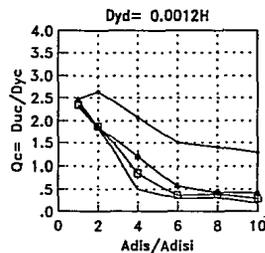
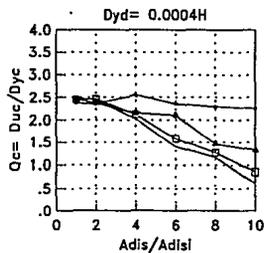


Fig 119. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 2.00perm, registro SCT, X.

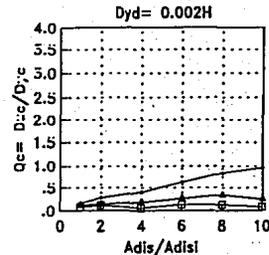
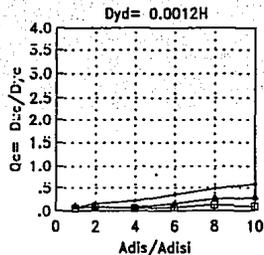
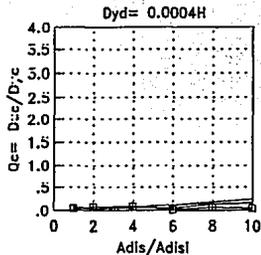


Fig 120. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT, Y.

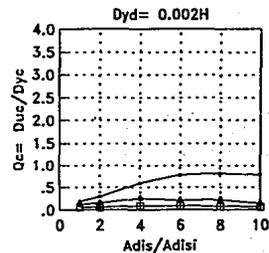
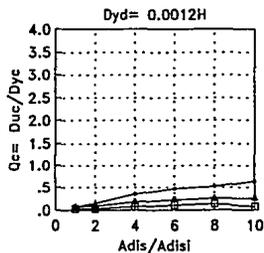
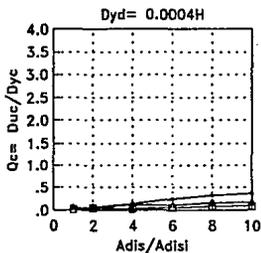


Fig 121. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT, Y.

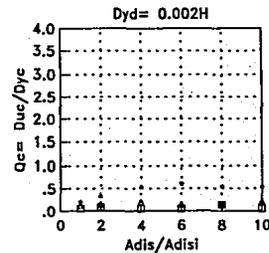
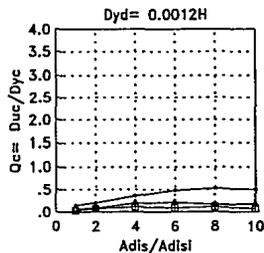
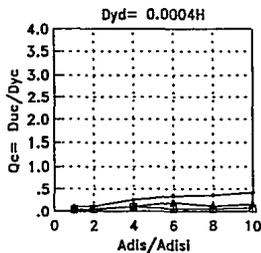


Fig 122. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.0s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT, Y.

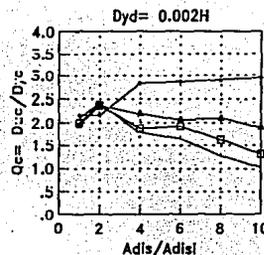
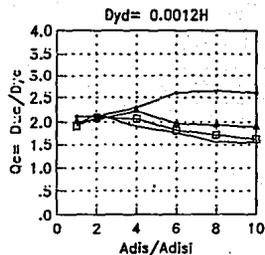
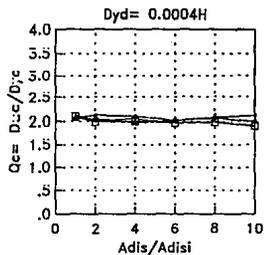


Fig 123. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT, X.

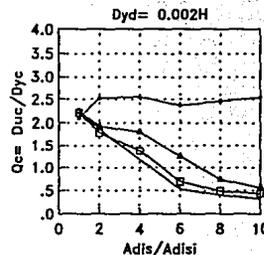
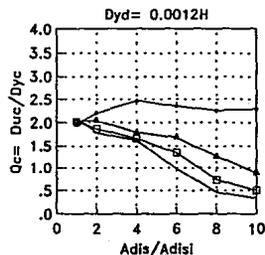
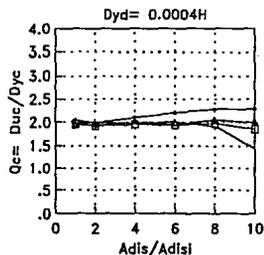


Fig 124. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT, X.

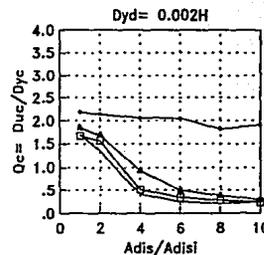
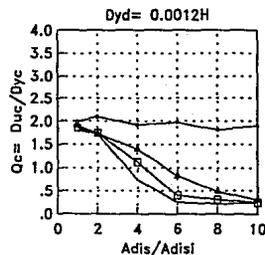
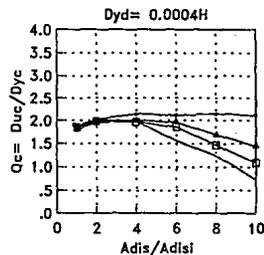


Fig 125. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT, X.

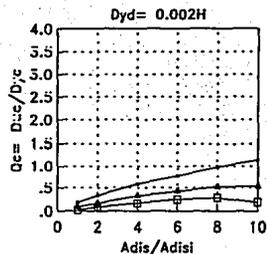
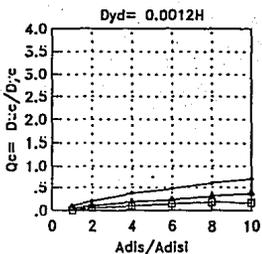
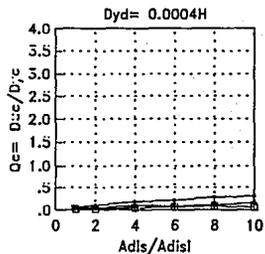


Fig 126. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 1.2Dperm, registro SCT, Y.

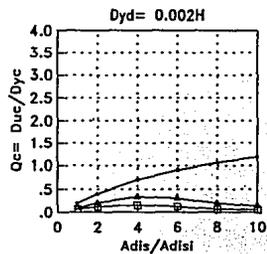
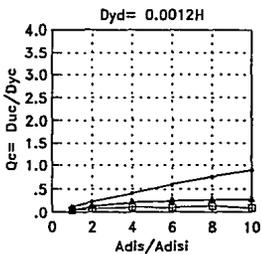
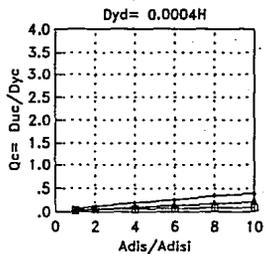


Fig 127. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 1.5Dperm, registro SCT, Y.

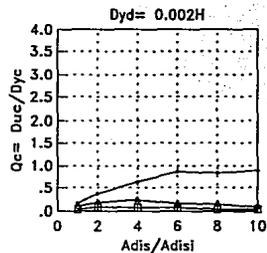
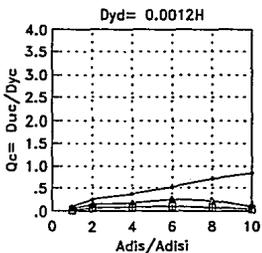
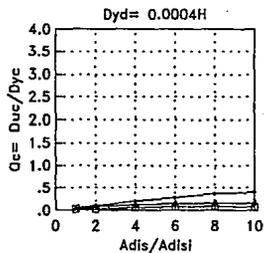


Fig 128. Ductilidad máxima de los elementos de cortante, T=2.5s, Q=3.0, Dpre= 2.0Dperm, registro SCT, Y.

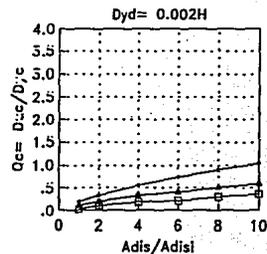
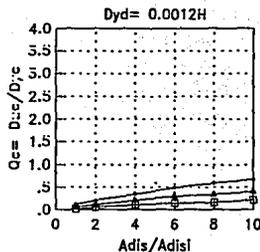
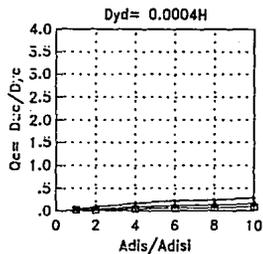


Fig 132. Ductilidad máxima de los elementos de corte, $T=3.0s$, $Q=3.0$, $Dpre=1.2Dperm$, registro SCT, Y.

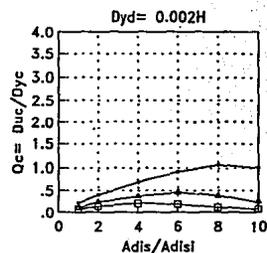
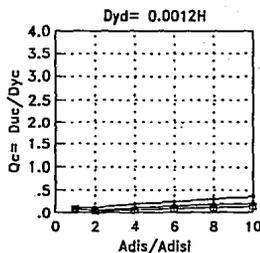
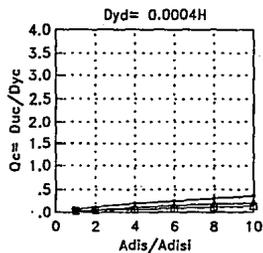


Fig 133. Ductilidad máxima de los elementos de corte, $T=3.0s$, $Q=3.0$, $Dpre=1.5Dperm$, registro SCT, Y.

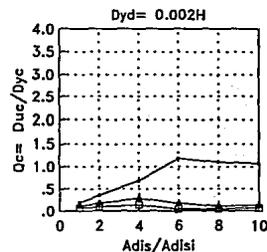
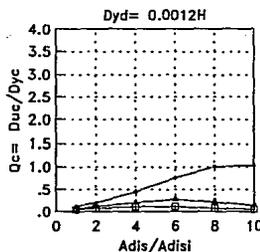
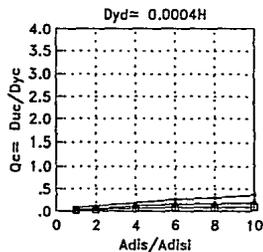


Fig 134. Ductilidad máxima de los elementos de corte, $T=3.0s$, $Q=3.0$, $Dpre=2.0Dperm$, registro SCT, Y.