

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA**

01161

CONFIABILIDAD DE MARCOS SIMPLES CON DISIPADORES

MIGUEL RUIZ VELAZQUEZ

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE

ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ORLANDO J. DÍAZ LÓPEZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA

2000

285856



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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 mi esposa LORENA por su amor y paciencia

A mi hija LORNETA por su apoyo y compañía

A mi hijo JESUS por su disponibilidad y empeño

A mis padres MIGUEL y BEATRIZ

A mis hermanos

A mis amigos

INDICE

	Pág.
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	
2. TIPOS DE DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA	
2.1 Dispositivos de control pasivo	1
2.1.1 Osciladores resonantes	1
2.1.2 Aisladores de base	1
2.1.3 Disipadores de energía	2
2.1.3.1 Disipación por fricción	2
2.1.3.2 Disipación por extrusión	2
2.1.3.3 Disipación por comportamiento viscoelástico de materiales	2
2.1.3.4 Disipación por comportamiento plástico de los materiales	2
2.2 Dispositivos de control activo	3
2.2.1 Masa activa	3
2.2.2 Tendones activos	3
2.2.3 Sistemas de rigidez variable	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
3.1 Descripción del problema	5
3.2 Política de reemplazo o reparación de elementos estructurales	6
3.3 Probabilidad de transición de daños acumulados	7
3.4 Solución mediante el método de Montecarlo	9

3.5 Reemplazo preventivo de disipadores de energía	9
4. MODELO ESTUDIADO	
4.1 Sistemas simples equivalentes del marco convencional	11
4.1.1 Criterios de equivalencia de rigidez y masa	11
4.1.2 Criterios de equivalencia de resistencia	12
4.1.3 Criterios de equivalencia de la ductilidad	13
4.2 Incertidumbres del sistema del modelo equivalente	13
4.3 Modelo equivalente del marco con disipador	15
4.4 Modelos de comportamiento histerético de los elementos	15
4.4.1 Modelo para los elementos del sistema de marco	15
4.4.2 Modelo para el disipador	17
5. CASOS ESTUDIADOS	
5.1 Sistemas equivalentes	22
5.1.1 Marco convencional	22
5.1.2 Marco con disipador de energía	22
5.2 Incertidumbres en las propiedades y cargas del sistema	22
5.3 Excitación sísmica	23
6. RESULTADOS	
6.1 Comparación de respuestas	24
6.2 Influencia del disipador de energía	25
6.3 Daño acumulado en marcos convencionales	26
6.3.1 Funciones de daño en marcos convencionales	27
6.4 Daño en marcos con disipador de energía	27
6.4.1 Sistemas con $T=0.5s$	28
6.4.2 Sistemas con $T=1.0s$	29
6.4.3 Sistemas con $T=1.5s$	29
6.4.4 Funciones de daño	29

7. ANALISIS DE DECISIONES

7.1 Amenaza sísmica 32

7.2 Costos de edificios 32

7.2.1 Costos iniciales y de reparación de edificios 32

7.2.2 Costo del marco convencional 32

7.2.3 Costo del marco con disipador 34

7.3 Cálculo de utilidades 36

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 40

REFERENCIAS

RECONOCIMIENTOS

Tablas

Figuras

RESUMEN

Se estudia la eficiencia del uso de dispositivos disipadores de energía para reducir la respuesta y la probabilidad de falla de marcos de concreto reforzado ante eventos sísmicos. Se acepta para los elementos de concreto reforzado un comportamiento ante cargas cíclicas que presenta degradación de rigidez y resistencia, mientras que los dispositivos disipadores de energía tienen un comportamiento histerético casi estable. Se presenta la formulación de modelos que describen la acumulación de daño, la probabilidad de transición entre estados sucesivos de un sistema y la evolución de la confiabilidad del sistema con la historia sísmica. Se establecen criterios para diseño, construcción y mantenimiento de estos sistemas basados en la minimización de la suma de los costos iniciales, daño y mantenimiento. Se presenta una aplicación de los conceptos anteriores en varios casos simples de un sistema de un grado de libertad. Se estudian dos sistemas con fines comparativos: un marco sencillo diseñado sin disipador y un marco que contiene un disipador de energía. Se analiza la influencia de diversas variables significativas como son: a) la relación entre la rigidez lateral del elemento disipador y la rigidez total del sistema, b) la relación entre la resistencia lateral del disipador y la resistencia total del sistema, c) el período fundamental del sistema y d) la relación entre la deformación lateral máxima del marco a la del disipador. Los resultados obtenidos indican que el uso de los disipadores de energía suministra una reducción de daños provocado por sismo sobre las estructuras; sin embargo, su uso puede elevar los costos iniciales de construcción.

1. INTRODUCCIÓN

Las fuerzas laterales recomendadas por los códigos sísmicos para el diseño de estructuras que se proyecta construir en sitios en donde la amenaza sísmica es importante son menores a aquellas que en realidad se pueden presentar durante un evento sísmico severo; lo anterior es para aprovechar la ductilidad que son capaces de desarrollar las estructuras. Pero el inconveniente principal de que disipen energía por sí mismas es que los elementos estructurales que las forman soportan daños irreversibles cuando sufren deformaciones inelásticas importantes. Una opción para disminuir los daños en las estructuras es el uso de los dispositivos disipadores de energía sísmica, ya que éstos elementos se pueden fabricar de manera que sean estables ante la acción de cargas repetidas y sencillos de reparar ó reemplazar cuando existan sospechas de que su capacidad de resistir carga esté disminuida. El concepto básico es que la energía se disipe a través del trabajo mecánico de los dispositivos disipadores, disminuyendo las demandas de comportamiento dúctil sobre los elementos estructurales. El empleo de los disipadores de energía en una obra depende de muchos factores, entre los cuales se pueden mencionar: a) la importancia de la construcción, b) el balance óptimo entre costos, beneficios y daños esperados.

No existen normas o criterios establecidos en los códigos sísmicos para el diseño de estructuras con dispositivos disipadores de energía sísmica. En el presente trabajo se realiza un estudio de la respuesta de sistemas estructurales simples con disipadores de energía. Para ello se definen relaciones sencillas entre los sistemas estructurales simples que se estudian y los sistemas estructurales más complejos a los cuales representan. Se considera la influencia del daño acumulado de los elementos estructurales en eventos anteriores. El objetivo a alcanzar es definir reglas sencillas y válidas del uso de los disipadores de energía sísmica en las estructuras que sirvan para disminuir su respuesta y probabilidad de falla ante sismos futuros.

En el Cap. 1 se describen los tipos de dispositivos disipadores de energía utilizados en las estructuras. En el Cap. 2 se plantea el problema por resolver, su alcance, limitantes y solución propuesta. En el Cap. 3 se explica el modelo equivalente estudiado para resolver el problema, sus bases y consideraciones, así como el comportamiento histerético propuesto para los elementos del sistema estructural. En el Cap.4 se eligen los casos por analizar, las variables que se adoptaron para los análisis, los acelerogramas y el análisis dinámico utilizado. En el Cap. 5 se discuten los resultados obtenidos y se obtienen expresiones para los momentos estadísticos de primer y segundo orden del daño final en los elementos estructurales. En el Cap. 6 se realiza una aplicación para obtener los costos esperados durante la vida útil de las estructuras construidas en zonas sísmicas. Lo anterior se realiza mediante simulación usando el Método de Monte Carlo. En el Cap. 7 se presentan conclusiones y recomendaciones.

1.1 Antecedentes

Recientemente se han realizado en México estudios analíticos para evaluar la efectividad del uso de dispositivos de energía en la respuesta sísmica de estructuras de concreto reforzado. Urrego y Ruiz (1994) analizan la respuesta de un marco plano de concreto reforzado de 10 niveles con disipadores de energía y la comparan con la del mismo marco, pero sin disipadores. Estudian sistemas con diferentes arreglos de la localización de los disipadores de energía en la estructura. Encuentran que ciertos arreglos no son adecuados ya que no modifican sustancialmente el comportamiento de la estructura, además de que generan efectos adicionales, como el incremento en las fuerzas transmitidas a la cimentación. Concluyen que la localización de los disipadores es importante y que su inclusión puede favorecer a un mejor comportamiento estructural. Avila y Gutiérrez (1994) realizan una comparación de la respuesta sísmica inelástica de edificios tipo escuela con y sin disipadores de energía sísmica. Los disipadores de energía sísmica son del tipo ADAS. Los resultados obtenidos muestran que la estructura con los disipadores tipo ADAS presenta una notable disminución de daños en vigas y columnas. Lo anterior confirma la tesis del empleo de los disipadores. Tena, Gómez y Vargas (1993) realizan una evaluación sísmica de dos edificios de concreto reforzado reestructurados con dispositivos disipadores de energía tipo ADAS. Los resultados que obtienen muestran que el refuerzo propuesto mejora la ductilidad y la capacidad sismo-resistente de los inmuebles, de manera que puedan cumplir con las exigencias del actual reglamento de construcciones para el Distrito Federal.

Avila y Gutiérrez (1996) obtienen una comparación del comportamiento sísmico inelástico de un edificio de 10 niveles con y sin disipadores de energía sísmica. Los disipadores que utilizan en su análisis son del tipo ADAS. Observan un mejor comportamiento de la estructura con disipadores de energía que cuando no los tiene, al presentar menores daños vigas y columnas. Jara (1996) realiza una comparación de la respuesta inelástica de dos edificios de 6 y 15 niveles con y sin disipadores de energía sísmica. Los disipadores son del tipo ADAS. Ambos edificios se consideran desplantados en la zona de terreno blando de la Cd. de México. Los resultados que obtiene demuestran que el edificio de 6 niveles con disipadores presenta una importante participación en la reducción de la respuesta, incluyendo una disminución de alrededor del 46% en la rotación plástica de las columnas. Sin embargo, para el edificio de 15 niveles con disipadores de energía no se obtienen reducciones importantes en la respuesta; al contrario, se

presentan incrementos en la energía de entrada con los mismos porcentajes de energía histerética que si no incluyera los disipadores. Esto se debe a que el periodo de la estructura es cercano a los 2 segundos, y al comportarse inelásticamente se mantiene dentro de la zona de máxima respuesta. Todos los estudios anteriores, a excepción del de Tena, Gómez y Vargas (1993), realizaron sus análisis no-lineales utilizando el sismo del 19 de Septiembre de 1985 registrado en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), componente este-oeste (E-W).

Pocos son los estudios en los cuales se proponen criterios para el diseño de estructuras con disipadores de energía. Silva y Ruiz (1993) proponen un criterio de diseño en el cual consideran que los elementos del marco estructural mantienen un comportamiento elástico y son los disipadores de energía los elementos que soportan las deformaciones inelásticas.

Aunque debe reconocerse el esfuerzo para realizar estudios de estructuras con disipadores de energía, deben acentuarse los esfuerzos orientados a establecer criterios óptimos de diseño que puedan aplicarse en las condiciones usuales de la práctica.

2. TIPOS DE DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA

Los dispositivos de control de la respuesta estructural se pueden dividir de acuerdo al trabajo que realizan en la estructura como dispositivos de control pasivo o activo. Una breve descripción de estos dispositivos se hace a continuación:

2.1 Dispositivos de control pasivo

Incluye aquellos dispositivos cuya respuesta y su interacción con la estructura dependen exclusivamente de las perturbaciones sísmicas naturales. En este tipo básicamente se han desarrollado tres sistemas: osciladores resonantes, aisladores de base y disipadores de energía.

2.1.1 Osciladores resonantes

Este sistema consiste en pequeñas masas adicionales a la estructura con características propias de rigidez y amortiguamiento que reducen la respuesta de la misma (Villaverde, 1990). Generalmente estos elementos son colocados en el último nivel del edificio, formando un nivel adicional (Fig. 2.1).

2.1.2 Aisladores de base

Estos dispositivos desacoplan la superestructura de la cimentación. Comúnmente el lugar de su colocación es entre la cimentación y el primer nivel de la estructura. Su principal objetivo es incrementar el período de vibración de la estructura y, en consecuencia, la flexibilidad de la misma. El primer modo de la estructura afecta la deformación en el sistema aislador, por lo que la

estructura permanece rígida sobre él. Los modos superiores tienen poca participación. Así, cuando se presenta un evento sísmico, la energía asociada a él no se transmite a la estructura.

Han sido numerosas las estructuras construidas con este sistema a través de diferentes tipos de aislamientos, entre los que se pueden mencionar los siguientes: de caucho, rodantes, deslizantes y suspensión de cables. En la Fig. 2.2 se muestran aisladores del tipo rodantes.

2.1.3 Disipadores de energía

La principal función de este sistema disipador es disminuir la respuesta de la estructura mediante la disipación de energía a través de ellos y/o reducir o, en el mejor de los casos, eliminar la demanda de ductilidad de los elementos estructurales tales como vigas, columnas o muros. Estos dispositivos se colocan en la estructura de tal manera que garanticen rigidez y resistencia ante deformaciones excesivas, aumentando el amortiguamiento del conjunto mediante la disipación de energía de las siguientes formas:

2.1.3.1 Disipación por fricción

En 1982, Pall y Marsh (1990) realizaron estudios usando dispositivos constituidos por amortiguadores de fricción y contraventeos en forma de cruz (Fig. 2.3). Sugieren su colocación en las crujeas centrales. El dispositivo se coloca en el centro de las diagonales y el trabajo se presenta cuando se desliza una diagonal sobre la otra, produciendo fricción entre las placas cuando las fuerzas sobrepasan cierto margen.

2.1.3.2 Disipación por extrusión

Este sistema se basa en deformar un material en su sección transversal al hacerlo pasar por un tubo cuya sección se reduce. Este sistema se ha utilizado en estructuras construidas en Nueva Zelanda. Su comportamiento histerético es muy similar al de los disipadores por fricción (Robinson y Greenbank, 1990).

2.1.3.3 Disipación por comportamiento viscoelástico de materiales

Se forman con placas de acero y un material viscoelástico entre ellos (Fig. 2.4); se colocan de tal forma que el cortante sísmico actúe directamente sobre el dispositivo. Dependiendo de la viscosidad del material, la frecuencia de la estructura se modifica en función del amortiguamiento. Los parámetros a tomar en consideración para su colocación son las características de la excitación y la temperatura del medio ambiente.

2.1.3.4 Disipación por comportamiento plástico de los materiales

En este sistema la disipación se presenta cuando se utiliza la deformación por flexión, compresión, tensión y rolado de los materiales empleados, tales como acero, plomo, aleaciones, etc. Un ejemplo de lo anterior son los dispositivos ADAS (Fig. 2.5), que utilizan la fluencia en flexión para la disipación de la energía. Comúnmente están ligados en serie con elementos diagonales y, por lo

tanto, su componente vertical puede aumentar las fuerzas axiales sobre las columnas. Sus principales características son su rigidez elástica, su resistencia y su desplazamiento de fluencia.

De manera análoga para la disipación por rolado, se han creado dispositivos hechos con solera de fierro doblados en frío en forma de U, J o espiral (Aguirre y Sánchez, 1990), que disipan energía al desplazarse una cara respecto a la otra en forma similar al movimiento de la orugas de un tractor (Fig. 2.6).

2.2 Dispositivos de control activo

La respuesta sísmica de estructuras puede controlarse mediante sistemas de tipo activo, los que actúan mediante el suministro de energía externa. Para tal fin, el sistema de control en cada instante actúa sobre la respuesta de la estructura tomando en cuenta la información que registra sobre la respuesta durante las etapas previas del movimiento. En comparación con los sistemas de control pasivo, con los sistemas de control activo presentan algunas ventajas entre ellas: a) más eficacia en el control del movimiento; b) relativa insensibilidad a las condiciones de sitio y movimientos de terreno; c) aplicabilidad a diferentes situaciones (p.e. control de movimiento ante fuerzas producidas por viento o sismo). Los principales dispositivos de esta clase son: masa activa, tendones activos y sistemas de rigidez variable.

2.2.1 Masa activa

Este tipo de sistema ha mostrado su eficacia para controlar la respuesta sísmica de edificios altos en casos en que dicha respuesta es dominada por el modo fundamental. Su función como control activo se alcanza al controlar y ajustar su movimiento, por lo regular en el último nivel, por un algoritmo que trabaja en función de las características de las respuestas sísmicas registradas por los sensores instalados en la estructura. Resultados experimentales muestran su ventaja al lograr una reducción de hasta un 50% en el máximo desplazamiento relativo del último nivel de la estructura. Un sistema de este tipo fue instalado en el último piso de un edificio de 11 niveles en Tokio, Japón (Soong, Masri y Housner, 1991).

2.2.2 Tendones activos

Estos sistemas constan de elementos diagonales conectados a la estructura y sujetos a tensiones que son controladas por mecanismos electro-hidráulicos. Han sido estudiados analíticamente en sus aplicaciones al control de estructuras esbeltas, edificios altos, puentes y estructuras costeras. Su función principal es modificar el periodo fundamental de la estructura, de manera que este siempre se encuentre alejado del periodo dominante del sismo, y así evitar grandes amplificaciones de la respuesta. La fuerza aplicada a estos sistemas se controla de la misma forma que en el caso anterior (Soong, Masri y Housner, 1991).

2.2.3 Sistemas de rigidez variable

El funcionamiento de estos sistemas se basa en el uso de elementos activos para ajustar la rigidez estructural de tal manera que se mantenga alejado el periodo efectivo del dominante del sismo en

cada instante. Se han desarrollado experimentos a pequeña escala usando este principio (Kobori, 1990) sobre un marco de acero de 3 niveles, en donde las acciones de control activo son proporcionadas por contraventeos con depósitos cilíndricos. Cada unión marco-diagonal está ajustada para abrir o cerrar una válvula que modifica la rigidez estructural. Su principal atractivo es la pequeña cantidad de energía externa requerida (Soong, Masri y Housner, 1991).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Descripción del problema

Los capítulos que siguen se refieren a sistemas con elementos pasivos de disipación de energía. Considérese uno de tales sistemas que se proyecta construir en un sitio en donde la amenaza sísmica es significativa. Las condiciones de diseño se expresan mediante un espectro sísmico reducido por comportamiento no lineal y un criterio que establecen las proporciones en que en distintas zonas del sistema estructural las fuerzas laterales son resistidas por el sistema convencional de elementos estructurales y por el conjunto de elementos disipadores de energía.

Cada vez que ocurre un temblor intenso se presentan daños en ambos elementos. Estos daños, que son función de las amplitudes y número de ciclos de deformación de cada elemento, se suman a los acumulados por la acción de eventos anteriores mientras no se repare el marco o no se reemplace el elemento disipador. Se supone que los daños en el marco son visibles y se reparan cada vez que adquieren un nivel determinado y que el disipador se reemplaza cuando falla o, de acuerdo con una estrategia preventiva, cuando se ha sometido a un número de temblores intensos tal que la probabilidad de falla ante el siguiente temblor intenso es alta. La estrategia óptima de diseño, construcción y mantenimiento de un sistema como el que se describe implica seleccionar tanto los parámetros de diseño estructural como los umbrales de daño para reparación del marco y los criterios de reemplazo preventivo de los elementos disipadores de manera que se minimice la suma de costos iniciales, de mantenimiento y de daños, todos estos costos actualizados a un mismo instante de referencia. Si T_i ,

$i=1, \dots, \infty$, son los instantes en que ocurren sismos que afectan al sistema en estudio, C es el costo inicial y L_i , $i=1, \dots, \infty$, son cantidades que incluyen consecuencias de falla o daños, costos de reparación y mantenimiento asociados con cada temblor, entonces la suma por minimizar vale

$$U = C + E \left[\sum_{i=1}^{\infty} L_i e^{-\gamma T_i} \right] \quad (3.1)$$

en donde E significa "esperanza" y γ es una tasa de descuento adecuada.

Los daños acumulados hasta el j -ésimo evento valen D_{mj} y D_{dj} en el marco estructural y en el elemento disipador, respectivamente. Los incrementos correspondientes al temblor $j+1$ valen $\delta_{m(j+1)}$ y $\delta_{d(j+1)}$, en donde

$$\begin{aligned} D_{m(j+1)} &= D_{mj} + \delta_{m(j+1)} \\ D_{d(j+1)} &= D_{dj} + \delta_{d(j+1)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

En el caso en que el i -ésimo temblor ocasione el colapso de la estructura y ésta se reconstruya, L_i vale $C+A$, en donde C es el costo de construcción y A incluye todos los demás costos, tanto materiales directos e indirectos como los asociados con pérdidas humanas, impacto social, etc. Si no se llega al colapso, L_i incluye el costo de las reparaciones en elementos estructurales y de relleno, el costo de reemplazar los elementos disipadores que hayan fallado y los perjuicios asociados con la interrupción de actividades o funciones causada por las obras correspondientes.

3.2 Política de reemplazo o reparación de elementos estructurales

Si el nivel de daños en la estructura de marco excede de un cierto nivel D_m , la reparación debe eliminar el daño acumulado; es decir, debe restituir las propiedades iniciales de resistencia y rigidez R_m y K_m del marco estructural. En este trabajo se supone que el daño (fatiga) se manifiesta en forma visible en los miembros del marco estructural, pero permanece oculto en los elementos disipadores hasta que alcanza un nivel demasiado alto, lo que conduce a riesgos de falla inaceptables ante el siguiente temblor intenso. Por ello se adopta la política preventiva de reemplazar los disipadores después de un número establecido de temblores intensos, con base en un índice de daño calculado, D_{rd} , que se definirá más adelante.

Las distribuciones probabilísticas de $\delta_{m(j+1)}$ y de $\delta_{d(j+1)}$, obtenidas en función de los daños acumulados hasta el j -ésimo evento (D_{mj} , D_{dj}) y de la distribución de probabilidades de la intensidad del $(j+1)$ -ésimo evento (Y_{j+1}), son útiles para obtener las probabilidades de transición de daños acumulados entre eventos consecutivos. Su empleo en la obtención de dichas probabilidades se resume en la Fig. 3.1, que se explica a continuación:

Inmediatamente después del i -ésimo temblor, el estado del sistema está definido por dos conjuntos de variables: las que describen el daño del sistema estructural y las que se refieren al proceso sísmico. El primer conjunto incluye los valores D_{mi} y D_{di} ; el segundo se expresa en forma genérica mediante el vector S_i de variables sismológicas (en los casos particulares de procesos de renovación o de Poisson, el vector S_i no existiría, puesto que la actividad futura no dependería de lo ocurrido hasta el último temblor). A fin de determinar las probabilidades condicionales de $D_{m(i+1)}$, $D_{d(i+1)}$ y S_{i+1} dados los valores

correspondientes al instante i , se requiere, por un lado, calcular la función de densidad conjunta de probabilidades del tiempo de espera y de la intensidad (T_{i+1} , Y_{i+1} , respectivamente) del siguiente temblor y por otro determinar los estados de daño D'_{mi} y D'_{di} de los componentes del sistema después de realizar las acciones de reparación del marco y/o el reemplazo de los disipadores de energía. Las decisiones relativas a estas acciones se presentan en la parte izquierda de la Fig. 3.1: a) si el daño acumulado en el marco estructural excede del nivel D_m , la reparación restituye al marco a la condición que tenía al finalizar su construcción; b) si el elemento disipador de energía falla o si el índice calculado de daño excede de D_d , dicho elemento se reemplaza por uno nuevo. La función de densidad de probabilidades de $d_{m(i+1)}$, $d_{d(i+1)}$ se obtendrá como función de S_i y de los valores D'_{mi} y D'_{di} . La pérdida L_i asociada con las consecuencias del i -ésimo temblor incluirá, entre otros costos, los de la reparación y el reemplazo citados.

Las distribuciones de probabilidades obtenidas según el párrafo anterior integran las probabilidades de transición entre los estados del sistema al final de los temblores consecutivos. Estas probabilidades dependen de la actividad sísmica en el sitio, de los criterios de diseño sísmico empleados y de las políticas de reparación y reemplazo adoptadas. Su determinación y empleo para obtener las condiciones que minimizan la función U , dada por la ec. 3.1, se presentan más adelante.

3.3 Probabilidad de transición de daños acumulados

Las probabilidades de transición que se emplean sirven para transformar los daños acumulados D_{mi} en el elemento estructural y D_{di} en el disipador al final del i -ésimo temblor, en los valores correspondientes $D_{m(i+1)}$ y $D_{d(i+1)}$ al final del $(i+1)$ ésimo temblor. En todos estos casos, los valores considerados son los existentes inmediatamente después de ocurridos los temblores, antes de realizar las acciones de reparación y/o reemplazo pertinentes. Por ello, al calcular las probabilidades de transición citadas, es necesario considerar la diferencia que podrá existir entre los niveles de daño acumulado al final del i -ésimo temblor y al inicio del $(i+1)$ ésimo. Los cálculos en cuestión dependerán también de la distribución de probabilidades de la intensidad Y_{i+1} .

Si se designa por $f_{md(i+1)}(u,v|D_{mi},D_{di})$ a la función de densidad de probabilidades conjunta de $D_{m(i+1)}$ y $D_{d(i+1)}$ dados D_{mi} y D_{di} y por $f'_{md(i+1)}(u,v|D'_{mi},D'_{di})$ a la densidad de probabilidades conjunta de las mismas variables, condicionada a los valores D'_{mi} y D'_{di} de los daños acumulados en el marco y disipador después de la reparación y/o reemplazo a continuación del i -ésimo temblor, se cumple lo siguiente:

$$f_{md(i+1)}(u, v | D_{mi}, D_{di}) = f'_{md(i+1)}(u, v | D'_{mi}, D'_{di}) \quad (3.3)$$

En esta ecuación,

$$\begin{aligned}
 D'_{mi} &= D_{mi} && \text{si } D_{mi} < D_m \\
 &= 0 && \text{si } D_{mi} \geq D_m \\
 \\
 D'_{di} &= D_{di} && \text{si } D_{di} < 1 \quad \text{y no se realiza reemplazo preventivo} \\
 &= 0 && \text{si } D_{di} \geq 1 \quad \text{o sí se realiza reemplazo preventivo}
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la incertidumbre relativa a la intensidad del (i+1)ésimo temblor, $f'_{md(i+1)}$ se expresa como sigue:

$$f'_{md(i+1)}(u, v | D'_{mi}, D'_{di}) = \int f'_{md(i+1)}(u, v | D'_{mi}, D'_{di}, y) f_{Y(i+1)}(y) dy \quad (3.4)$$

Las distribuciones marginales de probabilidades de D_{mi} y D_{di} se obtienen en forma recurrente a partir de la condición inicial del sistema. Para el caso en que no se tomen en cuenta las acciones de reemplazo preventivo, las relaciones de recurrencia son las siguientes:

$$\begin{aligned} f_{md(i+1)}(u, v) = & \int_0^1 \int_0^{D_0} f'_{md(i+1)}(u, v | m', d') f_{mdi}(m', d') dm' dd' \\ & + \int_0^1 \int_{D_0}^{\infty} f'_{md(i+1)}(u, v | 0, d') f_{mdi}(m', d') dm' dd' \\ & + \int_1^{\infty} \int_0^{D_0} f'_{md(i+1)}(u, v | m', 0) f_{mdi}(m', d') dm' dd' \\ & + \int_1^{\infty} \int_{D_0}^{\infty} f'_{md(i+1)}(u, v | 0, 0) f_{mdi}(m', d') dm' dd' \end{aligned} \quad (3.5)$$

La relación anterior puede expresarse así:

$$\begin{aligned} f_{md(i+1)}(u, v) = & \int_0^1 \int_0^{D_0} f'_{md(i+1)}(u, v | m', d') f_{mdi}(m', d') dm' dd' \\ & + \int_0^1 f'_{md(i+1)}(u, v | 0, d') f_{di}(d') P(D_{mi} > D_{D_0} | d') dd' \\ & + \int_0^{D_0} f'_{md(i+1)}(u, v | m', 0) f_{mi}(m') P(D_{di} > 1 | m') dm' \\ & + f'_{md(i+1)}(u, v | 0, 0) P(D_m > D_0, D_{di} > 1) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Es decir,

$$\begin{aligned} f_{md(i+1)}(u, v) = & E_{mdi}[f'_{md(i+1)}(u, v | D_{mi} < D_0, D_{di} < 1)] P(D_{mi} < D_0, D_{di} < 1) \\ & + E_{di}[f'_{md(i+1)}(u, v | D_{mi} > D_0, D_{di} < 1)] P(D_{mi} > D_0, D_{di} < 1) \\ & + E_{mi}[f'_{md(i+1)}(u, v | D_{mi} < D_0, D_{di} > 1)] P(D_{mi} < D_0, D_{di} > 1) \\ & + f'_{md(i+1)}(u, v | D_{mi} > D_0, D_{di} > 1) P(D_{mi} > D_0, D_{di} > 1) \end{aligned} \quad (3.7)$$

En esta ecuación, E_{mdi} , E_{mi} y E_{di} son esperanzas condicionales, tomadas con respecto a las distribuciones probabilísticas de (D_{mi}, D_{di}) , D_{mi} y D_{di} , respectivamente.

Las ecuaciones anteriores no toman en cuenta la posibilidad de reemplazo preventivo de los disipadores de energía, cuando la política correspondiente incluye, según se supone en este trabajo, no únicamente la sustitución de los elementos en caso de que tengan daño visible, sino también cuando la historia sísmica

lleva a concluir que el daño que se estima debe haberse acumulado hacen aconsejable dicha acción. Como se menciona en párrafos anteriores y se detalla más adelante, las decisiones de reemplazo preventivo se toman con base en un índice D_{rd} que depende de la historia sísmica y las características mecánicas iniciales del sistema. Este índice está correlacionado estadísticamente con D_{mi} y D_{di} , y por tanto la forma de tomarlo en cuenta en las ecs. 3.6 y 3.7 consistiría en incorporarlo como una tercera variable y trabajar la distribución conjunta correspondiente, con las consiguientes complicaciones numéricas.

3.4 Solución mediante el método de Monte Carlo

Ya sea que se considere o que se ignore la posibilidad de reemplazo preventivo de los disipadores de energía (ecs. 3.6 y 3.7), el cálculo de $f_{md(i+1)}$ puede hacerse mediante integración numérica a partir de la ec. 3.6 o mediante simulación de Monte Carlo, teniendo en cuenta la ec. 3.7; sin embargo, cualquiera de los dos procedimientos puede resultar excesivamente engorroso si se toma en cuenta que debe aplicarse un número suficientemente grande de veces para obtener estimaciones precisas de U según la ec. 3.1. De ahí que convenga pensar en simplificaciones y métodos alternativos. Uno de ellos consiste en aplicar métodos de Monte Carlo para simular valores de D_{mi} y D_{di} en cada evento y , a partir de dichos valores, determinar sus distribuciones de probabilidades. Otro método consiste en suponer la forma de las distribuciones en cuestión y orientar las simulaciones de Monte Carlo, conocidas la media y varianza, para estimar sus momentos. El segundo método tiene la desventaja de que hay que hacer estudios previos para adoptar una forma de distribución que sea suficientemente precisa, en especial para valores de D_m y D_d que se alcanzan únicamente para temblores excepcionalmente grandes, pero ofrece en cambio la ventaja de requerir un número menor de simulaciones para cada i .

Dada la dificultad de resolver el problema de acuerdo con lo dicho anteriormente, en el capítulo 7 se presenta un esquema alternativo para la obtención de la ec. 3.1, en el cual se utiliza el método de simulaciones de Monte Carlo.

3.5 Reemplazo preventivo de disipadores de energía

Cuando se toma en cuenta el reemplazo preventivo de los disipadores de energía, la decisión de este reemplazo se toma con base en un índice D_{rd} , según se explica en el subcapítulo 3.3.

Para el caso de sistemas de un grado de libertad el índice D_{rd} puede estimarse a partir de dos grupos de información: a) la historia sísmica y b) la relación entre intensidades e incremento del daño. La primera se expresa en términos de tiempos de ocurrencia e intensidades de temblores y la segunda mediante curvas intensidad-esperanza de incrementos de daño. Dados estos elementos, el índice D_{rd} puede obtenerse simplemente como las sumas de las esperanzas de los incrementos de daño D_{di} en los temblores ocurridos. Al realizar este cálculo, la influencia esperada de las acciones de reparación del marco estructural que se hayan llevado a cabo pueden tomarse en cuenta o ignorarse, dependiendo de las curvas intensidad-daño que se empleen. En el caso de sistemas complejos, el cálculo de D_{rd} es más complicado pero no se tratará en este trabajo.

4. MODELO ESTUDIADO

Aunque siempre es deseable realizar estudios sobre el comportamiento sísmico de sistemas estructurales reales, para así obtener estimaciones válidas de su respuesta y confiabilidad ante eventos sísmicos, muchas veces la complejidad del tipo de construcción y la estructuración de los sistemas citados conduce a efectuar grandes esfuerzos, en tiempo y costo, que pueden evitarse, sin introducir errores excesivos, mediante la formulación de modelos simplificados equivalentes. La ventaja de emplear modelos simplificados radica en que se pueden realizar estudios amplios de su comportamiento utilizando tiempos moderados de computadora. En este trabajo el estudio sistemático de los modelos para análisis de confiabilidad de sistemas estructurales se limita a marcos continuos de concreto reforzado con rigideces de entrepiso con variación aproximadamente lineal en la altura del edificio. Los sistemas reales se representan mediante un modelo simple de un grado de libertad, el cual se definirá de ahora en adelante como "marco convencional". Los procedimientos propuestos para obtener el marco convencional a partir de los sistemas reales se basan en criterios de equivalencia sencillos que se explican en los párrafos siguientes. La formulación del sistema simple con disipador equivalente, el cual se denomina "marco con disipador de energía", se realiza en forma sencilla a partir de las características de resistencia y rigidez del marco convencional. En forma rigurosa deberían desarrollarse igualmente criterios de equivalencia de sistemas complejos con disipadores de energía en todos sus niveles a sistemas simples con un disipador de energía. Sin embargo en este trabajo se optó por no proponer ningún tipo de criterio de diseño en especial para este tipo de sistemas. En su lugar se opta por hacer un estudio paramétrico en el cual se igualan las características del marco con disipador con las características fundamentales del marco convencional.

4.1 Sistemas simples equivalentes del marco convencional

4.1.1 Criterios de equivalencia de rigidez y masa

Tomando como base el modelo desarrollado en Díaz, Esteva y García (1997) para sistemas equivalentes de un grado de libertad, partimos de la ecuación de movimiento de un sistema lineal sujeto a la aceleración \ddot{x}_0 en su base

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = - M J \ddot{x}_0 \quad (4.1)$$

donde M, C y K son las matrices de masas, amortiguamiento y rigideces respectivamente, x el vector de desplazamientos relativos al terreno y J un vector unitario asociado con los grados de libertad paralelo a la dirección considerada del movimiento del terreno y nulos para los otros grados de libertad. Si la matriz C satisface los requisitos que permiten desacoplar los amortiguamientos asociados con los diversos modos de vibración, la ec. 4.1 se expresa para un modo cualquiera de vibración como:

$$\ddot{y} + 2 \xi \omega \dot{y} + \omega^2 y = - \alpha \ddot{x}_0 \quad (4.2)$$

donde ξ es el coeficiente de amortiguamiento modal, y es la respuesta de un sistema de un grado de libertad asociado al modo natural que interesa, $\omega^2 = k/m$ el cuadrado de la frecuencia modal, k, m y α , la rigidez, la masa y el factor de participación modales, respectivamente, que para una configuración Z son definidos como:

$$k = Z^T K Z \quad (4.3)$$

$$m = Z^T M Z \quad (4.4)$$

$$\alpha = \frac{Z^T M J}{Z^T M Z} \quad (4.5)$$

Si la configuración Z se normaliza de tal forma que $Z^T M J = m$, α será igual a la unidad. Las ecs. 4.3, 4.4 y 4.5 con $\alpha=1$ constituyen los criterios de equivalencia (Fig. 4.1).

Si se supone que la parte más significativa de la respuesta estructural proviene de la contribución del modo fundamental es posible trabajar, sin introducir errores excesivos, con rigideces de entrepiso (que permiten calcular las fuerzas cortantes de entrepiso en forma independiente de los desplazamientos de los nudos que no se encuentran en los niveles de piso que limitan el entrepiso de interés) en vez de emplear la matriz de rigideces completa. En tal caso la matriz de rigideces modal, κ , se puede obtener de la siguiente manera:

$$\kappa = \delta^T R \delta \quad (4.6)$$

donde R es la matriz diagonal de rigideces laterales de entrepiso y δ es el vector de deformaciones laterales de entrepiso asociado a la configuración modal Z .

4.1.2 Criterios de equivalencia de resistencia

Se sigue el mismo criterio desarrollado en Díaz, Esteva y García (1997), con algunas simplificaciones adicionales. Al igual que en la referencia mencionada, se toma el caso en que en el diseño se haya aplicado un criterio del tipo "columna fuerte-trabe débil", en el cual se supone conocido el mecanismo de falla dado en la Fig. 4.2. En el caso determinístico se supone que la resistencia de las secciones críticas que no participan en el mecanismo de falla pueden asignarse de manera que en todo el marco se satisfaga el equilibrio sin que en ninguna sección se exceda la capacidad estructural y, en el caso probabilístico, porque las relaciones entre los factores de seguridad en las diversas secciones críticas se deberán haber seleccionado de manera que la probabilidad de ocurrencia de mecanismos con articulaciones plásticas en las columnas es despreciable (a excepción, por supuesto, de las articulaciones que se forman en los extremos inferiores de las columnas del primer entrepiso).

En el mecanismo de la Fig. 4.2 las articulaciones plásticas se presentan en los extremos de las vigas en todos los niveles. Este tipo de mecanismos es típico de los entrepisos inferiores en estructuras sujetas a cargas verticales y horizontales combinadas. En los entrepisos medios y superiores, el mecanismo típico es diferente, pues las articulaciones en las vigas suelen formarse en su parte media y en uno de sus extremos; sin embargo, se adopta el mecanismo de falla de la Fig. 4.2 para estar en congruencia con el método de solución y comportamiento que se tiene para los análisis inelásticos de los sistemas de marcos, ya que el programa de análisis utilizado solo permite la aparición de articulaciones en los extremos de los elementos estructurales. Para el mecanismo supuesto, la condición de falla se presenta cuando el trabajo de las fuerzas externas actuando sobre los desplazamientos es igual al trabajo de las fuerzas internas de fluencia actuando sobre las deformaciones concentradas en las articulaciones plásticas.

Sea F_y el vector de carga que produce el mecanismo de falla; se representa como el producto de un escalar, α_y , multiplicado por un valor Q que representa una forma especificada. Si δ_f es el vector de desplazamientos efectivos de los puntos de aplicación de las fuerzas F_i , y θ el de deformaciones (giros) asociados con las fuerzas internas (momentos) de fluencia, la igualdad de trabajos internos y externos se expresa como:

$$\alpha_y Q^T \delta_f = M_y^T \theta \quad (4.7)$$

donde el subíndice y asociado con α_y y M_y representan la condición de equilibrio del sistema en condiciones de fluencia. De la ecuación anterior, se obtiene lo siguiente

$$\alpha_y = \frac{S_i}{Q^T \delta_F} \quad (4.8)$$

en donde

$$S_i = \sum_i \theta_i M_{y_i} = \theta \sum_{s=1}^{n_c} M_{y_{os}} + \theta \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^{n_b} (M'_{y_{rs}} + M''_{y_{rs}}) \quad (4.9)$$

donde

- θ = giro de los ejes de las columnas
- n_c = número de columnas
- N = número de pisos
- n_b = número de crujiás
- M_{yca} = momento de fluencia en el extremo inferior de la columna que corresponde al eje s del primer entrepiso.
- M'_{ys} = momento de fluencia en la articulación del extremo izquierdo de la viga del nivel r , crujiás.
- M''_{ys} = momento de fluencia en la articulación del extremo derecho de la viga del nivel r , crujiás.

4.1.3 Criterios de equivalencia de la ductilidad

Para la ductilidad del sistema se considera que, dado que el sistema real se diseña para presentar un cierto comportamiento global, especificado por el factor de comportamiento sísmico, Q , el sistema simple deberá representar también dicho comportamiento global. Por lo anterior, en el presente trabajo se acepta que el sistema simple desarrolla una ductilidad nominal μ equivalente al factor de comportamiento sísmico Q . Lo anterior tiene sus limitaciones según lo demuestran los resultados obtenidos por P. Santa Ana Lozada (1999), donde los valores de las ductilidades de los sistemas de varios grados de libertad (SVGL) son mayores a las que presentan los sistemas de un grado de libertad (SIGL).

4.2 Incertidumbres del sistema del modelo equivalente

En este trabajo interesa estimar la respuesta no lineal de estructuras diseñadas de acuerdo a criterios específicos, por lo que sería adecuado suponer las cargas, resistencias y propiedades mecánicas reales (más probables) de los sistemas. Dado que en esta etapa del trabajo no se busca hacer un análisis probabilista intenso que incluya la incertidumbre de las propiedades y cargas del sistema estructural, únicamente se toman las propiedades medias de la estructura tanto geométrica como de resistencia, así como los valores medios de las cargas que actúan en ella.

Para calcular la media de m y κ teniendo en cuenta las ecs. 4.4 y 4.6, conviene aprovechar la propiedad de estacionaridad del cociente $Z^T K Z / Z^T M Z$ cuando en vez de trabajar con la configuración Z se emplea una aproximación a ella; por ejemplo, puede tomarse Z como el vector modal que se obtiene si se suponen R y M constituidas por los valores esperados de sus elementos. Bajo estas condiciones, los valores esperados de m y κ son los dados a continuación:

$$E(m) = \sum_i Z_i^2 E(M_i) \quad (4.10)$$

$$E(\kappa) = \sum_i \delta_i^2 E(R_i) \quad (4.11)$$

donde M_i y R_i son los elementos de las matrices M y R .

El cálculo de $E(M_i)$ y $E(R_i)$ se puede realizar utilizando aproximaciones de primer orden (Benjamin y Cornell, 1981). En el caso de las R_i , éstas también se pueden calcular utilizando expresiones

aproximadas como las propuestas por Wilbur (Díaz, Esteva y Flores, 1990), en donde la incertidumbre será la incorporada por las variables que intervienen en su cálculo. Sin embargo, en esta parte del trabajo se hacen algunas simplificaciones con respecto a lo presentado en Díaz, Esteva y García (1997) para la obtención de los valores de las variables anteriores. Estas se calculan suponiendo que los valores medios de Z_i , d_i , M_i y R_i se obtienen considerando a la estructura con valores medios de sus propiedades geométricas, de resistencia y cargas. Las rigideces laterales R_i se calculan haciendo actuar sobre la estructura un sistema de cargas laterales de una configuración específica (equivalente a la del modo fundamental) y calculando la relación V_i/X_i para cada entrepiso, donde V_i y X_i son el cortante y la deformación lateral del entrepiso i respectivamente.

De igual forma la esperanza de α se obtiene mediante la siguiente aproximación:

$$E(\alpha) = \frac{\sum Z_i E(M_i)}{\sum Z_i^2 E(M_i)} \quad (4.12)$$

El cálculo de la resistencia media se hace a partir de la definición de S_i (ec. 4.9). De esta resulta que

$$E(S_i) = \theta \sum_{i=1}^{n_c} \bar{M}_{yos} + \theta \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^{n_b} (\bar{M}_{yrs} + \bar{M}_{yrs}^r) \quad (4.13)$$

donde

\bar{M}_{yos} = valor medio del momento de fluencia en el extremo inferior de la columna que corresponde al eje s del primer entrepiso.

\bar{M}_{yrs} = valor medio del momento de fluencia en la articulación del extremo izquierdo de la viga del nivel r , crujía s .

\bar{M}_{yrs}^r = valor medio del momento de fluencia en la articulación del extremo derecho de la viga del nivel r , crujía s .

En Díaz, Esteva y García (1997) se presentan también algunas simplificaciones para calcular el valor medio de la resistencia del sistema equivalente. Los valores de la resistencia a flexión de la viga se calculan suponiendo los valores medios, tanto para las dimensiones de las secciones como para las resistencias del concreto y del acero de refuerzo. No se supone incertidumbre en la cantidad de acero de refuerzo especificada en el diseño. La resistencia media de la columna en el primer entrepiso se calcula también para secciones con valores medios de dimensiones y resistencia del material. Puesto que los valores de \bar{M}_{yos} dependen de la fuerza axial \bar{P} que actúa sobre la columna, dado que el modelo de comportamiento histerético del elemento que se utiliza en el análisis no toma en cuenta la interacción momento-carga axial, se hace una simplificación en la que la resistencia media de la columna se calcula suponiendo que sobre ella actúa una fuerza axial igual a la producida por las cargas verticales medias, la cual no cambia durante la historia sísmica.

La ductilidad media del sistema se calcula de acuerdo con la expresión siguiente (Esteva y Ruiz, 1989)

$$\bar{\mu} = \mu e^{-0.3V_{\mu}} \quad (4.14)$$

Aquí V_{μ} es el coeficiente de variación de la ductilidad; para este estudio se toma un valor de $V_{\mu}=0.2$.

4.3 Modelo equivalente del marco con disipador

Como se explicó al inicio del capítulo, las características del modelo del marco con disipador de energía se conocen una vez que se tiene definido al marco convencional, lo que se hace en términos de su resistencia, su rigidez lateral y su masa. La resistencia y la rigidez lateral del marco con disipador se consideran las mismas que las del marco convencional, pero en este caso tales propiedades son proporcionadas por las contribuciones de los elementos del marco y las del disipador de energía

De acuerdo con lo anterior, en el marco con disipador la rigidez y la resistencia del sistema están dadas por (Fig. 4.1)

$$k = k_m + k_d \quad (4.15)$$

$$R = R_m + R_d \quad (4.16)$$

Donde k_m y R_m son respectivamente la rigidez y la resistencia, que proporcionan los elementos que forman el marco y k_d y R_d son la rigidez y resistencia que proporciona el elemento disipador de energía.

4.4 Modelos de comportamiento histeréticos de los elementos

A fin de evaluar el daño que sufre una estructura sometida a perturbaciones sísmicas, es necesario contar con modelos de daño estructural de las partes que la forman. Las pruebas han demostrado que el daño estructural es causado principalmente por dos variables: la incursión de la estructura o elemento a grandes deformaciones y la inversión repetida de esfuerzos o carga cíclica. Para elementos de concreto reforzado se necesita un modelo matemático adecuado que sea capaz de simular el comportamiento no-lineal de las estructuras. En Díaz (1991) se presenta una recopilación sobre modelos para representar el comportamiento de elementos estructurales. En el presente trabajo se adoptan modelos de daño estructural para elementos de concreto reforzado y para los disipadores de energía. Para los elementos de concreto reforzado se usa un modelo desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM; este modelo ofrece una alternativa bastante simple para representar el comportamiento del elemento en la unión viga-columna y en él se toma en cuenta el deterioro de la resistencia ante carga cíclica, además de que presenta un indicador del daño en el elemento. Este indicador de daño está basado en el modelo de Wang y Shah (1987). Para el elemento disipador de energía se propone un modelo basado en el desarrollado por Aguirre y Sánchez (1990) para un caso específico. En los párrafos siguientes se describen de manera detallada los modelos mencionados.

4.4.1 Modelo para los elementos del sistema de marco

Las propiedades mecánicas de un miembro estructural o de una de sus secciones críticas sujetas a ciclos alternantes de deformación se representan mediante curvas carga-deformación como la mostrada en la Fig. 4.3. El modelo considera que tanto la rigidez como la resistencia se degradan en función del daño

acumulado en cada sentido. El modelo se define por seis parámetros: F_y , K_1 , K_2 , X_F , C y α . Los tres primeros son la resistencia a la fluencia, la rigidez inicial elástica y la rigidez inelástica, respectivamente y definen la forma de la curva primaria de la relación carga-deformación, X_F es la deformación a la falla y C y α son parámetros que definen la extensión relativa del daño.

Al igual que en el modelo de Wang y Shah (1987), se considera que el daño depende de las deformaciones máximas que sufre el elemento en cada ciclo de carga y está representado por el coeficiente β definido como sigue para cada dirección del movimiento

$$\beta = C \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{X_F} \quad (4.17)$$

X_i es la deformación máxima del elemento en el ciclo i , N es el número de ciclos y C un parámetro de daño que en este estudio se considera igual a la unidad.

En este modelo se supone que la variación del daño con respecto a β está dada por la expresión

$$D = f(\beta) = 1.0 - e^{-\alpha\beta} \quad (4.18)$$

donde el coeficiente $\alpha=0.602$ se calcula a partir de los datos experimentales obtenidos por Wang y Shah (Fig. 4.4).

La expresión anterior supone que la falla en el elemento estructural ($D = 1$) no sucede cuando β alcanza un valor de la unidad, sino que el elemento puede soportar aún más daño el cual se incrementa de acuerdo con la ec. 4.18. Esta modificación permite que el daño en el elemento se acumule en forma más lenta y su comportamiento se aproxime al mostrado en las estructuras reales.

El efecto del daño anterior se introduce como una disminución en la capacidad de carga del elemento, como se define en la siguiente ecuación.

$$F_D (X_i) = F (X_i) (1.0 - D) \quad (4.19)$$

En esta, $F(X_i)$ es la carga correspondiente a la deformación X_i en la curva primaria de la relación carga-deformación.

La curva carga-deformación histerética (Fig. 4.3) que representa el comportamiento del elemento se define como sigue:

- 1) Una curva primaria bilineal determinada por F_y , X_y y K_1 y K_2 , definidos anteriormente.
- 2) La rigidez a la descarga, igual a K_1 .
- 3) El punto G se determina usando la ec. 4.19, con D calculada con la ec. 4.18. Este punto representa el nuevo nivel de carga que alcanza el elemento para el nivel de deformación máxima en ese ciclo

para la siguiente carga en esa dirección.

- 4) Cuando se invierte el signo de la carga, la rigidez en ese sentido está dada por la pendiente de la línea que conecta al punto sobre el eje de las deformaciones en que se invierte la carga (punto C o F de la Fig. 4.3a), al punto del nuevo nivel de carga que alcanza el elemento para el nivel de deformación máxima en la otra dirección (punto D ó G).
- 5) Cuando se alcanza la deformación máxima que se tuvo en el ciclo anterior en cualquiera de las direcciones y se continúa deformando en esa dirección, la respuesta carga-deformación sigue una trayectoria en la que se supone la misma rigidez que traía hasta alcanzar la curva primaria (punto H).
- 6) Una vez alcanzada la curva primaria se mueve sobre ella hasta que sucede una nueva descarga (punto I).
- 7) Si en un ciclo cualquiera (Fig. 4.3b), la descarga sucede antes de alcanzar el punto de máxima deformación en ese sentido (punto L), se acumula daño en ese ciclo si se alcanza el punto M. Cuando se presente nuevamente una recarga en esa dirección, la rama de comportamiento del elemento se dirige hacia el punto de máxima deformación en esa dirección (línea OG') con una resistencia disminuida por el daño en el ciclo anterior (punto G').
- 8) Si la descarga (punto P) sucede después de alcanzar el punto de máxima deformación (punto G') y antes de alcanzar la curva primaria (punto H), se acumula daño en este ciclo si se alcanza el punto Q, y la deformación en el punto P será la nueva deformación máxima en esa dirección (Fig. 4.3b).
- 9) Solo se toma en cuenta el incremento de daño en una dirección cuando la deformación de descarga en cualquier rama es del mismo signo que la del sentido en que se dirigía y se calcula como la diferencia de la deformación de descarga y la deformación de recarga justamente anterior (esta última deformación será cero cuando su signo sea contrario al signo de la deformación de descarga).
- 10) La rigidez y resistencia del elemento en un sentido se hace nula cuando se alcanza su deformación de falla, ya sea moviéndose por la curva primaria o por cualquier rama de recarga en que se alcance esa deformación antes de llegar a la curva primaria (Fig. 4.3c).

Para sistemas simples de un grado de libertad, es posible emplear a nivel global del sistema la definición de daño acumulado de la ec. 4.18. De esta manera puede estudiarse la influencia de este último en la respuesta y la confiabilidad de estructuras ante nuevos eventos sísmicos. Para sistemas de un número elevado de grados de libertad, la definición del daño acumulado a nivel global no es tan simple, en particular si el nivel de daño acumulado se emplea como indicador de la probabilidad de falla del sistema. La dificultad proviene de la posibilidad de ocurrencia de diversos modos de falla, cada uno de los cuales involucra fallas locales en un conjunto distinto de miembros o secciones críticas.

4.4.2 Modelo para el disipador

Para el elemento disipador de energía se supuso una ley de comportamiento carga-deformación bilineal. Dadas las características que se buscan para este tipo de elementos, se consideró que presentaba un

comportamiento histerético estable ante un número elevado de ciclos de carga (Fig. 4.5) La curva de fatiga (número de ciclos a la falla-deformación) dada en la Fig. 4.6 se obtuvo de los estudios experimentales hechos por Aguirre y Sánchez (1990) para el elemento disipador diseñado por ellos (subcapítulo 2.1.3.4, disipación por rolado).

A los resultados experimentales se ajustó una curva del tipo

$$N_{fd} = e^{(ax^b + c)} \quad (4.20)$$

donde N_{fd} es el número de ciclos a la falla para una deformación x (en cm.). a , b y c son parámetros de ajuste iguales a 127.51, -0.02 y -120.753, respectivamente.

Este tipo de comportamiento se considera representa las características generales que debe tener cualquier disipador que se quiera utilizar para el diseño sísmico de edificios.

Para el caso del sistema simple de marco con disipador de energía que se estudia en este trabajo, se realizan algunas consideraciones racionales para tratar de representar mediante un solo disipador el comportamiento global que puedan tener los disipadores que formen parte de una estructura de múltiples niveles. Como ya se mencionó, las resistencias de los elementos de concreto reforzado y de los disipadores de energía son función del número de ciclos de carga a que puedan verse sometidos durante su respuesta ante eventos sísmicos, donde la capacidad de resistir cargas cíclicas favorece más a los disipadores que a los elementos del marco. Por esta razón es lógico pensar que cuando en estructuras con disipadores de energía los elementos del marco alcancen su deformación de falla, el disipador tenga capacidad de resistencia de reserva para resistir nuevas cargas.

De acuerdo con lo anterior se propone una forma de obtener la curva de fatiga para representar el comportamiento del elemento disipador en el sistema simple equivalente.

Supóngase que el disipador del sistema simple representa un conjunto de disipadores del tipo de Aguirre y Sánchez (1990) conectados en paralelo, y donde el comportamiento de cada disipador del conjunto es semejante.

Para la deformación de falla de los elementos del marco se considera que el elemento disipador global del sistema tiene una capacidad de carga, en número de ciclos a la falla, N_{fdF} igual a γ veces el número de ciclos a la falla del marco para esa deformación, N_{fmF}

$$N_{fdF} = \gamma N_{fmF} \quad (4.21)$$

De acuerdo con esto la deformación x_{dF} que debe presentar cada elemento disipador del conjunto en el momento en que se alcanza x_F , la deformación a la falla del marco, deberá ser igual a aquella para la cual tenga una capacidad de N_{fdF} ciclos a la falla.

La deformación x_{dF} se obtiene a partir de las curvas de fatiga del marco y del disipador de la siguiente forma

Supóngase que el número de ciclos a la falla para una deformación x cualquiera está dada por $N_{fm} = 1/D_x$ donde D_x es el deterioro de resistencia correspondiente a dicha deformación para un único ciclo de carga (ec. 4.18). Por lo tanto

$$N_{fm} = \frac{1}{1 - e^{-\alpha \frac{x}{x_F}}} \quad (4.22)$$

En realidad, de acuerdo con la ec. 4.8, el número el número de ciclos a la falla para una deformación dada es infinito con incrementos del daño cada vez menores conforme aumenta el número de ciclos.

De la expresión anterior se tiene que conforme se tiende a la deformación de falla x_F , el número de ciclos a la falla tiende a

$$N_{fmF} = \frac{1}{1 - e^{-\alpha}} \quad (4.23)$$

Para un valor de y dado y utilizando la ec 4.20 se tiene que

$$x_{dF} = \left[\frac{\text{Ln } N_{fdF} - c}{a} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (4.24)$$

la deformación en un elemento disipador individual para la cual se tienen N_{fdF} ciclos a la falla.

Una vez obtenido el valor de la deformación que deben presentar los elementos disipadores del conjunto a la deformación x_F del sistema, solo queda establecer las características del disipador global del sistema.

Sea

$$\frac{x_{dmax}}{x_{dmax}} = \frac{x_F}{x_{dF}} \quad (4.25)$$

donde x_{dmax} es la deformación máxima del disipador global y x_{dmax} la deformación máxima de un solo disipador que del conjunto (esta deformación se obtiene de la ec. 4.20 para $N_{fd}=1$). Bajo esta hipótesis obtenemos

$$x_{dmax} = \frac{x_F x_{dmax}}{x_{dF}} \quad (4.26)$$

Si se considera además que el comportamiento del disipador global es similar al que presenta un solo disipador del conjunto tenemos que

$$N'_{fd} = a \left(\frac{x \cdot x_{dmax}}{x_{dmax}} \right)^b + c \quad (4.27)$$

la ecuación del número de ciclos a la falla para una deformación x del sistema en el disipador global.

5. CASOS ESTUDIADOS

Se estudian tres edificios de 5, 10 y 15 niveles, respectivamente (Fig. 5.1). Constan de planta cuadrada, con tres marcos en cada dirección en los casos de 5 y 10 niveles y cuatro marcos en el de 15 niveles. Las alturas de entrepiso son iguales, excepto la del primero. Los edificios se consideran desplantados en la zona blanda del valle de México.

Las estructuras se diseñan como marcos dúctiles ($Q=4$) de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del DF (Departamento del Distrito Federal, 1993). Los sistemas se diseñan para tres coeficientes sísmicos: 0.2, 0.4 y 0.6. (Estos coeficientes se reducen por el factor de comportamiento sísmico empleado.) El estudio se realiza sobre uno de los marcos interiores, cuya respuesta se considera representativa de la del edificio completo. El análisis y diseño de dicho marco se lleva a cabo considerando las fuerzas laterales y la carga vertical correspondientes a su rigidez y área tributaria. En la Tabla 5.1 se presentan las dimensiones de vigas y columnas de los marcos estudiados. Los edificios de diseñaron para presentar periodos de vibración de 0.5s, 1.0s y 1.5s para los casos de 5, 10 y 15 niveles, respectivamente.

5.1 Sistemas equivalentes

5.1.1 Marco convencional

Los sistemas simples que se estudian corresponden a los obtenidos a partir de los sistemas reales anteriores, al aplicar los criterios de equivalencia dados en el subcapítulo 4.1. En la Tabla 5.2 se presentan los valores de la masa, rigidez y resistencia que se tienen para el sistema simple correspondiente a cada caso estudiado del sistema real.

5.1.2 Marco con disipador de energía

El marco con disipador de energía se obtiene a partir del marco convencional. Bajo la hipótesis de que el marco con disipador se diseña de tal forma que presenta las mismas características globales de rigidez y resistencia que el marco convencional, se analizan varios casos en los cuales se considera que el marco y el disipador aportan diferentes proporciones a la rigidez y la resistencia totales. Para ello se definen los siguientes parámetros:

- a) r_k : relación de la rigidez lateral, k_d , que toma el disipador a la rigidez total del sistema, k .
- b) r_R : relación de la resistencia lateral, R_d , que toma el disipador a la resistencia total del sistema, R .

En la Tabla 5.3 se presentan los valores de r_k y r_R que se estudian.

5.2 Incertidumbres en las propiedades y cargas del sistema

Las propiedades reales que presenta una estructura no pueden conocerse en forma precisa dadas las incertidumbres asociadas a los procesos de fabricación y construcción de la misma. De igual forma no es posible predecir las cargas a las cuales estará expuesta durante su vida útil. Además, los valores de las cargas actuantes, resistencias y propiedades geométricas que se utilizan y obtienen del diseño de las estructuras corresponden a las combinaciones de factores cargas y valores nominales supuestos en el diseño, los cuales se adoptan para tomar en cuenta las incertidumbres asociadas a las cargas y resistencias de la estructura.

Dado que se desea estimar la respuesta sísmica de estructuras diseñadas de acuerdo con criterios específicos, es de interés suponer para las cargas y las resistencias que se emplean para estimar dicha respuesta sus valores reales (más probables) en vez de los nominales o los más desfavorables supuestos para fines de diseño.

En un estudio riguroso en el que se tratara de estimar la distribución probabilística de esa respuesta, sería necesario tomar en cuenta la distribución probabilística de las propiedades mecánicas y cargas de la estructura. El tomar en cuenta las incertidumbres asociadas con estas variables implicará la conveniencia de hacer uso de métodos de simulación de Monte Carlo u otro tipo de métodos más complicados.

En este trabajo no se trató de hacer un estudio probabilista detallado, por lo que para los análisis de

respuesta sísmica se hicieron asignando a las propiedades mecánicas y cargas de las estructuras sus valores esperados.

En el caso de las cargas gravitacionales, sus valores medios se calcularon de acuerdo con lo propuesto por Meli (1976)

$$W_{dM} = m_{wM}(1 + 2C_{wM}) \quad (5.1)$$

$$W_{dV} = m_{wV}(1 + 2C_{wV}) \quad (5.2)$$

donde W_{dM} y W_{dV} son las cargas nominales muertas y vivas, respectivamente, m_{wM} y m_{wV} los valores medios de dichas cargas y C_{wM} y C_{wV} sus coeficientes de variación. En este trabajo se tomaron valores de $C_{wM}=0.08$ y $C_{wV}=0.30$.

Las resistencias esperadas se calcularon en forma simplificada suponiendo los valores de las dimensiones de los miembros estructurales, así como de las resistencias de los materiales.

Para la definición de los sistemas simples de referencia, sus propiedades se obtuvieron a partir de las cargas y propiedades medias de los sistemas complejos.

5.3 Excitación sísmica

Los sistemas se analizan ante movimientos del suelo para diferentes intensidades sísmicas. La incertidumbre en el movimiento se debe tomar en cuenta utilizando una familia de temblores característicos de la zona en que se considera desplantada la estructura y de la intensidad sísmica que interese.

Dado que en este estudio no se contaba con una cantidad suficiente de registros sísmicos reales, ni del lugar ni de las intensidades requeridas, se optó por emplear una familia de sismos simulados con características similares a las del temblor del 19 de septiembre de 1985 registrado en SCT (Grigoriu, Ruiz y Rosenblueth, 1988). Para el caso de intensidades mayores o menores que las del sismo mencionado se introdujeron factores de escala que afectaban a las amplitudes del movimiento, sin alterar su variación en el tiempo.

La medida de la intensidad que se tomó aquí fue la de la máxima aceleración espectral. La familia de sismos se escaló para representar la intensidad buscada. El parámetro de intensidad que se tomó finalmente en el estudio fue una intensidad normalizada, y/y_m , donde y es la intensidad que interesa y y_m es una intensidad de normalización base. En este caso la intensidad de normalización base que se tomó fue la máxima ordenada espectral del sismo del 19 de septiembre de 1985.

6. RESULTADOS

El análisis sísmico de las estructuras se realizó utilizando el programa de computadora DRAIN-2D (Powell, G H, 1973) al cual se le añadieron los modelos de comportamiento histerético propuestos para los elementos del marco y el dissipador de energía.

6.1 Comparación de respuestas

En esta sección se hace una comparación entre la respuesta de los sistemas reales con respecto a la que se obtiene con los sistemas equivalentes.

La comparación de esta respuesta no es tan directa, ya que primero es necesario definir el parámetro que se va a comparar. En el caso de los sistemas simples el parámetro de respuesta que es fácilmente elegible es el daño que sufren los elementos estructurales, dado por la variable D de la ec. 4.18, ya que es un indicador único, por existir un solo modo de falla. Sin embargo, en el caso de los sistemas reales no es posible elegir este parámetro, debido a la posible ocurrencia de varios modos de falla. Por lo tanto se decidió tomar un índice de respuesta que fuera comparable entre ambos sistemas. El parámetro elegido fue el índice de daño de entrepiso

$$I_{ki} = \frac{K_o - K_s}{K_o} \quad (6.1)$$

donde K_o es la rigidez inicial del sistema y K_i la rigidez secante asociada con la deformación máxima Díaz, Esteva y García (1997). En el caso del sistema simple este índice es único. Para el sistema real este índice es distinto para cada entrepiso. En este caso se toma como índice de respuesta para toda la estructura al máximo valor de I_{ki} de entre todos los entrepisos.

En las Figs. 6.1 a 6.3 se muestran los resultados obtenidos al analizar los sistemas reales y simples sin disipador de energía con propiedades medias para diferentes intensidades sísmicas. Para cada intensidad se analizaron los sistemas ante cada temblor de la correspondiente familia de sismos. En las Figs. 6.1 y 6.2 se dan los resultados de los sistemas reales y simples, respectivamente. En las mismas figuras se muestra con línea continua la variación de la respuesta media. En la Fig. 6.3 se presenta la respuesta media para ambos sistemas. En esta figura se puede notar que para el caso de los sistemas de 15 niveles la respuesta media entre los dos sistemas es muy parecida en un intervalo de intensidades de 0.8 a 1.25. Las diferencias se hacen más grandes conforme se disminuye el número de niveles de la estructura. En estos casos se encuentra que los sistemas reales presentan valores mayores del índice de respuesta I_k que los sistemas simples. Otro punto que debe tomarse en cuenta es la dispersión de las respuestas, que es mayor en los sistemas simples.

Los resultados anteriores muestran que los resultados que se obtengan con el modelo simple tendrán que ser interpretados y transformados para representar la respuesta de sistemas reales.

6.2 Influencia del disipador de energía

Como se mencionó en el subcapítulo 4.4.2 el disipador de energía debe presentar un comportamiento que le permita soportar muchos ciclos de carga y deformaciones grandes sin que sufra gran deterioro en su capacidad resistente.

El modelo de comportamiento propuesto para el elemento disipador de energía supone que para una deformación igual a la de falla del marco ante carga monotónica el disipador resiste cuando menos tantos ciclos de carga antes de fallar como los que son necesarios para que el marco alcance un índice $D=1$ con ciclos de la misma amplitud. La influencia de la capacidad del disipador en la respuesta del sistema se estudia considerando tres diferentes casos de capacidad de ciclos a la falla, N_{dif} , en la deformación de falla del marco iguales a 1, 2 y 5 veces el número de ciclos a la falla del marco, N_{mf} .

En las Figs. 6.4 a 6.21 se presentan los resultados del análisis que se hizo para los diferentes casos estudiados. En ellas se presentan los resultados del daño medio en el marco convencional así como el daño medio en el marco y el disipador del marco con disipador de energía. En estas figuras se observa lo siguiente:

- a) En general los sistemas con disipadores de energía con relaciones de $r_k = r_R = 0.75$ presentan valores del daño con la intensidad menores que los que se obtienen para el caso en que $r_k = r_R = 0.50$, tanto en el marco como en el disipador, para todos los casos de periodos, coeficientes de diseño y ciclos de falla del disipador estudiados.
- b) La comparación de la respuesta de los sistemas con disipador de energía con respecto a los sistemas convencionales muestra que el daño en el marco de ambos sistemas es parecido para intensidades bajas (el valor de estas "intensidades bajas" depende del periodo del sistema y el coeficiente de diseño). Para intensidades sísmicas intermedias el daño en el marco de los sistemas con disipador de energía disminuye con respecto al del sistema convencional. La magnitud de esta disminución varía dependiendo del periodo del sistema, coeficiente de diseño y relación de rigidez y resistencia del sistema marco-disipador. En algunos casos la disminución del daño en el marco es de casi un 50%. Para intensidades altas los daños en el marco de ambos sistemas vuelven a ser parecidos.

- c) El daño en el marco del sistema con disipador de energía presenta poca variación (casi nula) con respecto al número de ciclos a la falla del disipador para una deformación igual a la de falla del marco. El marco sufre en general daños considerables antes de que el disipador de energía comience a mostrar daños apreciables. Los daños en el disipador son mayores conforme se disminuyen los ciclos a la falla, N_{mf} ; sin embargo, como se dijo antes, no se observa una variación apreciable del daño en el marco aún para distintos niveles del daño en los diferentes casos de disipador estudiados, para una misma intensidad. Este comportamiento puede deberse a que a daños pequeños del disipador la disminución de su resistencia no influye apreciablemente en las deformaciones máximas y ciclos a la carga del sistema. Por otro lado, para las intensidades en que se tiene un daño grande en el disipador los daños en el marco son igualmente grandes y en estos casos el programa de análisis empieza a mostrar inestabilidades numéricas que provocan la terminación del mismo cuando se alcanza un cierto límite del daño.
- d) Los resultados muestran que el disipador se comporta en forma bastante estable, sin sufrir daños apreciables hasta intensidades normalizadas de alrededor de 1.4 para casi todos los casos. En el caso de sistemas con $T=1.0$ y $c=0.2$ el criterio de diseño provoca que el disipador se dañe a intensidades normalizadas de alrededor de 1.0 para el caso en que $N_{mf}=N_{mf}$. Cuando se toman coeficientes de diseño altos ($c=0.6$) el disipador alcanza intensidades normalizadas altas sin sufrir deterioro para los casos de ciclos a la falla estudiados. Como se dijo antes, no se tomó una capacidad de falla en el disipador menor a $N_{mf}=N_{mf}$ debido a que un caso así no estaría representando la filosofía del diseño de sistemas con disipadores de energía.

6.3 Daño acumulado en marcos convencionales

El sistema de referencia definido en el subcapítulo 4.1 se utiliza para estudiar el efecto del daño acumulado en las estructuras. Se analizan los casos correspondientes a los tres edificios de concreto reforzado de 5, 10 y 15 niveles descritos en el capítulo 5.

Se analiza el daño en las estructuras dado un daño inicial y una intensidad sísmica. El estudio se realiza de la siguiente forma:

Para cada periodo y coeficiente de diseño estudiado:

- Se hace un análisis del sistema para diferentes intensidades sísmicas, suponiendo que no se tiene daño inicial en la estructura. Se toman intensidades normalizadas entre 0 y 2.0. Para cada intensidad se somete a la estructura a la familia de acelerogramas simulados escalados a la intensidad buscada.
- De los resultados obtenidos en el inciso a) se escogen varias estructuras dañadas con las cuales se cubra un intervalo amplio de dichos daños. Estas estructuras se toman como bases para el análisis de sistemas con daños iniciales.
- Las estructuras con daño inicial se someten a la familia de acelerogramas considerando diferentes intensidades sísmicas. Las intensidades sísmicas estudiadas fueron 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25 y 1.5.

En las Figs. 6.22 a 6.24 se presentan los resultados obtenidos de los análisis hechos con el

procedimiento anterior para los marcos de 5, 10 y 15 niveles, respectivamente. Los resultados corresponden a los daños finales promedio, D_{fm} , y el parámetro α_{fm} de la distribución de probabilidades Beta, con respecto al daño inicial, D_{im} , del sistema para diferentes intensidades sísmicas normalizadas. El parámetro α_{fm} está relacionado con los primeros momentos de la distribución beta como

$$\alpha_{fm} = \left(1 - \frac{D_{fm} - D_{im}}{1 - D_{im}} \right) \left(\frac{(D_{fm} - D_{im})(1 - D_{fm})}{\sigma_{D_{fm}}^2} \right) \quad (6.1)$$

donde \bar{D}_{fm} y $\sigma_{D_{fm}}$ son la media y la desviación estándar de D_{fm} respectivamente.

Cada gráfica de las figuras corresponde a un coeficiente de diseño sísmico estudiado.

Los resultados de las figuras anteriores muestran que el daño final promedio en las estructuras es mayor conforme es más largo el periodo de vibración del sistema. Se encuentra que para todos los casos, una vez que la estructura muestra un cierto daño inicial para una intensidad específica, este daño se incrementa rápidamente con un aumento no muy grande de la intensidad. Las estructuras con periodo de vibración de 1.0s y 1.5s con un coeficiente de diseño sísmico de 0.2 (Figs. 6.23a y 6.24a), muestran un daño bastante alto aun para intensidades pequeñas. Para un coeficiente de diseño sísmico de 0.6 (Figs. 6.23c y 6.24c) la respuesta de las estructuras disminuye, aunque para intensidades normalizadas del orden a la correspondiente a la del sismo de 1985 ($y/y_m=1$), se tiene que aún para daños iniciales bajos (alrededor de 0.2) el daño final en el sistema muestra valores demasiados altos. Esto se observa también para sistemas con periodo de 0.5s (Fig. 6.22c).

Para el caso de parámetro α_{fm} los resultados muestran una cierta tendencia muy general para cada caso de daño inicial con respecto a la intensidad sísmica, sin embargo su variación con respecto al daño inicial no muestra una tendencia específica entre los diferentes periodos de vibración, presentado en algunos casos comportamientos contrarios (tendencia ascendente o descendente para casos con distinto valor de daño inicial). En las figuras se muestran únicamente los valores que están entre 10^{-3} y 10^4 .

6.3.1 Funciones de daño de marcos convencionales

En las Figs. 6.22 a 6.24 se presenta con línea gruesa continua el ajuste que se hizo a los resultados obtenidos para el daño final medio. Para el ajuste de estas curvas se tomó la siguiente expresión

$$E[D_{fm}] = D_{im} + (1 - D_{im}) \frac{a_3 \left(\frac{y}{y_m}\right)^{a_1(1-D_{im})}}{a_2^{-D_{im}} + a_3 \left(\frac{y}{y_m}\right)^{a_1(1-D_{im})}} \quad (6.2)$$

En la Tabla 6.1 se dan los valores de los coeficientes a_1 , a_2 , a_3 para cada caso estudiado.

Para el caso del parámetro α_{fm} dado el comportamiento encontrado no se trató de hacer ningún tipo de ajuste.

6.4 Daño en marcos con disipador de energía

Se realiza un análisis paramétrico de marcos con disipadores de energía. Los marcos se definen a partir de los marcos convencionales estudiados en el subcapítulo previo. Estos marcos presentan las mismas características globales de rigidez, masa y resistencia que los marcos convencionales y en los cuales el marco y el disipador de energía contribuyen con un porcentaje de esa rigidez y resistencia. Se analizan los casos dados en el subcapítulo 5.1.2 (Tabla 5.3).

El comportamiento que se toma para el disipador de energía corresponde al caso en que $N_{df}=2*N_{mf}$, el cual se consideró representa las características deseables de un disipador de energía típico.

El análisis del daño en la estructura se realiza de la misma forma que para el caso del marco convencional, solo que tomando además diferentes daños iniciales en el disipador de energía, para los cuales se tomaron valores de 0.0, 0.2, 0.4 y 0.6.

Las Figs. 6.25 a 6.60 muestran los resultados de los análisis realizados para cada periodo, coeficiente de diseño, relación de rigidez y resistencia del marco-disipador y daño inicial en el disipador. Los resultados corresponden a los daños finales promedio D_{fm} y D_{fd} del marco y el disipador, respectivamente y los parámetros α_{fm} y α_{fd} , definidos anteriormente, con respecto al daño inicial, D_{im} , del sistema para diferentes intensidades sísmicas normalizadas. Cada gráfica de las figuras corresponde a un caso del daño inicial del disipador de energía estudiado.

6.4.1 Sistemas con $T=0.5s$

Las Figs. 6.25 a 6.36 presentan los resultados para los sistemas con periodo de vibración de 0.5s con relaciones $r_k=r_R=0.5$ y $r_k=r_R=0.75$. De estos resultados se encuentra lo siguiente.

- a) Los daños en el marco y disipador disminuyen al aumentar el coeficiente de diseño sísmico para cualquier caso de daño inicial en el disipador.
- b) Los incrementos de daño en el marco y el disipador aumentan conforme se incrementa el daño inicial en el disipador. En el caso del disipador, éste presenta poco incremento del daño hasta intensidades normalizadas de alrededor de 1.0. Para intensidades mayores estos incrementos de daño aumentan en una proporción que depende del daño inicial del marco y disipador y la intensidad sísmica.
- c) El daño en el marco y el disipador es en general menor para sistemas con $r_k=r_R=0.75$ cuando se tiene un daño inicial en el disipador de 0.0 y 0.2. Sin embargo, para daños iniciales en el disipador de 0.4 y 0.6 el daño en el marco es mayor para esos sistemas, principalmente en intensidades altas. Este cambio en el comportamiento de los sistemas puede deberse a que cuando se tienen daños altos en el disipador, los sistemas en los que el disipador contribuye con mayor rigidez y resistencia presentan en proporción un mayor deterioro en el elemento más estable y la capacidad del marco no es suficiente para mantener la ventaja inicial del comportamiento.
- d) En el caso en que $r_k=r_R=0.5$ con $c=0.6$ y $D_{im}=0.4046$ y $r_k=r_R=0.75$ con $D_{im}=0.4979$ se tiene una disminución sistemática en el daño final del marco y el disipador para intensidades altas. Un análisis de estos resultados atípicos mostraron una posible relación con la historia en el tiempo de la

respuesta sísmica que lleva a ese daño inicial en el sistema. Sin embargo no fue posible comprobar esta relación. También pudo haber sucedido por una inestabilidad en la solución del programa que tampoco fue posible establecer durante el análisis. Debido a lo anterior se optó por no tomar en cuenta esos casos en la aplicación de los resultados.

6.4.2 Sistemas con $T=1.0s$

En las Figs. 6.37 a 6.48 se presentan los resultados para sistemas con periodo de 1.0s con relaciones de $r_k=r_R=0.5$ y $r_k=r_R=0.75$.

En general el comportamiento cualitativo de estos sistemas es semejante al presentado por los sistemas con periodo de 0.5s, aunque con daños mayores en el marco y el disipador. En este caso se tiene que los daños en el marco de sistemas con $r_k=r_R=0.5$ son menores que para el caso en que $r_k=r_R=0.75$ cuando se tienen daños iniciales en el disipador mayores que 0.2, excepto cuando $c=0.6$ en que estos daños fueron mayores para daños iniciales en el disipador igual o mayores que 0.2. También en estos sistemas se presentaron resultados atípicos los cuales no se consideraron en la aplicación de los resultados.

6.4.3 Sistemas con $T=1.5s$

Las Figs. 6.49 a 6.60 presentan los resultados para sistemas con $T=1.5s$.

El comportamiento de estos sistemas es semejante al de los sistemas con periodo de vibración de 0.5s y 1.0s, aunque el daño en el marco presenta valores mucho mayores. Para un coeficiente de diseño sísmico de 0.2 se tienen daños considerables, aún para intensidades pequeñas. Los sistemas con relaciones $r_k=r_R=0.75$ presentan daños menores en el marco que los sistemas con relaciones de $r_k=r_R=0.5$ para daños iniciales en el disipador con valores menores o iguales a 0.2. Para valores mayores el comportamiento se invierte. En estos sistemas se encuentran incrementos de daño en el disipador muy pequeños con respecto al aumentar el daño inicial que se tenga en el marco. Este tipo de comportamiento se explica por el hecho de que el sistema falla rápidamente debido a que el marco se daña en forma acelerada y el sistema falla aún cuando el disipador no sufra demasiado daño.

6.4.4 Funciones de daño

En las Figs. 6.25 a 6.60 se presentan las curvas ajustadas a los valores medios del daño y parámetro α del marco y disipador.

Para el marco, de acuerdo con los resultados anteriores, se tomó una expresión para la media del daño final igual a la propuesta para el caso del marco convencional. Para el caso del parámetro α se tomó una expresión del tipo

$$\alpha[D_{im}] = \frac{b_1 e^{b_2 D_{im}} (1 - D_{im})^3 e^{\left(0.1 + \frac{4}{r_m}\right) \left(y_{max} - \frac{y}{y_m}\right)^3}}{(0.05 + D_{im}) \left(\frac{y}{y_m}\right)^{1.5}} \quad (6.3)$$

donde b_1 , b_2 y b_3 son coeficientes de ajuste y y_{max} es la intensidad máxima normalizada.

Los valores de los coeficientes ajustados a cada caso se presentan de la Tabla 6.2.

Para el daño final en el dissipador de energía se propusieron las siguientes expresiones para la media y parámetro α

$$E[D_{fd}] = 1 - (1 - D_{id}) e^{-\frac{r_1 \left(\frac{y}{y_m}\right)^{5.2}}{c_3 - D_{im}}} \quad (6.4)$$

$$\alpha[D_{im}] = \frac{d_1 e^{d_2 D_{im}} (1 - D_{im})^5 e^{\left(0.1 + 4 \frac{y}{y_m}\right) \left(y_{max} - \frac{y}{y_m}\right)^{d_4}}}{(d_3 + D_{im}) \left(\frac{y}{y_m}\right)^{1.5}} \quad (6.5)$$

Los valores de los coeficientes ajustados a cada caso se presentan en la Tabla 6.3.

Cabe mencionar que los ajustes a los valores medios del daño para el marco equivalente y el dissipador de energía solo se tomaron para el caso $r_k = r_r = 0.75$. En algunos casos la curva no se ajusto al parámetro α , por lo que no se intento realizar un nuevo ajuste tomándose esos valores como indeterminados.

7. ANALISIS DE DECISIONES

Los resultados y las funciones de daño obtenidas anteriormente se utilizan para hacer un estudio de decisiones relacionadas a los criterios de diseño y políticas de reparación óptimas. El estudio se hace bajo el esquema de optimación de un ciclo de vida descrito en el capítulo 3. Para valuar el costo esperado de daños de acuerdo con la ec. 3.1 se utilizan métodos de simulación de Monte Carlo, empleando las funciones de daño obtenidas. El procedimiento de simulación se realiza como sigue:

Para cada caso de periodo y coeficiente de diseño:

- a) Se simula una secuencia de intensidades sísmicas, así como los instantes en que ocurren
- b) Se supone una estrategia del umbral del nivel de daño para el cual se repara el marco y el disipador de energía
- c) para cada evento de la secuencia sísmica
 - i) se simulan valores del daño en la estructura (marco y disipador)
 - ii) se decide, con base en el daño simulado y en la estrategia supuesta, si se necesita reparar el marco
 - iii) se determinan los costos de daños

iv) se definen nuevas propiedades mecánicas del marco para el siguiente temblor

d) se calculan las utilidades

Se repite los incisos a) a d) para varias secuencias de historias sísmicas.

7.1 Amenaza sísmica

Para la aplicación del procedimiento de simulación se consideró la ocurrencia de eventos de acuerdo con un proceso de Poisson. La intensidad de cada evento se simuló suponiendo que la tasa de ocurrencia de las intensidades era de la forma $\nu(y) = K e^{-y^r}$, con $K=30$ y $r=0.32$. Los coeficientes anteriores se ajustaron a los resultados obtenidos en Esteva et al (1988) para tasas de ocurrencia de intensidades (máxima aceleración espectral) en la zona compresible del Valle de México. Se supuso que intensidades menores de 150 cm/s^2 no provocaban daño estructural. En la Fig. 7.1 se presenta la curva de excedencia de intensidades utilizada en el estudio.

7.2 Costos de edificios

7.2.1 Costos iniciales y de reparación en edificios

Al evaluar el costo inicial de un edificio en función de los parámetros de diseño (coeficiente sísmico, factores de carga, resistencia, etc.) deben tenerse en cuenta todos los conceptos cuyos montos son sensibles a dichos parámetros, y todos los que pueden contribuir a los costos de daños. Dentro del costo total de la estructura no solo participan el costo del esqueleto como tal, es decir, el costo relativo a los elementos estructurales tales como vigas, columnas, muros, losas, escaleras, cubos de ascensor; también se deben considerar los costos de instalación de servicios (electricidad, agua, drenaje, gas, aire acondicionado, muros divisorios, etc.) y de acabados (aplanados, fachadas, recubrimientos, pintura, pisos, puertas, ventanas, etc.), los cuales constituyen una fracción significativa del costo total de la construcción.

Para proponer una expresión del costo inicial de una estructura en función del coeficiente sísmico, número de pisos, factor de comportamiento sísmico y relación de rigidez y resistencia que toman el marco convencional y los elementos disipadores de energía, en caso de que existan, en este trabajo se hace un análisis simple de costos, en el cual se considera que, para un edificio en particular, los costos debidos a la instalación de servicios y acabados son semejantes para todos los casos de combinación de las variables anteriormente mencionadas y únicamente función de su área de construcción (entendida como la suma de las áreas en planta de los pisos). Por lo tanto, la única diferencia en el costo de diferentes estructuras estará dada por el costo de sus trabes y columnas, así como del acero que necesiten de acuerdo a su diseño y, en su caso, del costo de los elementos disipadores de energía.

Las expresiones que se obtienen a continuación se hacen para los casos particulares que se estudian. Una expresión general puede ser obtenida a partir de esos resultados con algunos estudios adicionales.

7.2.2 Costo del marco convencional

Para encontrar una expresión del costo inicial de una estructura se estudiaron cuatro edificios de 5, 10, 15 y 20 niveles. Los primeros tres corresponden a los edificios estudiados en este trabajo. El edificio de 20 niveles se incluyó para tener un análisis más completo del costo. El análisis y diseño de la estructura se hace sobre uno de sus marcos y se supone que todos los marcos del edificio tienen el mismo diseño. Los edificios se diseñan para diferentes coeficientes de diseño sísmico.

El cálculo del costo de trabes y columnas en los diferentes edificios estudiados aquí se realizó haciendo una cubicación del concreto y del acero longitudinal y transversal necesarios. Los costos del concreto y el acero se tomaron de Mejía (1995) y Ruiz et al (1996). Aunque estos costos no son actuales, lo que importa en realidad es el costo proporcional de cada caso estudiado.

En las Tablas 7.1 a 7.4 se presentan los costos calculados de cada rubro para los diferentes edificios diseñados con diversos coeficientes sísmicos. En la Fig. 7.2 se presenta en forma gráfica el costo total del edificio vs. el número de niveles, para cada coeficiente sísmico elegido. En la Fig. 7.3 se presentan los mismos resultados, pero en una gráfica del coeficiente sísmico vs. costo total del edificio. En ella los puntos se han unido con líneas rectas continuas.

Realizando un ajuste de los datos anteriores se encuentra una expresión del tipo

$$C = C_0(1 + 0.01763 N c_s^{1.5})^{0.4} \quad (7.1)$$

donde C es el costo total de la estructura, c_s el coeficiente sísmico, N el número de niveles y C_0 es el costo inicial de la estructura cuando c_s es igual a cero. En la Fig. 7.3 se muestra con línea discontinua la curva ajustada con la expresión anterior. En la Tabla 7.5 se dan los valores de C_0 para los casos estudiados (5, 10, 15 y 20 niveles).

La expresión anterior nos proporciona el costo total inicial de una estructura; es decir, incluye el costo de todos los rubros. Cuando se realiza un análisis de costos para la toma de decisiones de acuerdo con la ec. 3.1, las pérdidas L_i debidas a los daños en la estructura ante un evento dado deberán ser relacionadas con los gastos que signifique la reparación de la estructura. Los gastos de reparación se pueden considerar de dos maneras: una, suponiendo que son función del costo total inicial de la estructura; la otra es suponiendo que solo dependen de los costos relativos a acabados y de trabes y columnas. La última proposición parece ser más real ya que mientras no haya colapso total, el daño en la estructura estará concentrado preferentemente en los acabados y en los elementos estructurales, mientras que es probable que la losa y las instalaciones no muestren daños apreciables. Además, existe una diferencia en la forma en que se dañarían los elementos estructurales y los acabados. Los primeros dependen tanto de las deformaciones como de los ciclos de carga, mientras que los segundos dependen más de las deformaciones de la estructura. En este trabajo no es posible, con el modelo de daño utilizado, hacer una distinción en los costos de daño de cada uno de los anteriores conceptos, por lo que se manejan los dos en uno solo.

Considerando lo anterior se propone la siguiente expresión para calcular el costo de reparación del daño en las estructuras estudiadas:

$$C = C_{LI} + C_{AM}(1 + a c_s^b)^d \quad (7.2)$$

$$C_L = C_{AM}(1 + a c_s^b)^d \quad (7.3)$$

donde C_{LI} el costo relativo a la losa y las instalaciones, C_{AM} el costo relativo a los acabados y los elementos estructurales cuando el coeficiente sísmico es igual a cero y a, b y d son coeficientes de ajuste. C_L es la parte correspondiente del costo total que se toma para el cálculo de los costos de reparación de daños. En la Tabla 7.6 se dan los valores de los coeficientes a, b y d y de C_{LI} y C_{AM} para cada edificio estudiado.

7.2.3 Costo del marco con disipador

Obtener el costo de los marcos con disipadores no es tan directo como en el caso anterior. Para poder efectuarlo es necesario definir primero un criterio de análisis y diseño de los sistemas con disipador y a partir de ello realizar el análisis de costos. En este trabajo la definición de los sistemas con disipadores se hizo de manera simplificada, por lo que no se siguió un criterio de diseño específico.

Dado lo anterior, para poder establecer una expresión del costo de una estructura con disipadores de energía se hace uso de los análisis de costos realizados por Mejía (1995) y Ruiz et al (1996). En estos trabajos se hace el análisis y diseño de dos edificios de 10 y 20 niveles, con disipadores de energía y sin ellos. Los autores utilizan para su diseño un criterio propuesto por ellos mismos. El edificio de 10 niveles es diseñado suponiendo que tiene disipadores del tipo de rolado (subcapítulo 2.1.3.4), mientras que el edificio de 20 niveles tiene disipadores del tipo TADAS. En la Tabla 7.7 se dan los costos que resultan para cada uno de los conceptos utilizados en el trabajo. Los costos calculados para cada edificio se obtuvieron considerando el costo de todos los rubros que se tenía en el momento del estudio. Con el fin de hacerlos comparables el costo del edificio de 10 niveles se actualizó con respecto al del edificio de 20 niveles considerando el tipo de cambio del dólar estadounidense.

Debido al criterio de diseño utilizado en las referencias anteriores, no es posible establecer en forma precisa el coeficiente sísmico de diseño y las relaciones r_K y r_R resultantes, de acuerdo con los conceptos manejados en este trabajo. Sin embargo, se hicieron algunas estimaciones burdas con las que se pudieron definir algunos de estos valores. Las estimaciones se hicieron de la siguiente manera:

De acuerdo con Mejía (1995) el edificio de 10 niveles con disipador de energía se diseña inicialmente para una fuerza de diseño igual a F_T correspondiente a un factor de comportamiento sísmico de 1. Según el criterio de diseño la fuerza F_T se reparte entre el marco y el disipador en una proporción igual a la relación de rigideces (el sistema marco-disipador tiene una relación $r_k = 0.75$). El marco se diseña para esa fuerza sin reducción por ductilidad (el criterio de diseño supone que el marco se diseña para presentar un comportamiento elástico). El disipador se diseña para una fuerza reducida tal que ante un movimiento sísmico dado el sistema presente un comportamiento elástico en los elementos del marco. El diseño que se obtiene de esa forma presenta un factor de reducción en las fuerzas de diseño de los disipadores que varía en cada entrepiso. Suponiendo un factor de reducción promedio de todos los entrepisos, Q_d , se encuentra que la fuerza de diseño para los disipadores es igual a $F_d = 0.75 F_T / Q_d$, donde $Q_d = 2.714$ para el caso estudiado. Lo anterior implica que la resistencia total de diseño es igual a $0.526F_T$, obtenida como la suma de la fuerza con la cual se diseña el marco ($F_m = 0.25F_T$) más la fuerza de diseño del disipador ($F_d = 0.276F_T$). Por lo anterior el factor de reducción de la fuerza total es igual a

1.9. Puesto que el edificio se diseñó para un coeficiente sísmico sin reducir de 0.4 el coeficiente sísmico reducido queda igual a 0.21.

Un razonamiento semejante se hizo para el edificio de 20 niveles obteniéndose un coeficiente sísmico reducido igual a 0.151. Para este edificio se tomó un factor de reducción, Q_d , de la fuerza del disipador igual a 5.87.

En la Tabla 7.7 se dan los valores estimados del coeficiente sísmico de diseño y de las relaciones r_k y r_R que se obtuvieron para cada caso.

Con el fin de relacionar estos resultados con alguno de los valores de los parámetros r_R que se utilizan en este trabajo, se buscó modificar el costo de los disipadores al que tendrían si tomaran otra relación de r_R . Esto se hizo de manera simple a partir de los datos de los costos de los elementos disipadores por piso dados en las referencias dichas. En la Tabla 7.8 se dan los valores de los costos de los disipadores para cada piso del edificio de 10 niveles. Estos valores se relacionan con la fuerza para la cual fueron diseñados. A partir de la variación de estos costos con la fuerza de diseño se propone la expresión

$$C_p = 6.17 P^{0.675} \quad (7.4)$$

C_p representa el costo de disipador y P la fuerza de diseño horizontal (en Kg).

Suponiendo que la fuerza de diseño del primer nivel para los disipadores (Tabla 7.8) está relacionada con el valor de r_R estimado para las estructuras (0.52 para la estructura de 10 niveles y 0.339 para la de 20 niveles), considerando una relación lineal de la fuerza de diseño con la relación r_R y del costo del disipador con el costo de los disipadores en cada estructura, se obtienen las siguientes expresiones

$$C_{D10} = 865201 r_R^{0.675} \quad \text{para el edificio de 10 niveles} \quad (7.5)$$

$$C_{D20} = 6096291 r_R^{0.675} \quad \text{para el edificio de 20 niveles} \quad (7.6)$$

A partir de las expresiones anteriores se calculó el costo de los disipadores en los edificios para una relación de 0.75. En la Tabla 7.7 se presenta el costo del disipador calculado correspondiente a esa relación de r_R . La relación entre el costo de los disipadores de los edificios de 10 y 20 niveles es de aproximadamente 7. Esta diferencia en los costos parece ser alta para la relación r_k estudiada. Sin embargo, aún los valores de los costos de los disipadores que se tienen antes de la transformación a la r_k requerida, presentan un factor de más de 5 entre los dos casos. No fue posible con la información disponible determinar si la causa de esta diferencia era debida a los diferentes tipos de disipadores que se utilizaron en cada caso.

Con los datos presentados en la Tabla 7.7 es posible obtener algunas relaciones entre el costo del edificio con disipadores y el edificio sin disipadores de energía. En la Tabla 7.9 se presentan algunas relaciones de costo del edificio con disipadores de energía al edificio sin disipadores de energía. Estos resultados muestran que la relación de $(M_D+A_D)/(M_C+A_C)$ no varía demasiado del edificio de 10 niveles al edificio de 20 niveles. Para la relación de $D/(M_C+A_C)$, su valor se incrementa al aumentar el número de niveles de la estructura (M_D , A_D , D , M_C y A_C se definen en la Tabla 7.7 ; el costo D corresponde al

caso en que $r_R=0.75$).

Con el fin de simplificar el problema se propuso establecer el costo de los edificios con disipadores de energía en función de los costos de los edificios sin disipadores de energía dados por la ec. 7.2. En esta ecuación el costo correspondiente al del marco más acabados se multiplica por un factor que divide la parte proporcional del costo del marco y acabados con disipadores y el costo de los disipadores. De acuerdo con los resultados de la Tabla 7.9 y suponiendo que las relaciones dadas no cambian con el valor del coeficiente sísmico, se toma que la proporción de $(M_D+A_D)/(M_C+A_C)$ no cambia con la altura del edificio, tomándose un valor promedio de $f=0.787$. Para el caso del costo proporcional de disipador se supuso una relación del tipo $p_{CD} = gN^h$, donde p_{CD} es el costo proporcional del disipador con respecto a (M_C+A_C) , N el número de niveles y g y h son coeficientes de ajuste. Realizando un ajuste con los datos que se tienen se encuentra que $g=0.07$ y $h=0.7$. Con estos resultados las expresiones para el costo de las estructuras con disipadores de energía son iguales a

$$C = C_{LI} + C_{AM}(1 + a c_s^b)^d (f + g N^h) \quad (7.7)$$

$$C_M = f C_{AM}(1 + a c_s^b)^d \quad (7.8)$$

$$C_D = g N^h C_{AM}(1 + a c_s^b)^d \quad (7.9)$$

donde f , g y h son coeficientes de ajuste dados en el párrafo anterior, C_{LM} y C_{LD} son respectivamente los costos del edificio con disipadores de energía, incluyendo marco más acabados y disipador, que se toman para el cálculo de los costos de reparación de daños. C_{LI} , C_{AM} , a , b y d fueron definidos anteriormente.

Las expresiones anteriores son útiles para el caso en que $r_k=r_R=0.75$.

7.3 Cálculo de utilidades

En este subcapítulo se hace una aplicación del esquema de optimación de acuerdo con el procedimiento presentado al inicio del capítulo.

El estudio se realiza para los marcos convencionales y para los sistemas de marco con disipador de energía con una relación de rigidez y resistencia $r_k = r_R = 0.75$ ya que para ese caso se cuenta con las funciones de costos obtenidas en el subcapítulo anterior. Se eligen diferentes estrategias del umbral del daño al cual se reparan el marco y el disipador. Para el caso del marco los valores del umbral de daño que se estudian son: 0.2, 0.4 0.6 y 0.8. Para el disipador se toman valores de 0.2, 0.4 y 0.6.

Para el daño se supuso una distribución de probabilidades del tipo Beta. Como se vio en el capítulo 6, en el caso de los marcos convencionales no fue posible definir una expresión adecuada para el parámetro α de la distribución Beta. Debido a eso para poder realizar el cálculo de la utilidad se decidió utilizar tanto para el marco convencional como para el marco con disipadores de energía, la expresión dada en la ec. 6.2 para calcular el valor medio del daño final. Para el cálculo del parámetro α se utilizaron los

resultados de la muestra haciendo una interpolación lineal entre los valores conocidos, para obtener los requeridos de la combinación de daño inicial e intensidad sísmica que se tiene en las simulaciones. Para el daño final en el elemento disipador de energía se tomaron las expresiones de la media y el parámetro α ajustadas, dadas por las ecs. 6.4 y 6.5. En el caso del marco con disipador las expresiones del daño que se obtuvieron corresponden a valores discretos del daño inicial en el disipador, por lo que aquí se utiliza una interpolación lineal entre los valores de la esperanza y el parámetro α del daño final cuando se tienen valores del daño inicial del disipador diferente a los estudiados. Puesto que no se tenía conocimiento sobre la relación entre el índice de daño utilizado y los costos de reparación de las estructuras se supuso una relación lineal entre ellos.

Para el proceso de simulación del Monte Carlo se tomaron 5000 simulaciones de ciclos de vida tanto para el marco convencional como para el marco con disipador de energía para cada caso estudiado. Para el cálculo de las utilidades se tomó que la duración del ciclo de vida era para un lapso de 200 años. Se consideró que los costos para tiempos mayores a ese no tenían influencias importantes en la utilidad total, debido a la tasa de descuento.

En las Tablas 7.10 a 7.12 se presentan los resultados del proceso de optimación para cada marco estudiado. En ellas se dan el costo inicial, C_0 , del marco convencional diseñado para un valor de coeficiente de diseño sísmico $c_s=0.0$, así como el costo normalizado con respecto a C_0 del costo de las estructuras sin y con disipador de energía diseñadas con un valor de c_s dado (C_{0mc} y C_{0md} , respectivamente). También se presenta el valor presente, normalizado con respecto a C_0 , de todas las reparaciones, tanto del marco convencional (C_{rmc}), como del marco con disipador de energía (C_{rmmc} , C_{rmd} y C_{rmd} del marco, disipador de energía y total, respectivamente), y de la función de utilidad normalizada, U/C_0 , para el marco convencional (U_{mc}) y el marco con disipador de energía (U_{md}).

En las figuras 7.4 a 7.6 se presentan los resultados para las funciones de utilidad normalizadas para cada uno de los sistemas estudiados. En estas figuras en el eje vertical se muestran los valores de la función de utilidad normalizada U/C_0 . Cada figura se divide en cuatro segmentos. El primer segmento corresponde al caso del sistema convencional y los otros tres a los sistemas con disipador de energía correspondiendo cada uno de ellos a los diferentes umbrales de daño adoptados para la reparación o reemplazo del elemento disipador de energía ($D_{rd}=0.2, 0.4, 0.6$). En el eje horizontal de cada segmento se tienen los valores del umbral de daño adoptados para la reparación del marco estructural.

En las tablas y figuras anteriores se presentan los resultados para los tres diferentes coeficientes de diseño sísmico considerados en el estudio.

a) Marcos de 5 niveles

En la Tabla 7.10 y la Fig. 7.4 se muestran los resultados para el marco de 5 niveles. Se observa que para este caso el incremento del costo inicial del marco con disipador con respecto al marco convencional es pequeño, aproximadamente 0.23% para cualquier coeficiente de diseño sísmico. Los costos de reparación, como es de esperarse, disminuyen con un aumento en el coeficiente de diseño sísmico.

En el marco convencional los costos de reparación varían dependiendo de la política de reparación, con una tendencia en general de crecer y después disminuir con un aumento en el umbral de daño en el

marco. Los menores costos de reparación y de la función U_{mc} se encuentran cuando se tiene un valor de $c_s=0.6$ y $D_{mm}=0.8$ con un valor de 1.0135.

En el marco con disipadores los costos de reparación son menores que en el marco convencional, sin importar la política de reparación o reemplazo de los disipadores de energía, para cualquier coeficiente de diseño sísmico. En estos sistemas el costo de reparación del marco contribuye en una proporción bastante alta al costo total de reparación. Los resultados muestran en general una tendencia a disminuir la utilidad con un incremento en el umbral de daño del marco. No se tiene demasiada variación en los resultados para diferentes umbrales de daño en el disipador. El valor mínimo de U para cualquier valor de c_s se tiene cuando $D_{mm}=0.8$ y $D_{rd}=0.6$. Para estos marcos los sistemas diseñados con $c_s=0.4$ son los que presentan los valores mínimos de la función de utilidad.

Para coeficientes de diseño sísmico de 0.2 y 0.4 el valor de U/C_0 en el marco con disipadores es menor que en el marco convencional, cualquiera que sea la política de reparación y reemplazo. Para $c_s=0.6$ el valor de U/C_0 es menor en el marco con disipadores para algunas combinaciones de D_{mm} y D_{rd} , excepto cuando $D_{mm}=0.6$ en donde la utilidad en el marco convencional es menor.

Para este tipo de marcos se encuentra que la utilidad óptima corresponde al caso del marco con disipador con $c_s=0.4$, $D_{mm}=0.8$ y $D_{rd}=0.6$, con un valor de 1.01159.

b) Marco de 10 niveles

En la Tabla 7.11 y en la Fig. 7.5 se muestran los resultados para el marco de 10 niveles. Para este caso se tiene que el incremento del costo inicial del marco con disipador es aproximadamente 10.4% mayor que el del marco convencional, en todos los casos de coeficiente de diseño sísmico.

Los costos de reparación en el marco convencional muestran una tendencia semejante a la de los marcos de 5 niveles con respecto al valor de D_{mm} . En el caso de las utilidades, éstas no presentan una variación muy grande con respecto al valor de D_{mm} . Los costos de reparación y las utilidades disminuyen conforme se incrementa el coeficiente de diseño sísmico. La utilidad óptima se tiene para el caso de $c_s=0.6$ y $D_{mm}=0.8$ con un valor de 1.0471.

El marco con disipador presenta en general costos de reparación menores que los que se tienen para el marco convencional, sin importar la política de reparación y reemplazo. El mínimo de U para $c_s=0.2$ se tiene cuando $D_{mm}=0.8$ y $D_{rd}=0.4$, y para $c_s=0.4$ y $c_s=0.6$ cuando $D_{mm}=0.8$ y $D_{rd}=0.6$. El mínimo de U_{md} para los marcos con disipadores se tiene para $c_s=0.4$ con un valor de 1.14835.

También en estos marcos con disipador los costos de reparación se deben principalmente, al daño que sufre el marco, mostrando el disipador de energía un daño bastante pequeño. Esto se observa en la variación de la utilidad en el marco con disipador que se tiene para las distintas políticas de reparación o reemplazo del disipador (Fig. 7.5), el cual no muestra variaciones muy grandes.

Aunque los costos de reparación son menores para el marco con disipador de energía con respecto al marco convencional, la función de utilidad normalizada, U , es mayor en aquellos, cualquiera que sea la política de reparación y reemplazo. Lo anterior se debe a la contribución del costo inicial a la función de

utilidad.

Los costos totales en esta estructura son mayores que para el sistema de 5 niveles.

c) Marco de 15 niveles

En la Tabla 7.12 y en la Fig. 7.6 se muestran los resultados para el marco de 15 niveles. El incremento del costo inicial del marco con disipador es aproximadamente 20% mayor que el del marco convencional.

Para este caso los costos de reparación son mayores que para las dos estructuras anteriores. Al igual que en éstas últimas, los costos de reparación en el marco convencional disminuyen conforme aumenta el coeficiente de diseño sísmico. No se tiene una variación significativa con respecto al umbral de daño que se adopte. La utilidad óptima para este caso se tiene cuando $c_s=0.6$ y $D_{mm}=0.2$ con un valor de 1.1018.

En el marco con disipador los costos de reparación son menores que para el marco convencional. También aquí, los costos de reparación del marco son mucho mayores que los que se obtienen en el disipador de energía. Estos costos disminuyen conforme se aumenta el coeficiente de diseño sísmico. Para estos marcos se encuentra que la función de utilidad mínima para $c_s=0.2$ se tiene cuando se toman los valores de $D_{mm}=0.8$ y $D_{rd}=0.2$ con un valor de 1.52287. Para $c_s=0.4$ y $c_s=0.6$ el mínimo se tiene para $D_{mm}=0.8$ y $D_{rd}=0.6$ con un valor de 1.32884 y 1.28865, respectivamente. Para este caso el menor valor de U/C_0 se presenta cuando $c_s=0.6$.

Igual que en el marco de 10 niveles, aunque los costos de reparación son menores para el marco con disipador de energía con respecto al marco convencional, el valor de U es más grande. Lo anterior es debido también a que el costo inicial asignado a estos marcos tiene un mayor peso en la utilidad total.

8. CONCLUSIONES

Se ha presentado un planteamiento para optimizar los criterios de diseño sísmico y las políticas de reparación y/o mantenimiento de sistemas estructurales con dispositivos disipadores de energía. Este planteamiento está basado en el estudio del proceso del daño acumulado en estructuras que están expuestas a la acción continua de temblores, así como el deterioro de sus propiedades estructurales que son función de los niveles de daño que sufran las mismas. A continuación se resume el trabajo desarrollado y se hacen algunos comentarios sobre el mismo.

El estudio se realizó utilizando modelos simples equivalentes de un grado de libertad, dada la complejidad y esfuerzo que significaba utilizar sistemas más detallados con varios modos de falla. Esto permitió hacer un número bastante grande de análisis para obtener los resultados deseados y que resultarán representativos del enfoque buscado. Lo anterior no permite considerar la influencia de diversos parámetros que influyen en la respuesta de las estructuras con disipadores de energía, como es el caso de su distribución con la altura.

Se desarrollaron criterios de equivalencia de rigidez, masa, resistencia y ductilidad para el caso de marcos convencionales. Las diferencias encontradas entre las respuestas medias de los sistemas reales y equivalentes son pequeñas para los sistemas de 15 niveles, en el intervalo de intensidades moderadas a altas. Estas diferencias crecen conforme se disminuye el número de niveles de la estructura. No se desarrollaron criterios de equivalencia para el caso de marcos con disipadores de energía con el fin de simplificar el estudio. Aunque los resultados obtenidos con los modelos simples se consideraron aceptables, es recomendable hacer estudios que mejoren estos modelos, para que representen más adecuadamente el comportamiento de las estructuras.

Para evaluar los niveles de daño que sufre la estructura se propusieron modelos de comportamiento histerético para representar a los diferentes elementos estructurales que la constituyen. El modelo propuesto para los elementos de concreto reforzado resulta ventajoso al representar el comportamiento del elemento en la unión viga-columna y al tomar en cuenta la degradación de su resistencia ante carga cíclica, que es lo que sucede en los elementos de las estructuras durante la acción de un temblor intenso, además de que presenta un indicador del daño del elemento. Para el elemento dispositivo disipador de energía se propuso un modelo de comportamiento histerético estable ante un número elevado de ciclos. Los parámetros que definen la curva de fatiga del elemento están basados en un modelo de disipador por rolado (Aguirre y Sánchez, 1990) y se consideró representaba las características generales que debe tener un disipador que se quiera utilizar para el diseño sísmico de edificios.

Se estudiaron diferentes estructuras en donde se analizaron diversos parámetros de diseño como fueron: el periodo de vibración relacionado con el número de niveles, el coeficiente de diseño sísmico, la ductilidad, así como la relación de la rigidez lateral, la resistencia y la capacidad de deformación a la falla entre el disipador y el marco. Los estudios se hicieron considerando para las propiedades mecánicas y cargas de las estructuras sus valores esperados y se supusieron desplantados en terreno blando de la Cd. de México.

Utilizando métodos de simulación de Monte Carlo se obtuvieron expresiones del daño final tanto para el marco convencional como para el marco con disipadores, en función del daño inicial y la intensidad sísmica. Los daños en los marcos con disipadores son en general menores que en los marcos convencionales. Además se encuentra que entre mayor es la relación de la rigidez y la resistencia entre el disipador y el marco, menores daños se presentan en el marco. Estas funciones de daño se utilizaron para realizar un estudio de análisis de decisiones relacionadas a los criterios de diseño y políticas de reparación óptimas.

Se obtuvieron expresiones simples para evaluar el costo inicial de las estructuras de marcos en función del coeficiente de diseño sísmico y el número de niveles. En estas expresiones se calculó el costo de la estructuración de acuerdo con una cubicación de los materiales (concreto y acero longitudinal y transversal). Los costos de acabados e instalaciones se tomó en cuenta únicamente como función del área de construcción, cuyo valor se obtuvo de estudios anteriores. En el caso del costo de los disipadores de energía, se hicieron uso de los resultados de análisis de costo realizados por Mejia (1995) y Ruiz (1996). Con los resultados mencionados y haciendo algunas hipótesis simples se pudo obtener expresiones del costo de los disipadores en función de la fuerza de diseño. Es necesario hacer estudios más detallados sobre el costo de los disipadores de energía con el fin de verificar y en su caso modificar las expresiones obtenidas en este trabajo.

En este trabajo se supuso una relación lineal entre el daño y el costo de reparación de la estructura. Sin embargo debe estudiarse cual es la relación real que se tiene entre estas variables.

En el caso de los costos de reparación de los daños ocasionados por los temblores, estos se tomaron únicamente en función de los costos iniciales que abarcan los costos de los acabados y de los elementos estructurales (trabes y columnas) del inmueble, ya que como se explicó, los costos relacionados con la reparación de daños en la losa y las instalaciones resultan ser en la mayoría de los casos poco significativos, a menos que se presente el colapso. Una limitante de la evaluación de los costos de reparación es que no fue posible diferenciar los costos de reparación de los acabados y los

elementos estructurales por separado, por lo que se manejó de manera conjunta. En estudios adicionales es aconsejable realizar planteamientos racionales para evaluar los costos de reparación de manera independiente. En este estudio no se consideraron los costos adicionales, llamados costos indirectos, como son: la pérdida de funcionalidad o interrupción de actividades durante las acciones de reparación o reconstrucción del inmueble, así como la pérdida de vidas humanas. Sin embargo, el planteamiento permite la incorporación de estos costos en estudios futuros.

En la aplicación del esquema de optimación se analizaron diferentes políticas de reparación o reemplazo para el caso de los marcos convencionales y los marcos con disipadores con una relación de rigidez y resistencia igual a 0.75. De los resultados se obtiene lo siguiente:

Se observa que para los sistemas estructurales con periodo $T=0.5$ s, el uso de los dispositivos disipadores de energía incrementó el costo inicial del sistema en un porcentaje relativamente muy pequeño. Para el marco convencional la mejor opción se presenta cuando $c_s=0.6$ y $D_{rm}=0.80$. Para el caso del marco con disipadores, el costo de reparación del marco es mayor que el costo de reparación del disipador, dado al comportamiento que se le dio a este último. Para estos marcos el valores mínimo de la función de utilidad se tiene para un coeficiente sísmico $c_s=0.40$ con $D_{rm}=0.80$ y $D_{rd}=0.60$.

Para los sistemas estructurales con periodo $T=1.0$ s, el costo inicial aumenta aproximadamente entre un 10 y 15 por ciento cuando se utilizan los dispositivos disipadores de energía. Para el marco convencional la utilidad óptima se obtiene para el caso $c_s=0.60$ y $D_{rm}=0.80$. Para el caso del marco con disipadores los costos de reparación son en general menores que los del marco convencional. El mínimo de U se tiene para $c_s=0.40$ con $D_{rm}=0.80$ y $D_{rd}=0.60$. Para estos marcos la utilidad, U , de los marcos con disipadores es mayor que la de los marcos convencionales, esto debido al incremento en el costo inicial por el uso de los dispositivos disipadores de energía.

Para los sistemas estructurales con periodo $T=1.5$ s, el costo inicial aumenta aproximadamente entre un 20 y 27 por ciento para marcos con dispositivos disipadores de energía. Para el marco convencional los costos de reparación son mayores que para las dos estructuras anteriores. La utilidad óptima se obtiene para el caso $c_s=0.60$ y $D_{rm}=0.20$. Para el caso del marco con disipadores los costos de reparación son en general menores que los del marco con un valor óptimo para $c_s=0.60$ con $D_{rm}=0.80$ y $D_{rd}=0.60$.

De los resultados encontrados en este estudio se encuentra que la aproximación de un ciclo de vida propuesta, sirve para tomar decisiones con respecto a la conveniencia de utilizar dispositivos disipadores de energía en casos específicos. Las condiciones para las cuales su uso es ventajoso depende de los costos de daño y las acciones de mantenimiento que se tomen. En algunas estructuras los incrementos en el costo inicial asociado con el uso de los disipadores de energía excedieron los beneficios que se obtienen por la reducción en los costos esperados de daños totales. Este efecto impide reconocer las ventajas económicas que puede tener el uso de estos dispositivos. La inclusión de los costos indirectos en el análisis de decisiones puede ayudar a modificar estas conclusiones. Es necesario realizar estudios adicionales para tener un mejor entendimiento de las condiciones bajo las cuales el uso de los disipadores de energía ofrecen una mejor alternativa.

REFERENCIAS

- Aguirre, M y Sánchez, R, 1990, "Disipadores de energía sísmica", *Construcción y Tecnología*, IMCyC, pp 15-19, agosto.
- Avila, J.A., Gutiérrez, K., 1994, "Comparación de la respuesta sísmica inelástica de edificios tipo Escuela con y sin disipadores de energía", *Memorias IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Vol. I, Zacatecas, México, pp 474-483.
- Avila, J.A., Gutiérrez, K., 1996, "Comparación del comportamiento sísmico inelástico de un edificio de diez niveles sin y con disipadores de energía", *Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Vol. I, Mérida, México, pp 197-206.
- Benjamin, J and Cornell, A, 1981, *Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil*, Ed. Mcgraw-Hill, Inc.
- Departamento del Distrito Federal, 1993, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, Diario Oficial de la Federación.
- Díaz, O, Esteva, L, Flores, O, 1990, "Incertidumbres asociadas con el sistema y modelo en el análisis de confiabilidad de estructuras sujetas a temblores", *Informe de investigación*, Proy. No. 9742, Instituto de Ingeniería, UNAM, octubre.
- Díaz, O, 1991, "Recopilación de información sobre modelos estructurales para representar el comportamiento de elementos estructurales" *Informe de investigación elaborado para CONACYT*, Proy. No. 9706, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Díaz, O, Esteva, L y García, F, 1997, "Funciones de daño acumulado por sismo en marcos de edificios (primera parte)", *Informe de investigación realizado con el apoyo de CONACYT*, Proy. No. 6553, Instituto de Ingeniería, UNAM, septiembre.
- Esteva, L, Díaz, O, Terán, A, García, J, 1988, "Costos probables de daños causados por temblores en construcciones", *Informe de investigación elaborado para la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros*, Proy. No. 8750, Instituto de Ingeniería, UNAM, agosto.
- Esteva, L y Ruiz, S, 1989, "Seismic failure rates of multistory frames", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 2, February, pp 268-284.
- Grigoriu, M, Ruiz, S, Rosenblueth, E, 1988, "The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - Nonstationary Models of Seismic Ground Acceleration", *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 3.
- Jara, J M, 1996, "Comportamiento de edificios con disipadores de energía", *Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Vol. I, Mérida, México, pp 306-315.
- Mejía, R, 1995, "Análisis estructural y de costos de un edificio de 10 niveles diseñado convencionalmente y otro con disipadores de energía sísmica", *Tesis profesional*, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Meli, R, 1976, "Bases para los criterios de diseño estructural del proyecto del reglamento de construcciones para el Distrito Federal", Publicación No. 375, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Pall, A S and Marsh, C, 1990, "Response of Friction Damped Braced Frames", Journal of the Structural Division, ASCE 108, pp. 161-201.

Powell, G. H., 1973, "DRAIN-2D User's Guide", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Ruiz, E, Mejía, R y Ruiz, S, 1996, "Comparative study of a multistory frame with energy dissipation device an without them", Proceedings 11 WCEE, Paper No. 1535, Acapulco, México.

Silva, F y Ruiz, S, 1993, "Consideraciones sobre el diseño sísmico en marcos con dispositivos disipadores de energía", Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, México, pp 863-869.

Tena, A, Gómez C, Vargas, E, 1993, "Evaluación sísmica de dos edificios de concreto reforzado reestructurados con dispositivos disipadores de energía tipo ADAS", Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, México, pp 818-825.

Urrego, O, Ruiz, S, 1994, "Comportamiento sísmico de dos marcos estructurales contraventeados y con disipadores de energía en sus diagonales", Memorias IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Vol. I, Zacatecas, México, pp 484-491.

Wang, M-L and Shah, S P, 1987, "Reinforced concrete hysteresis model based on the damage concept", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 15, pp 993-1003.

Villaverde, R, "Are Vibration Control Techiques a Competitive Alternative for the Seismic Design of Structures". X Congreso Nacional de Ingenieria Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco.

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, EERI, El Cerrito, Calif., Vol 3, pp. 459-468.

Soong, T T, Masri, S F and Housner, H M, "An Overview of Active Strucutral Control under Seismic Loads", Earthquake Spectra, Vol. 7, pp. 483-505,1991.

Kobori, T et al.,(1990). "Experimental Study on Active Variable Stiffness System-Active Seismic Response Controlled Structure,"Proc. Fourth World Congress of Tall Buildings and Urban Habitat, Hong kong.

Esteva, L, "Nonlinear seismic response of soft-first-story buildings subjected to narrow-band accelerograms", Earthquake Spectra, 8, 3, 1992.

Silva, F, 1993, "Criterio para diseño sísmico de estructuras con dispositivos disipadores de energia ", Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Urrego, O, 1994, "Elección del mejor arreglo de disipadores en un marco estructural plano", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Urrego, O, Ruiz, S y Silva, F, 1993, "Influencia de la distribución de los disipadores de energía en la respuesta sísmica de un edificio", Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, México, pp 849-855.

Díaz, O, Esteva, L, Ruiz, M, "Confiabilidad de Marcos Simples con Disipadores" Trabajo de Investigación realizado para la Dirección de Apoyo al Personal Académico de la UNAM, DGAPA-UNAM, proyecto IN302793.

Santa Ana, P., 1999, " Factores de reducción de resistencia lateral en sistemas de varios grados de libertad", Memorias XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán, México, pp 1041-1050.

RECONOCIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad brindada del uso de sus instalaciones y material didáctico.

Se agradece el apoyo brindado por la DGAPA por medio del proyecto IN-111998.

Al Dr. Orlando J. Díaz López por sus valiosos comentarios para la terminación de este trabajo y su apoyo incondicional siempre vigente.

A mis compañeros Víctor Díaz, Jorge Alamilla, Teófilo Salomón, Fernando García, Jorge Varela, Luis Oscar González, Mauricio Méndez y demás que se me escapan de la memoria, muchas gracias.

MARCOS PLANOS DE CONCRETO REFORZADO						
NIVEL	5 NIVELES		10 NIVELES		15 NIVELES	
	columnas	vigas	columnas	vigas	columnas	vigas
1	60 x 60	30 x 55	80 x 80	30 x 60	95 x 95	35 x 65
2	60 x 60	30 x 55	80 x 80	30 x 60	95 x 95	35 x 65
3	60 x 60	30 x 55	80 x 80	30 x 60	95 x 95	35 x 65
4	55 x 55	30 x 55	70 x 70	30 x 60	95 x 95	35 x 65
5	55 x 55	30 x 55	70 x 70	30 x 60	90 x 90	35 x 65
6			70 x 70	30 x 60	90 x 90	35 x 65
7			60 x 40	30 x 60	90 x 90	30 x 60
8			60 x 40	30 x 60	90 x 90	30 x 60
9			60 x 40	30 x 60	80 x 80	30 x 60
10			60 x 40	30 x 60	80 x 80	30 x 60
11					80 x 80	30 x 60
12					80 x 80	30 x 60
13					70 x 70	30 x 60
14					70 x 70	30 x 60
15					70 x 70	30 x 60

Tabla 5.1 Dimensiones de columnas y vigas de los marcos reales.

NIVELES	k (t/cm ²)	m (ts ² /cm)	c _s	V _y (t)
5	21.851	0.1278	0.2	29.539
			0.4	32.760
			0.6	38.639
10	13.280	0.3435	0.2	51.918
			0.4	72.165
			0.6	101.879
15	19.221	0.9106	0.2	106.730
			0.4	176.834
			0.6	265.939

Tabla 5.2 Propiedades de los sistemas simples

r _k	r _R
0.5	0.5
0.75	0.75

Tabla 5.3 Valores de r_k y r_R estudiados

Periodo	C _s	Marco Convencional		
		a ₁	a ₂	a ₃
0.5 s	0.2	7.9711	202830.7348	0.1073
0.5 s	0.4	7.1730	1698604.665	0.0492
0.5 s	0.6	6.6821	1133270.843	0.0226
1.0 s	0.2	8.1559	26661.4569	4.6477
1.0 s	0.4	8.8663	2770256.738	0.3214
1.0 s	0.6	8.0138	2649493.363	0.02
1.5 s	0.2	4.9586	19.7595	42.2741
1.5 s	0.4	5.8847	970.2779	3.4966
1.5 s	0.6	5.2161	34443.999	0.4642

Tabla 6.1 Valores de los coeficientes ajustados para el caso $r_k=r_r=0.00$ para el marco convencional

Periodo	c _s	D _{id}	Marco equivalente			Parametro (α)		
			a ₁	a ₂	a ₃	b ₁	b ₂	b ₃
0.5 s	0.2	0.00	3.8998	88.3408	0.3013	0.0267	8.5651	5.4987
		0.20	4.5914	90.5959	0.4829	0.0158	8.5441	6.0785
		0.40	4.9537	53.7664	1.2558	0.0073	8.1896	6.9685
		0.60	4.4480	27.9192	4.9006	0.0007	8.0277	9.9363
0.5 s	0.4	0.00	2.9261	469.4037	0.1994	0.0437	6.8763	5.1763
		0.20	3.5340	691.2737	0.2806	0.0333	6.1795	5.5986
		0.40	4.0992	1197.80	0.5449	0.0202	5.7675	5.8681
		0.60	3.9746	538.8862	1.9832	0.0065	5.2306	6.5797
0.5 s	0.6	0.00	2.2054	158.2427	0.1192	0.1502	6.6402	4.0588
		0.20	2.7334	240.8303	0.1450	0.1205	6.2103	4.3336
		0.40	3.6197	400.4815	0.2363	0.0700	5.9932	4.8498
		0.60	4.1308	794.0140	0.6861	0.0363	3.8215	5.6308
1.0 s	0.2	0.00	7.1610	648.0032	1.7147	0.0096	6.3963	8.2476
		0.20	6.4670	266.8441	3.7792	0.0006	6.3774	12.8763
		0.40	8.1355	228.1546	28.7530	0.00001	4.6333	19.8018
		0.60	5.2080	14.2740	52.6044	4.5 E-07	3.0334	25.5665
1.0 s	0.4	0.00	5.6883	715.9938	0.3020	0.0229	5.3343	6.6840
		0.20	6.0384	574.8852	0.6541	0.0144	4.5507	7.5993
		0.40	6.4035	295.9194	2.2129	0.0099	4.0196	8.0157
		0.60	6.6476	68.3533	19.7823	0.00004	2.2145	17.5554
1.0 s	0.6	0.00	2.6152	752.9919	0.0944	0.0649	7.8803	5.8379
		0.20	3.6570	998.2976	0.1349	0.0365	7.5449	6.5217
		0.40	5.6331	2208.96	0.2673	0.0157	5.7906	7.6711
		0.60	6.3323	1605.86	1.7142	0.0065	3.7641	8.8395
1.5 s	0.2	0.00	22.3293	*****	2558.86	7.7 E-07	3.3008	23.9728
		0.20	4.6805	4.7944	60.5913	0.0004	9.4974	9.0471
		0.40	5.1431	2.7396	299.9858	0.0002	8.5731	8.8553
		0.60	2.9941	*****	73.8075	0.0007	11.4392	3.7603
1.5 s	0.4	0.00	5.1183	284.0103	1.8356	0.0004	4.4258	13.9320
		0.20	4.9623	151.2659	4.6212	0.0001	2.9233	16.8476
		0.40	4.4528	81.6031	13.2349	6.8 E-07	0.0000	24.5430
		0.60	3.7813	10.9868	40.8749	0.0001	9.6852	8.7724
1.5 s	0.6	0.00	4.3409	805.2656	0.2460	0.0270	6.3591	6.7365
		0.20	4.8977	794.2376	0.5815	0.0139	5.8895	7.6249
		0.40	4.5618	261.1633	2.1963	0.0007	5.7424	12.1371
		0.60	3.5618	34.1553	7.6022	9.6 E-06	5.2448	18.5360

Tabla 6.2 Valores de los coeficientes ajustados para el caso $r_k=r_r=0.75$ para el marco equivalente y el parametro α .

Periodo	c_s	D_{id}	Disipador			Parametro (∞)		
			c_1	c_2	c_3	d_1	D_2	d_3
0.5 s	0.2	0.00	0.0021	9.8210	2.6350	6.4517	8.1069	1.4370
		0.20	0.0013	13.7621	4.0475	8.3406	5.6344	0.7403
		0.40	0.0100	14.5216	7.4469	5.1287	4.5130	1.0880
		0.60	0.3154	9.9563	56.7680	0.4587	6.0510	1.3464
0.5 s	0.4	0.00	0.0004	9.8492	12.4264	4.2071	5.2424	0.2973
		0.20	0.0005	13.7722	4.1312	26.4478	5.8225	0.3228
		0.40	0.0012	14.4098	315.8342	5.8387	5.2611	0.4352
		0.60	0.1782	9.6450	19.1521	0.6229	4.0698	0.9939
0.5 s	0.6	0.00	0.00003	9.8721	10.6821	16.2391	9.3819	2.1938
		0.20	0.00008	13.7219	4.7679	386.34223	0.00000	0.00000
		0.40	0.0003	14.7555	4.9556	65.6744	5.3073	1.5609
		0.60	0.0272	10.6686	5.2619	5.5665	0.00000	0.4264
1.0 s	0.2	0.00	0.1044	7.2681	2.9364	0.0419	6.1336	0.4528
		0.20	0.3028	6.9308	3.4266	0.0225	8.7848	0.8564
		0.40	1.1599	6.1313	3.5559	0.0005	1.3221	0.4365
		0.60	4.3041	4.7157	3.7427	0.000002	10.3132	0.0612
1.0 s	0.4	0.00	0.0029	9.7403	4.1581	0.9150	5.7224	0.4945
		0.20	0.0021	13.6714	3.6793	1.0239	7.3720	1.0918
		0.40	0.1680	5.9487	2.7682	0.2805	3.2662	0.7789
		0.60	0.9323	4.4744	3.0244	0.0002	3.3383	0.0899
1.0 s	0.6	0.00	0.00008	9.6916	38.9396	6.6639	6.1963	0.7353
		0.20	0.0001	13.4875	13.8787	32.1858	4.3342	0.5341
		0.40	0.0005	14.7218	7.0659	14.0956	3.8398	0.9669
		0.60	0.1945	4.5149	3.3758	0.0735	1.5659	0.2311
1.5 s	0.2	0.00	0.2852	3.6462	1.2695	0.2701	8.8445	1.7684
		0.20	0.4970	3.2130	1.2679	0.0355	9.0867	1.0849
		0.40	0.9103	2.7586	1.1354	0.0251	5.0424	1.0402
		0.60	1.6983	2.3036	0.9714	0.0020	10.4672	0.1384
1.5 s	0.4	0.00	0.0414	3.7438	1.8266	1.0318	7.4889	0.9814
		0.20	0.1032	2.9932	1.4912	0.9138	7.2976	1.9230
		0.40	0.2384	2.3773	1.2365	0.4023	4.7836	1.0221
		0.60	0.5433	2.1139	0.9396	0.3043	7.8285	1.6418
1.5 s	0.6	0.00	0.0043	4.7566	4.5076	5.4072	7.3707	1.0845
		0.20	0.0284	2.7707	2.4407	6.2281	6.3086	1.4393
		0.40	0.0887	2.0362	1.7902	2.8129	6.4622	1.9067
		0.60	0.2433	1.5638	1.0955	0.6968	7.3507	1.5929

Tabla 6.3 Valores de los coeficientes ajustados para el caso $r_k=r_r=0.75$ para el disipador y el parametro ∞ .

		COEFICIENTE SISMICO			
		0.0	0.2	0.4	0.6
COLUMNAS (MARCO)	CONCRETO	8047.12	8047.12	8047.12	8047.12
	ACERO L	4529.97	4529.97	4529.97	4529.97
	ACERO T	7091.72	7091.72	7091.72	7091.72
	CIMBRA	11249.28	11249.28	11249.28	11249.28
TRABES (MARCO)	CONCRETO	11659.78	11659.78	11659.78	11659.78
	ACERO L	1001.74	1157.38	1522.35	2054.10
	ACERO T	1067.04	1067.04	1067.04	1067.04
	CIMBRA	7056.00	7056.00	7056.00	7056.00
EDIFICIO	COLUMNAS Y TRABES	261933.15	262867.02	265056.85	268247.35
	ACABADOS	270256.14	270256.14	270256.14	270256.14
	LOSA	51282.00	51282.00	51282.00	51282.00
	INSTALACIONES	113333.22	113333.22	113333.22	113333.22
	TOTAL	696804.51	697738.38	699928.21	703118.71

Tabla. 7.1 Costos iniciales para un edificio de 5 niveles para diferentes coeficientes sísmicos de diseño y factor de comportamiento sísmico de 4.

		COEFICIENTE SISMICO			
		0.0	0.2	0.4	0.6
COLUMNAS (MARCO)	CONCRETO	20344.44	20344.44	20344.44	20344.44
	ACERO L	11452.50	11452.50	11782.59	15107.95
	ACERO T	22528.62	22528.62	22544.28	22655.77
	CIMBRA	24554.88	24554.88	24554.88	24554.88
TRABES (MARCO)	CONCRETO	9825.96	9825.96	9825.96	9825.96
	ACERO L	3571.41	5582.35	8947.02	12913.47
	ACERO T	2838.43	2838.43	2963.13	3232.28
	CIMBRA	18748.80	18748.80	18748.80	18748.80
EDIFICIO	COLUMNAS Y TRABES	683190.16	695255.82	718266.52	764301.25
	ACABADOS	831091.68	831091.68	831091.68	831091.68
	LOSA	157702.41	157702.41	157702.41	157702.41
	INSTALACIONES	348522.32	348522.32	348522.32	348522.32
	TOTAL	2020506.57	2032572.23	2055582.93	2101617.66

Tabla. 7.2 Costos iniciales para un edificio de 10 niveles para diferentes coeficientes sísmicos de diseño y factor de comportamiento sísmico de 4.

		COEFICIENTE SISMICO			
		0.0	0.2	0.4	0.6
COLUMNAS (MARCO)	CONCRETO	66462.45	66462.45	66462.45	66462.45
	ACERO L	37413.72	37413.72	42741.47	44827.00
	ACERO T	67984.39	67984.39	68126.13	66079.96
	CIMBRA	62979.84	62979.84	62979.84	62979.84
TRABES (MARCO)	CONCRETO	24458.65	24458.65	24458.65	24458.65
	ACERO L	8299.33	16768.60	30764.55	45525.61
	ACERO T	6614.02	6614.02	9182.87	10285.96
	CIMBRA	44434.66	44434.66	44434.66	44434.66
EDIFICIO	COLUMNAS Y TRABES	2549176.46	2616930.60	2793204.89	2920433.05
	ACABADOS	2804934.43	2804934.43	2804934.43	2804934.43
	LOSA	532245.62	532245.62	532245.62	532245.62
	INSTALACIONES	1176262.82	1176262.82	1176262.82	1176262.82
	TOTAL	7062619.33	7130373.47	7306647.77	7433875.92

Tabla. 7.3 Costos iniciales para un edificio de 15 niveles para diferentes coeficientes sísmicos de diseño y factor de comportamiento sísmico de 4.

		COEFICIENTE SISMICO			
		0.0	0.2	0.4	0.6
COLUMNAS (MARCO)	CONCRETO	134564.54	134564.54	134564.54	134564.54
	ACERO L	75750.45	75750.45	88438.33	109316.67
	ACERO T	141100.56	141100.56	141414.54	132002.03
	CIMBRA	118339.20	118339.20	118339.20	118339.20
TRABES (MARCO)	CONCRETO	63495.74	63495.74	63495.74	63495.74
	ACERO L	19310.65	37651.89	70514.45	104667.14
	ACERO T	14956.43	15726.83	24672.72	27731.39
	CIMBRA	99590.40	99590.40	99590.40	99590.40
EDIFICIO	COLUMNAS Y TRABES	6671079.67	6862196.11	7410299.12	7897071.15
	ACABADOS	7307726.03	7307726.03	7307726.03	7307726.03
	LOSA	1386665.28	1386665.28	1386665.28	1386665.28
	INSTALACIONES	3064530.27	3064530.27	3064530.27	3064530.27
	TOTAL	18430001.24	18621117.68	19169220.69	19655992.73

Tabla. 7.4 Costos iniciales para un edificio de 20 niveles para diferentes coeficientes sísmicos de diseño y factor de comportamiento sísmico de 4.

NIVELES	COSTO INICIAL
5	696804.51
10	2020506.57
15	7062619.33
20	18430001.24

Tabla. 7.5 Costos iniciales totales de edificios.

PARAMETROS	NIVELES DEL EDIFICIO			
	5	10	15	20
C_{LI}	164615.22	506224.73	1708508.44	4451195.55
C_{AM}	532189.29	1514281.84	5354110.89	13978805.70
a	0.05	0.185	0.35	0.38
b	1.5	2.0	1.45	1.40
c	0.5	0.8	0.5	0.5

Tabla 7.6 Valor de los parámetros para el cálculo del costo inicial de edificios (ec. 6.1).

CASO	RUBRO	10 NIVELES (AGUIRRE)	20 NIVELES (TADAS)
		$c_s = 0.2$	$c_s = 0.15$
		$R_K=0.75 ; r_R=0.520$	$r_K=0.75 ; r_R=0.339$
MARCO CONVENCIONAL	MARCO (M_C)	997368.06	4100065.3
	ACABADOS (A_C)	965600.0	4648518.0
	LOSA (L_C)	527175.0	887115.6
	INSTALACIONES (I_C)	1505200.0	1950000.0
	TOTAL	3995343.06	11585698.6
MARCO CON DISIPADORES	MARCO (M_D)	634977.2	3015789.9
	DISIPADORES (D)	556746.2	2948160.0
	DISIPADORES ($r_K=0.75$)	712497.53	5020327.42
	ACABADOS (A_D)	908800.0	3873765.0
	LOSA (L_D)	527175.0	887115.6
	INSTALACIONES (I_D)	1505200.0	1950000.0
	TOTAL	4132898.4	12674830.5
	TOTAL ($r_K=0.75$)	4288649.73	14746997.92

Tabla. 7.7 Valor de los parámetros para el cálculo del costo inicial de edificios (ec. 6.2).

ENTREPISO	FUERZA DE DISEÑO	COSTO
1	38500	7359.54
2	48063	7818.95
3	34537	6963.58
4	43315	6431.80
5	29836	5638.73
6	28282	4353.88
7	17793	3770.65
8	15698	2699.97
9	7785	3088.98
10	3316	1360.65

Tabla. 7.8 Relación de costo de disipadores con la fuerza de diseño.

RELACION	EDIFICIO 10 NIVELES	EDIFICIO 20 NIVELES
$(M_D+A_D)/(M_C+A_C)$	0.786	0.788
$D/(M_C+A_C)$	0.363	0.574

Tabla. 7.9 Relaciones de costo del marco con disipadores al marco sin disipadores de energía utilizando el costo el disipador para $\Gamma_k=0.75$.

cs	Drm	Co (cs=0.0)	Comc	Crnc	Umc	Drd	Comd	Crumd	Crdmd	Crtmd	Umd
						0.20		0.01478	0.00102	0.01580	1.01977
	0.20			0.0195	1.0212	0.40		0.01470	0.00084	0.01554	1.01951
						0.60		0.01416	0.00103	0.01518	1.01916
						0.20		0.01363	0.00091	0.01454	1.01852
	0.40			0.0224	1.0241	0.40		0.01358	0.00091	0.01448	1.01846
						0.60		0.01272	0.00109	0.01381	1.01778
0.20		696804.51	1.0017				1.00397				
						0.20		0.01110	0.00096	0.01206	1.01603
	0.60			0.0212	1.0229	0.40		0.01099	0.00083	0.01182	1.01580
						0.60		0.01172	0.00076	0.01247	1.01645
						0.20		0.00807	0.00086	0.00893	1.01290
	0.80			0.0188	1.0205	0.40		0.00908	0.00088	0.00996	1.01393
						0.60		0.00812	0.00076	0.00889	1.01286
						0.20		0.00950	0.00009	0.00959	1.01668
	0.20			0.0141	1.0189	0.40		0.00724	0.00015	0.00739	1.01449
						0.60		0.00772	0.00013	0.00785	1.01494
						0.20		0.00840	0.00012	0.00852	1.01541
	0.40			0.0126	1.0175	0.40		0.00792	0.00004	0.00797	1.01506
						0.60		0.00808	0.00016	0.00824	1.01533
0.40		696804.51	1.0048				1.00709				
						0.20		0.00722	0.00013	0.00735	1.01424
	0.60			0.0120	1.0168	0.40		0.00772	0.00018	0.00790	1.01500
						0.60		0.00683	0.00007	0.00690	1.01399
						0.20		0.00461	0.00011	0.00472	1.01181
	0.80			0.0102	1.0151	0.40		0.00490	0.00008	0.00499	1.01188
						0.60		0.00434	0.00016	0.00450	1.01159
						0.20		0.00489	0.00005	0.00493	1.01605
	0.20			0.0060	1.0148	0.40		0.00409	0.00005	0.00415	1.01526
						0.60		0.00356	0.00005	0.00361	1.01472
						0.20		0.00281	0.00004	0.00285	1.01396
	0.40			0.0061	1.0150	0.40		0.00443	0.00003	0.00446	1.01557
						0.60		0.00373	0.00000	0.00373	1.01484
0.60		696804.51	1.0088				1.01111				
						0.20		0.00327	0.00001	0.00329	1.01440
	0.60			0.0050	1.0138	0.40		0.00386	0.00003	0.00389	1.01500
						0.60		0.00334	0.00001	0.00334	1.01445
						0.20		0.00208	0.00005	0.00213	1.01324
	0.80			0.0047	1.0135	0.40		0.00208	0.00001	0.00209	1.01320
						0.60		0.00205	0.00000	0.00205	1.01316

Tabla 7.10 Costos en marcos de 5 niveles

cs	Drm	Co (cs=0.0)	Comc	Crmc	Umc	Drd	Comd	Crmd	Crdmd	Crtmd	Umd
						0.20		0.07143	0.00842	0.07985	1.18819
	0.20			0.1099	1.1143	0.40		0.07338	0.00741	0.08079	1.18736
						0.60		0.06924	0.00711	0.07635	1.17982
						0.20		0.07166	0.00877	0.08043	1.18877
	0.40			0.1142	1.1186	0.40		0.07419	0.00763	0.08182	1.18795
						0.60		0.07139	0.00693	0.07832	1.18223
0.20		2020506.57	1.0044				1.10834				
						0.20		0.07296	0.00780	0.08076	1.18910
	0.60			0.1124	1.1169	0.40		0.07378	0.00812	0.08189	1.19024
						0.60		0.07325	0.00769	0.08094	1.18485
						0.20		0.06338	0.00830	0.07168	1.17980
	0.80			0.1165	1.1210	0.40		0.06480	0.00777	0.07257	1.17914
						0.60		0.06750	0.00688	0.07438	1.17918
						0.20		0.02912	0.00173	0.03085	1.15428
	0.20			0.0396	1.0573	0.40		0.02879	0.00169	0.03048	1.15391
						0.60		0.02709	0.00137	0.02845	1.15188
						0.20		0.03019	0.00207	0.03225	1.15569
	0.40			0.0420	1.0597	0.40		0.03123	0.00191	0.03315	1.15658
						0.60		0.03013	0.00167	0.03180	1.15523
0.40		2020506.57	1.0177				1.12343				
						0.20		0.02837	0.00167	0.03004	1.15348
	0.60			0.0449	1.0626	0.40		0.02788	0.00189	0.02976	1.15319
						0.60		0.02767	0.00164	0.02931	1.15275
						0.20		0.02295	0.00210	0.02505	1.14948
	0.80			0.0393	1.0570	0.40		0.02360	0.00186	0.02546	1.14889
						0.60		0.02303	0.00189	0.02492	1.14835
						0.20		0.00587	0.00007	0.00593	1.15437
	0.20			0.0085	1.0482	0.40		0.00671	0.00010	0.00680	1.15524
						0.60		0.00727	0.00000	0.00727	1.15571
						0.20		0.00639	0.00002	0.00641	1.15485
	0.40			0.0110	1.0507	0.40		0.00533	0.00004	0.00537	1.15381
						0.60		0.00583	0.00000	0.00583	1.15427
0.60		2020506.57	1.0397				1.14844				
						0.20		0.00592	0.00003	0.00595	1.15438
	0.60			0.0095	1.0492	0.40		0.00485	0.00000	0.00486	1.15329
						0.60		0.00637	0.00005	0.00642	1.15486
						0.20		0.00493	0.00010	0.00503	1.15347
	0.80			0.0074	1.0471	0.40		0.00503	0.00010	0.00513	1.15357
						0.60		0.00423	0.00005	0.00429	1.15273

Tabla 7.11 Costos en marcos de 10 niveles

cs	Drn	Co (cs=0.0)	Comc	Crnc	Umc	Drd	Comd	Crmd	Crmd	Crtmd	Umd
						0.20		0.34294	0.01698	0.35992	1.56768
	0.20			0.5195	1.5312	0.40		0.35383	0.01334	0.36718	1.57493
						0.60		0.37204	0.01095	0.38299	1.59075
						0.20		0.36621	0.01620	0.38240	1.59016
	0.40			0.5498	1.5625	0.40		0.38431	0.01383	0.39815	1.60590
						0.60		0.39354	0.01189	0.40543	1.61318
0.20		7062619.33	1.0128				1.20776				
						0.20		0.36611	0.01941	0.38452	1.59228
	0.60			0.5381	1.5509	0.40		0.36945	0.01385	0.39329	1.59105
						0.60		0.39146	0.01151	0.40297	1.61072
						0.20		0.29693	0.01918	0.31512	1.52287
	0.80			0.4914	1.5042	0.40		0.30371	0.01503	0.31874	1.52650
						0.60		0.31464	0.01104	0.32568	1.53344
						0.20		0.09962	0.00157	0.10119	1.33602
	0.20			0.1365	1.1709	0.40		0.09915	0.00089	0.10004	1.33486
						0.60		0.09869	0.00105	0.09974	1.33456
						0.20		0.10675	0.00157	0.10832	1.34315
	0.40			0.1433	1.1777	0.40		0.10682	0.00095	0.10777	1.34259
						0.60		0.10591	0.00113	0.10704	1.34187
0.40		7062619.33	1.0344				1.23493				
						0.20		0.10549	0.00104	0.10653	1.34136
	0.60			0.1539	1.1983	0.40		0.11177	0.00137	0.11314	1.34797
						0.60		0.10775	0.00117	0.10892	1.34375
						0.20		0.09556	0.00192	0.09748	1.33231
	0.80			0.1411	1.1755	0.40		0.09301	0.00135	0.09436	1.32918
						0.60		0.09295	0.00107	0.09402	1.32884
						0.20		0.02667	0.00017	0.02683	1.29481
	0.20			0.0410	1.1018	0.40		0.02763	0.00006	0.02769	1.29567
						0.60		0.02667	0.00006	0.02673	1.29471
						0.20		0.02940	0.00014	0.02953	1.29751
	0.40			0.0526	1.1134	0.40		0.02796	0.00003	0.02799	1.29596
						0.60		0.02832	0.00004	0.02836	1.29633
0.60		7062619.33	1.0608				1.26799				
						0.20		0.02712	0.00013	0.02725	1.29522
	0.60			0.0532	1.1140	0.40		0.02771	0.00004	0.02775	1.29573
						0.60		0.02722	0.00009	0.02731	1.29529
						0.20		0.02069	0.00012	0.02081	1.28878
	0.80			0.0433	1.1041	0.40		0.02083	0.00006	0.02089	1.28887
						0.60		0.02066	0.00002	0.02069	1.28865

Tabla 7.12 Costos en marcos de 15 niveles

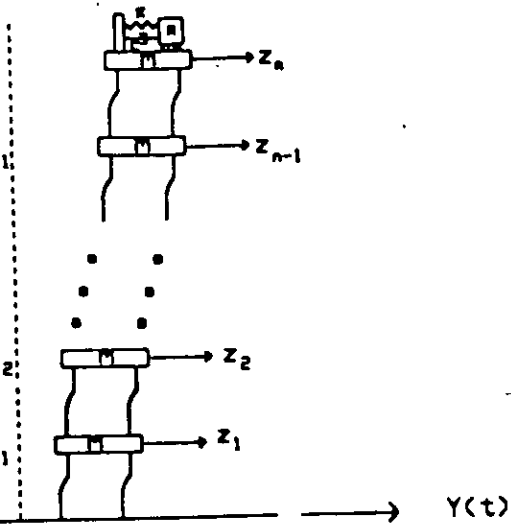


Fig. 2.1 Sistema de varios grados de libertad provisto de un oscilador resonante.

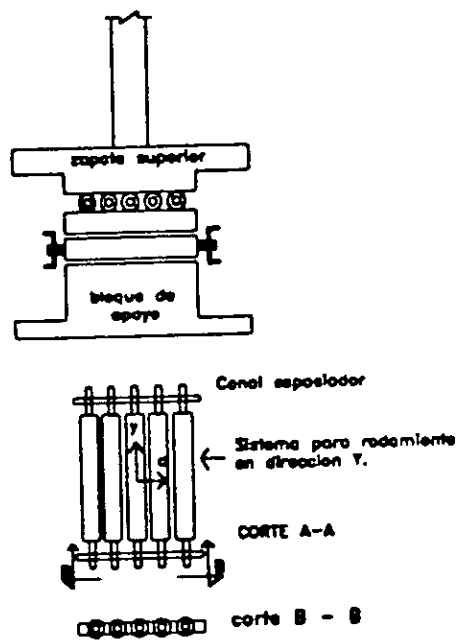
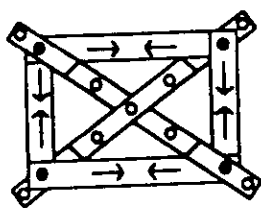
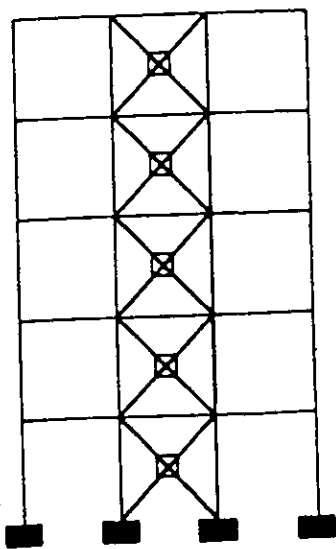


Fig 2.2 Aislador rodante



a) Dispositivo de fricción



b) Marco rígido con dispositivos de fricción.

Fig. 2.3 Dispositivo de fricción en estructuras.

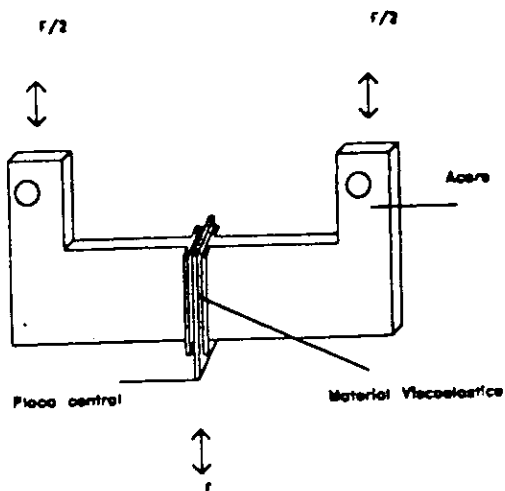


Fig. 2.4 Disipador viscoelástico.

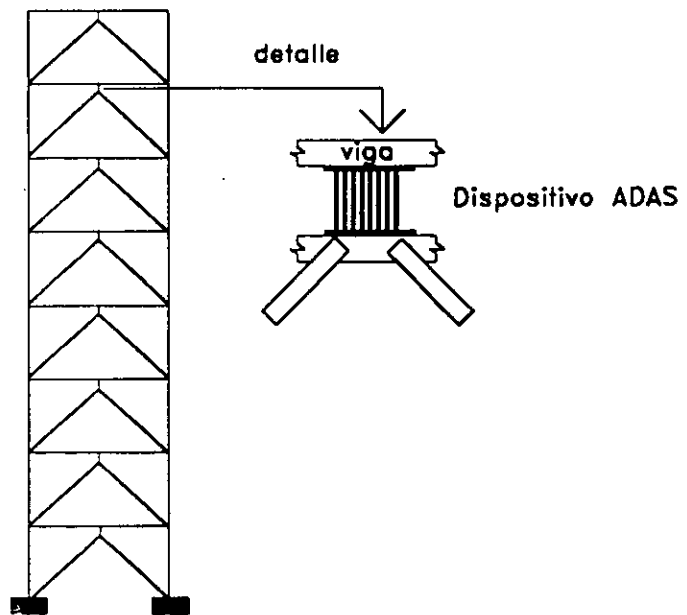


Fig. 2.5 Marcos con dispositivos ADAS y arriostamiento en forma de V.

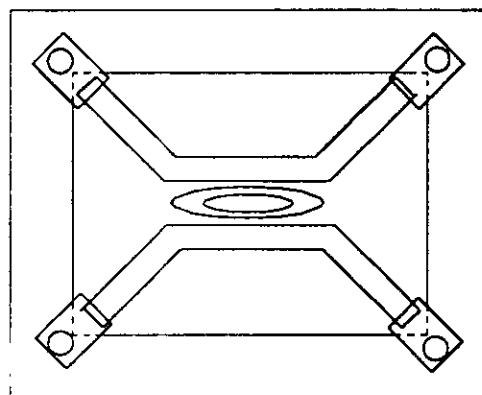


fig. 2.6 Marco estructural equipado con elemento U

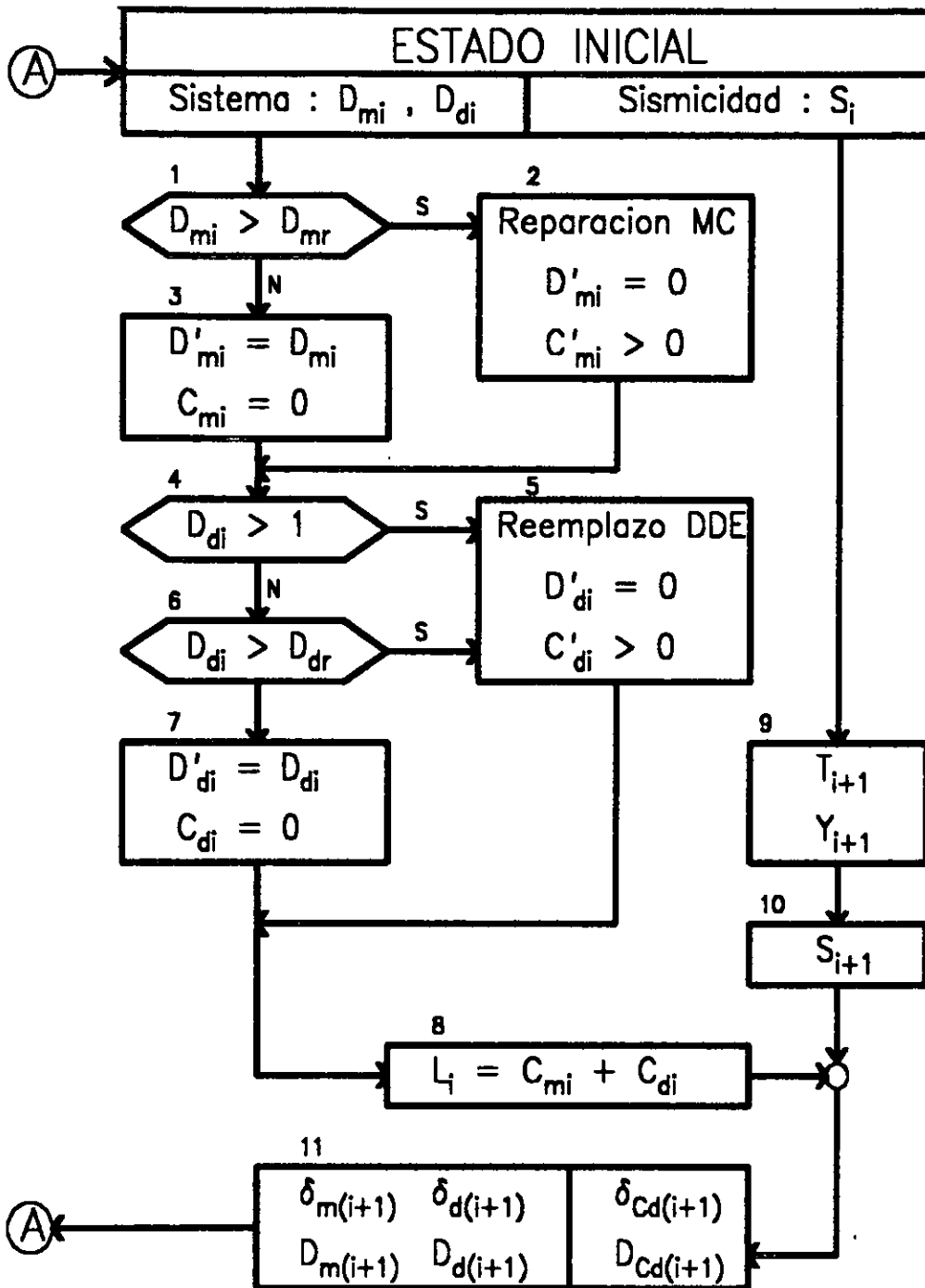
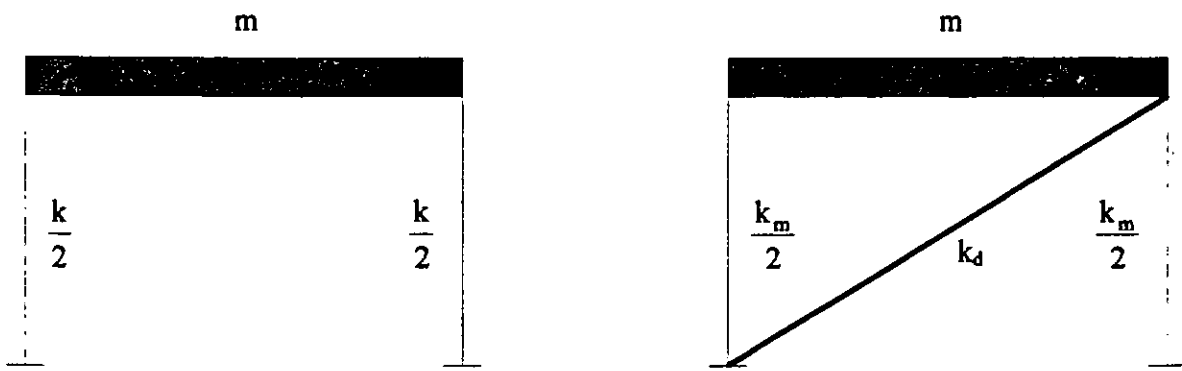


Fig. 3.1 Diagrama de flujo de los ciclos respuesta-reparación



a) Marco convencional

b) Marco con disipador

Fig. 4.1 Sistemas simples

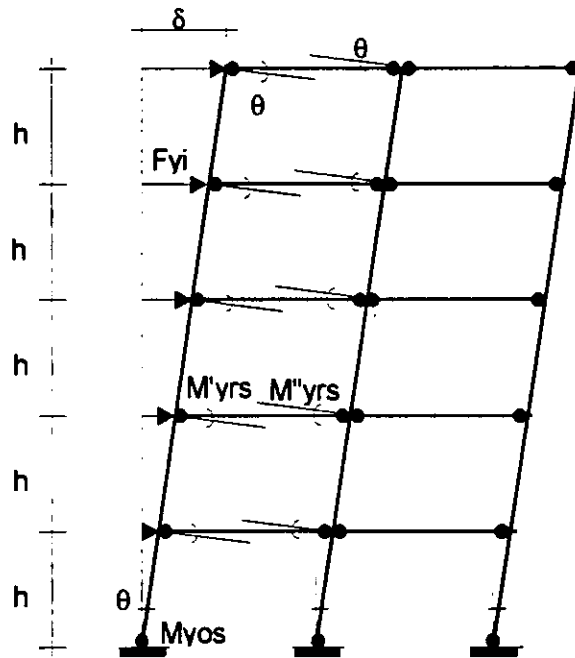


Fig. 4.2 Mecanismo de falla

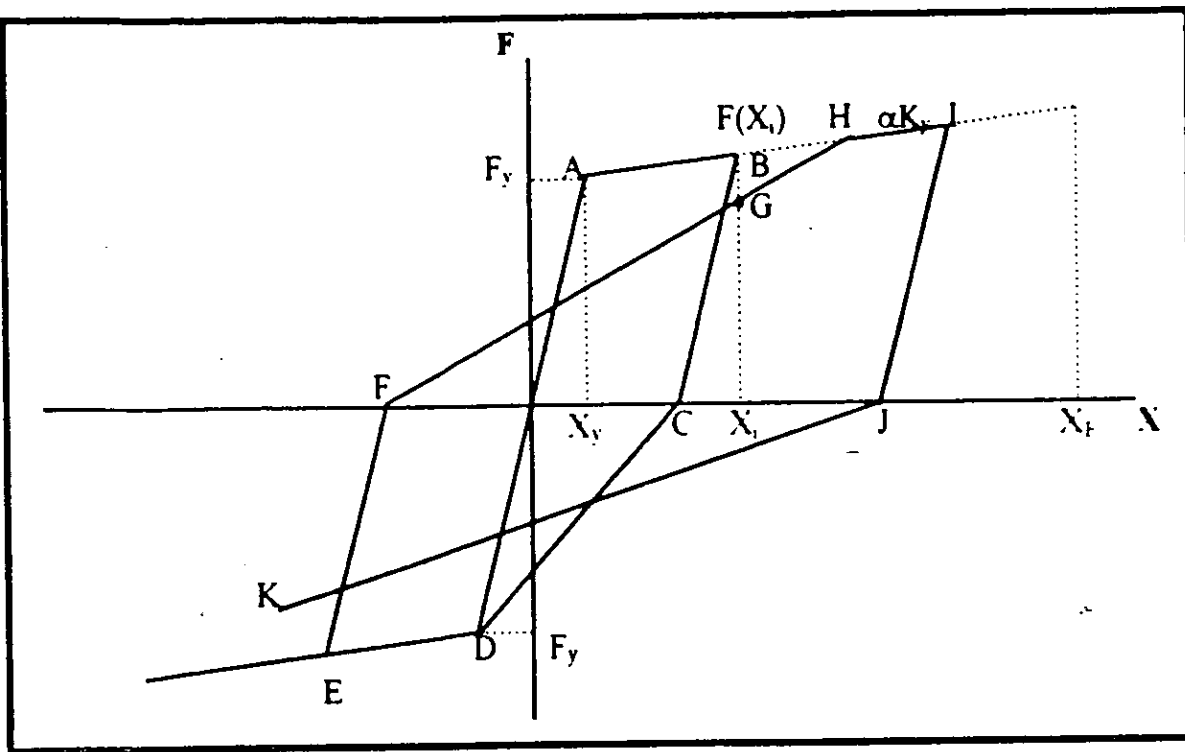


Fig. 4.3 a Curva carga - desplazamiento

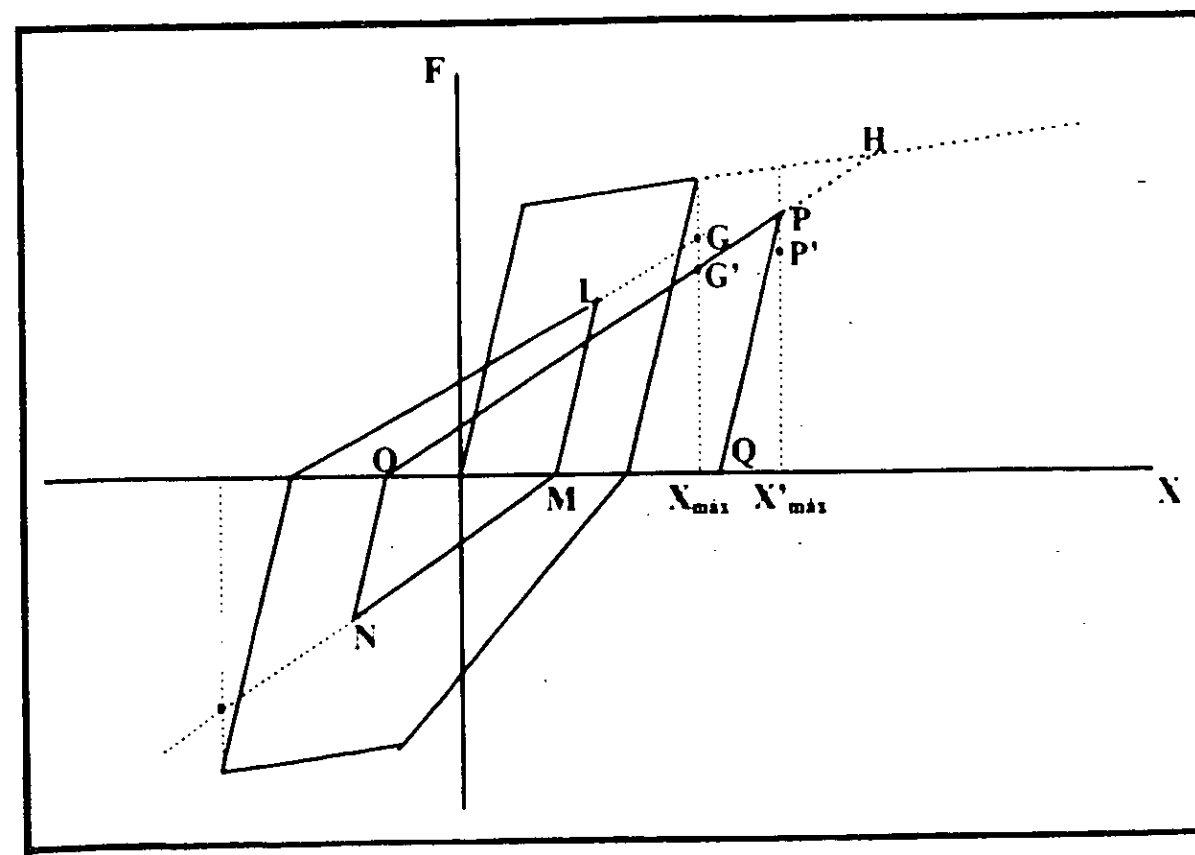


Fig. 4.3 b Comportamiento sin alcanzar la fluencia

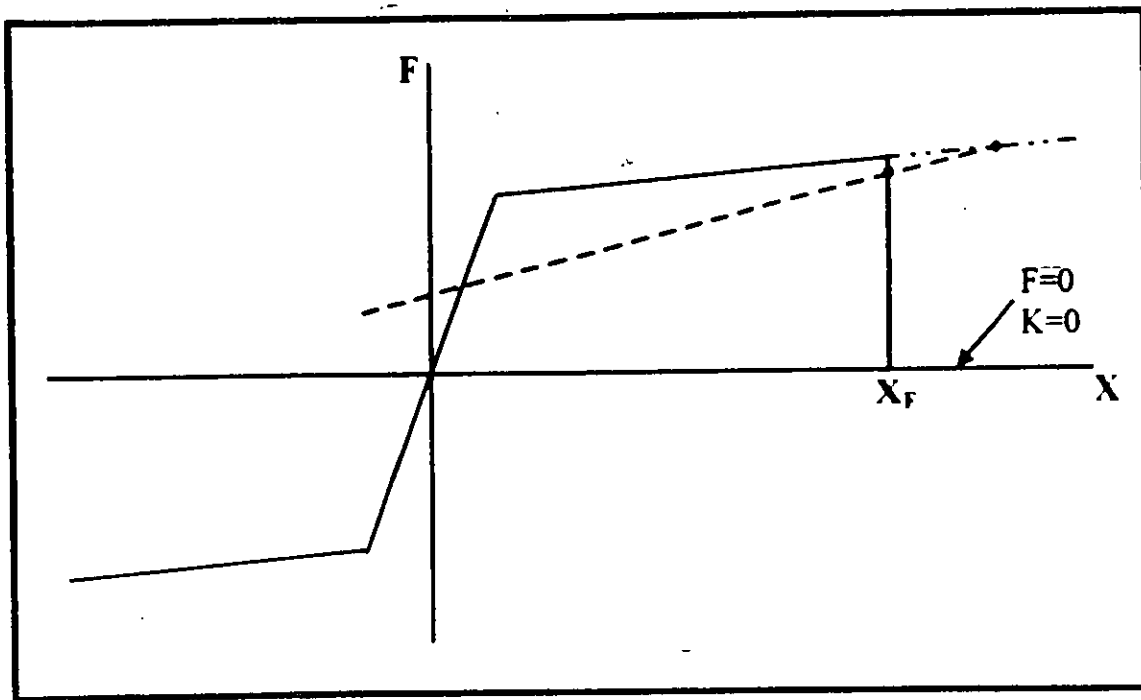


Fig. 4.3 c Pérdida total de rigidez y resistencia

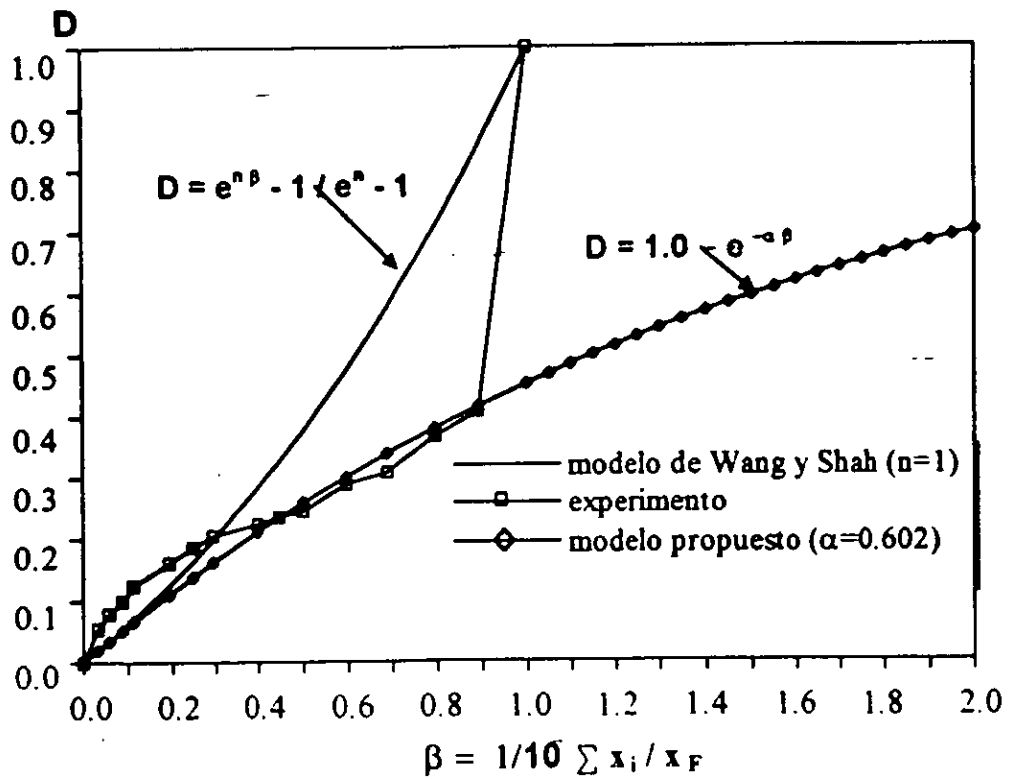


Fig. 4.4 Comparación entre el modelo de daño propuesto y el modelo de Wang y Shah.

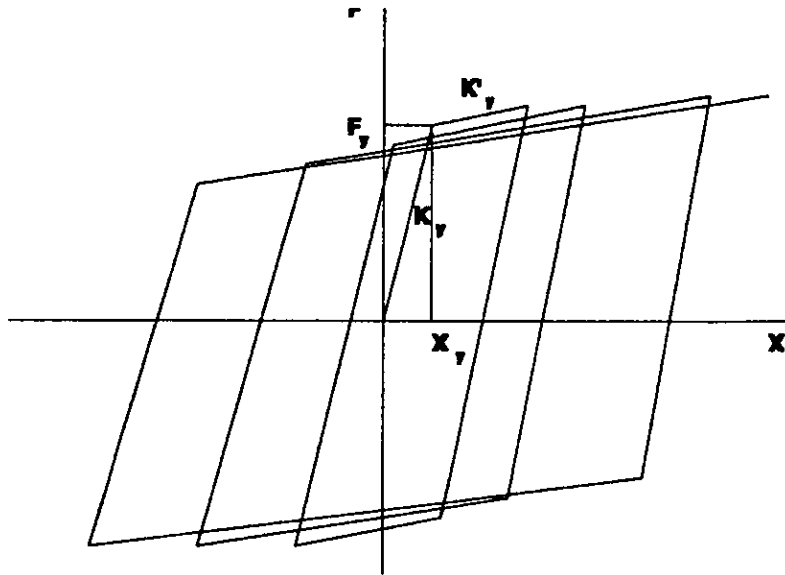


Fig. 4.5 Modelo de histéresis del disipador de energía.

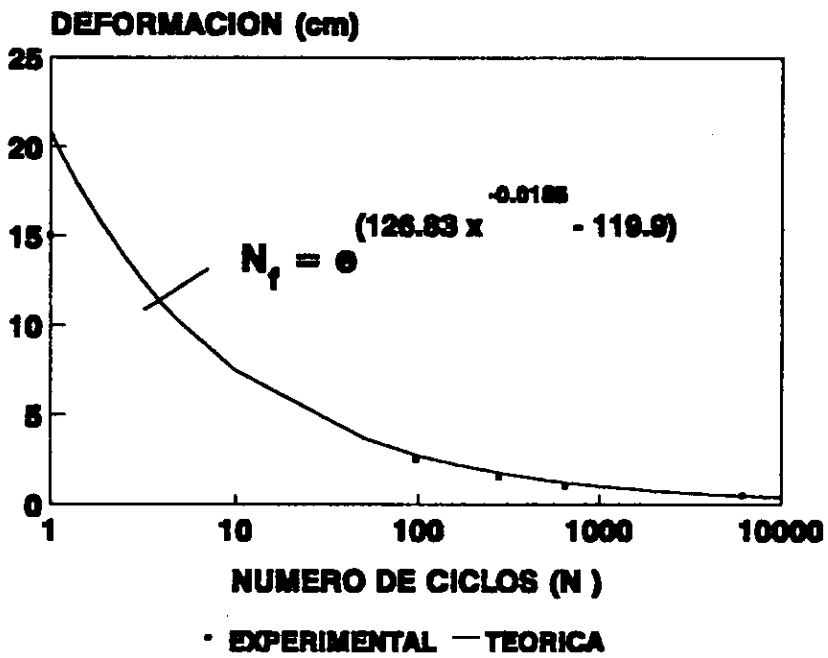


Fig. 4.6 Curva de fatiga para los disipadores de energía.

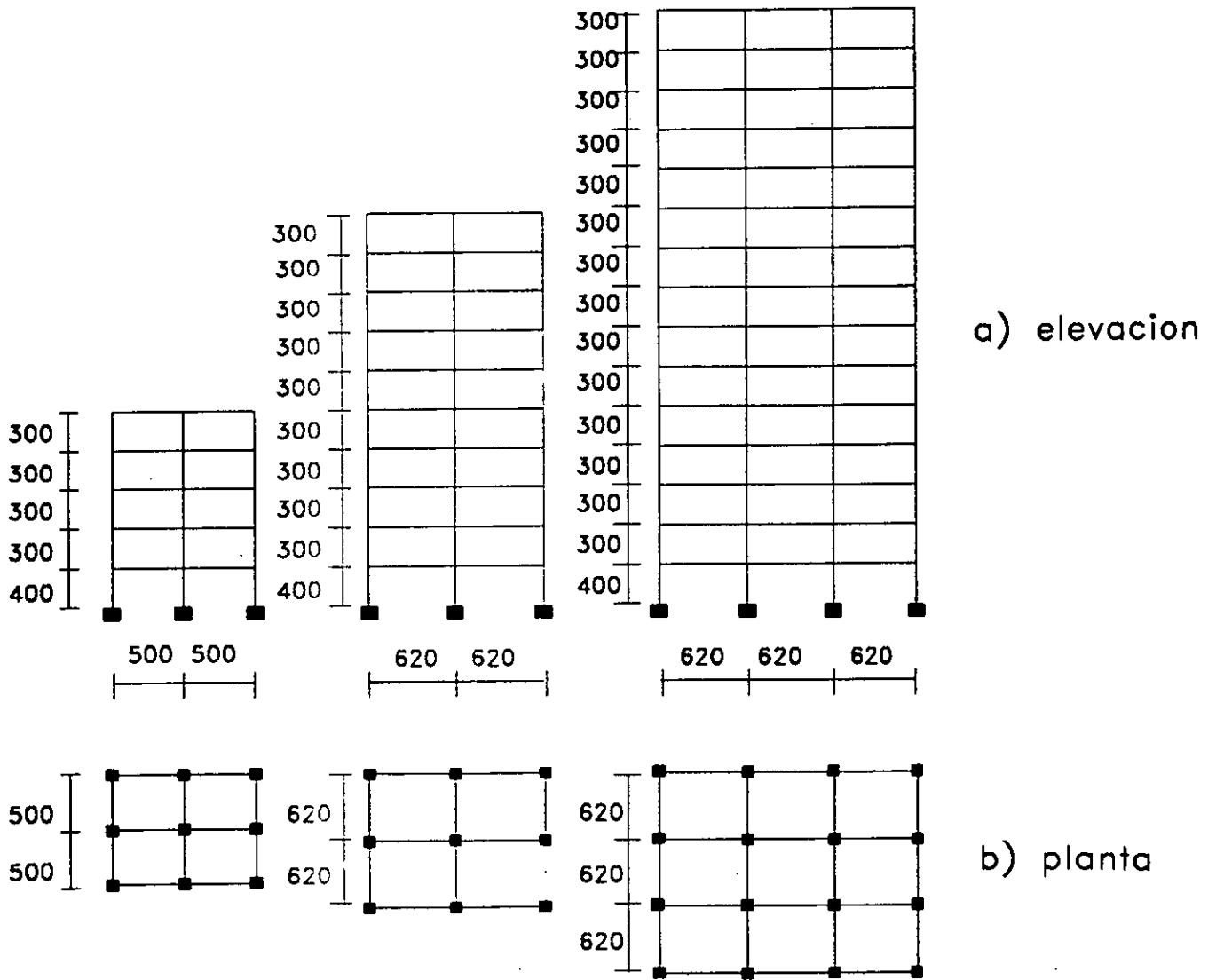


fig 5.1 Sistemas reales sin disipador estudiados.

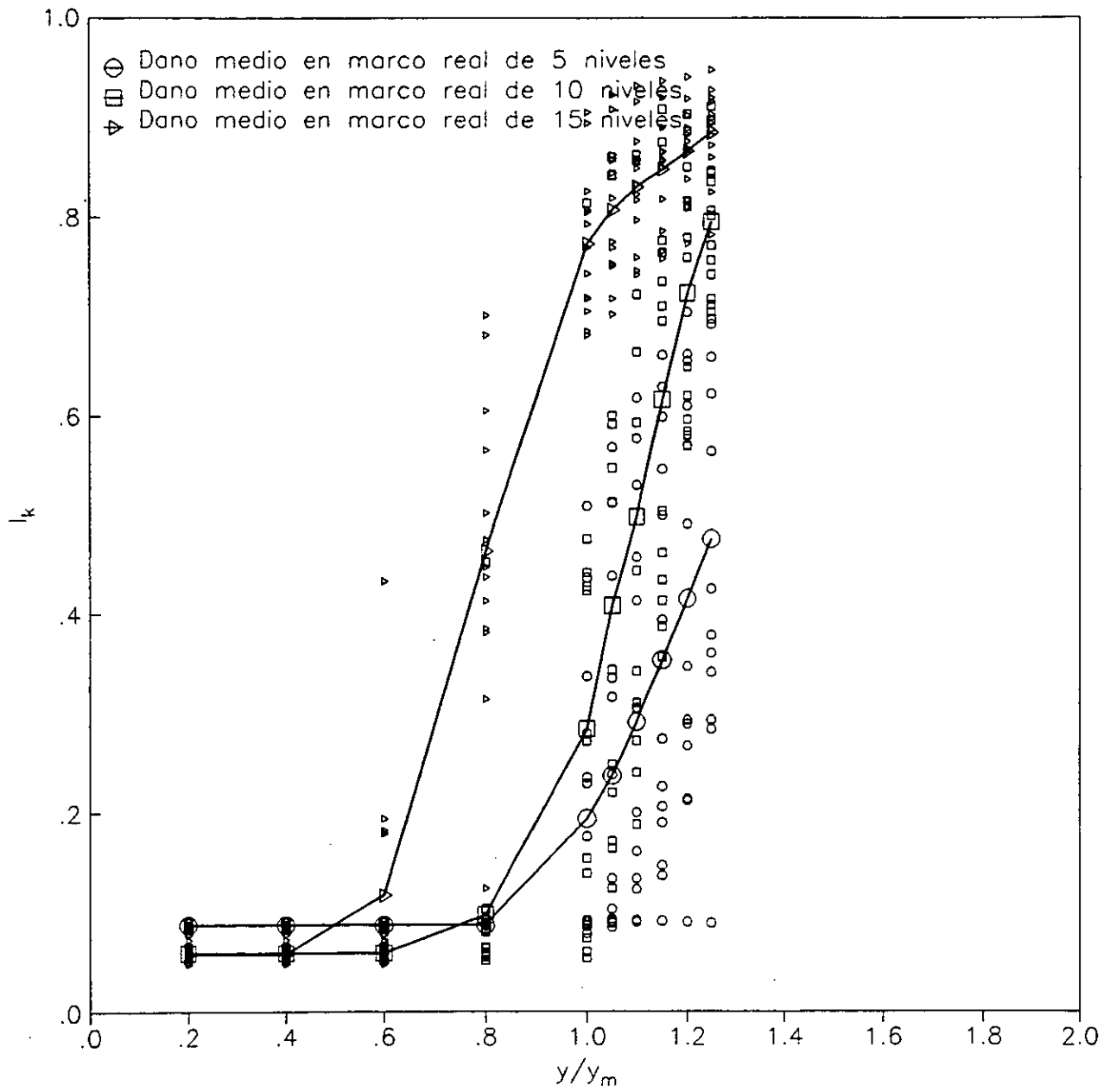


Fig. 6.1 Variación del daño en marcos reales convencionales para $c_s = 0.4$

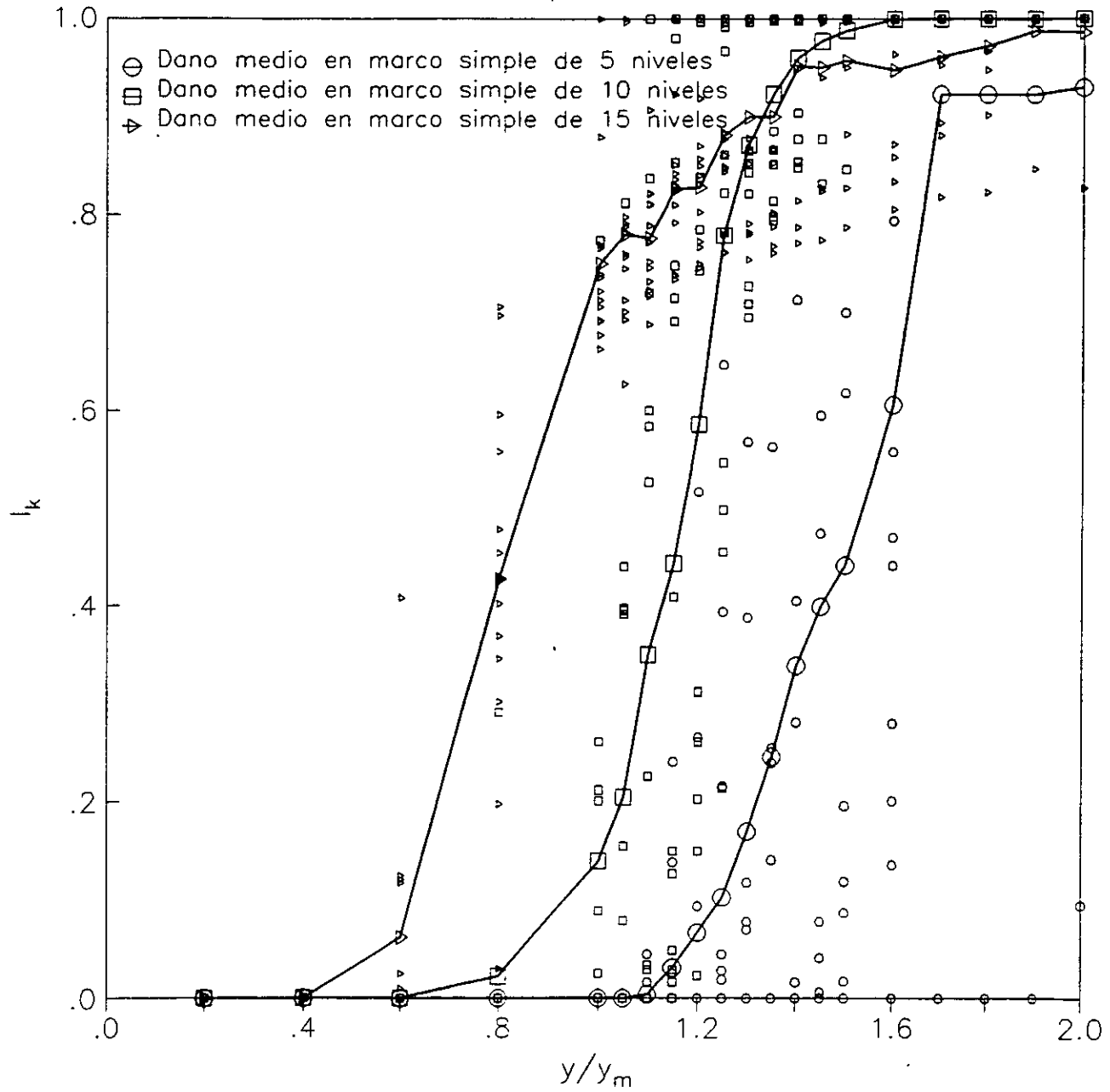


Fig. 6.2 Variación del daño en sistemas equivalentes convencionales para $c_s = 0.4$

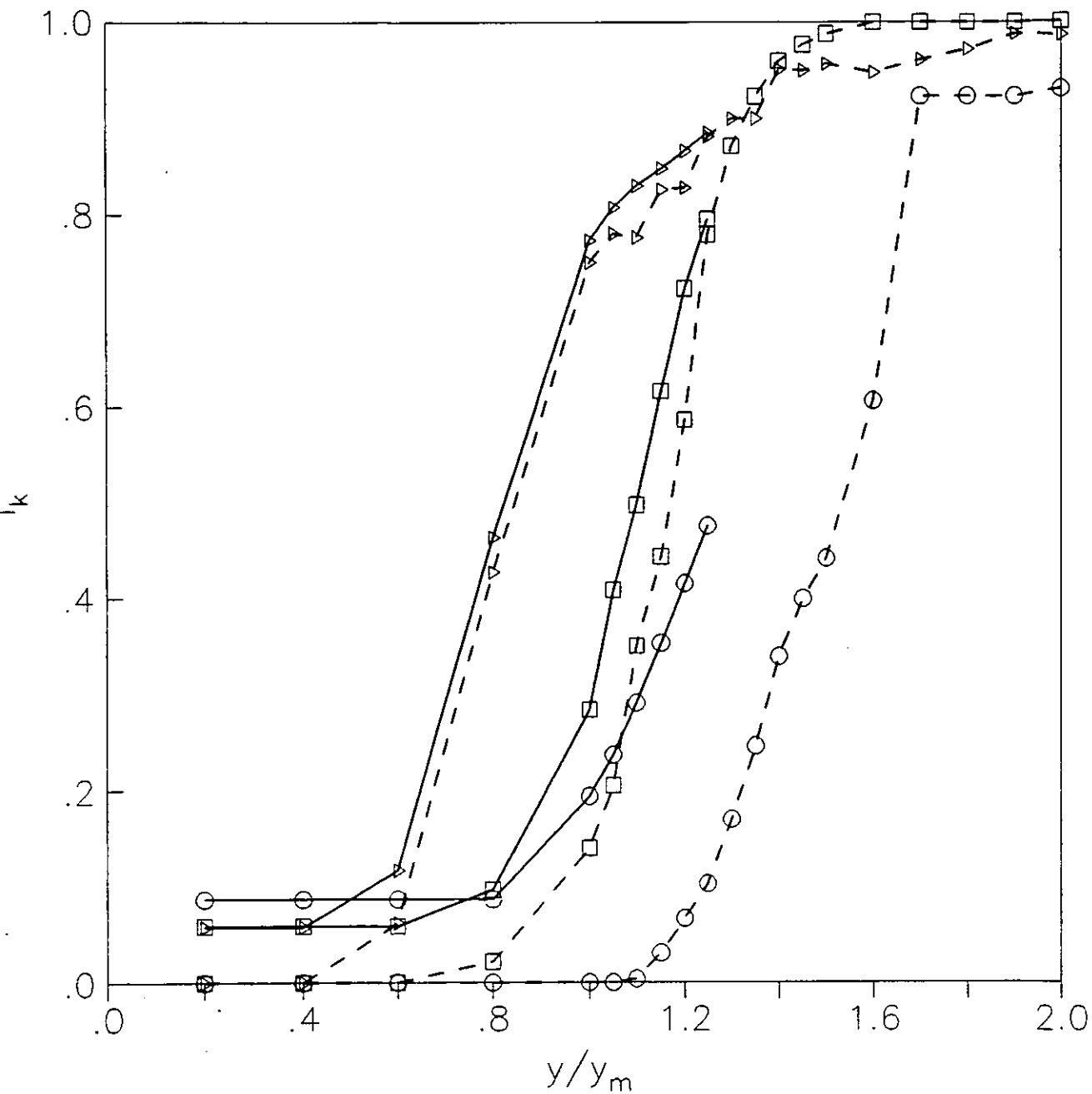
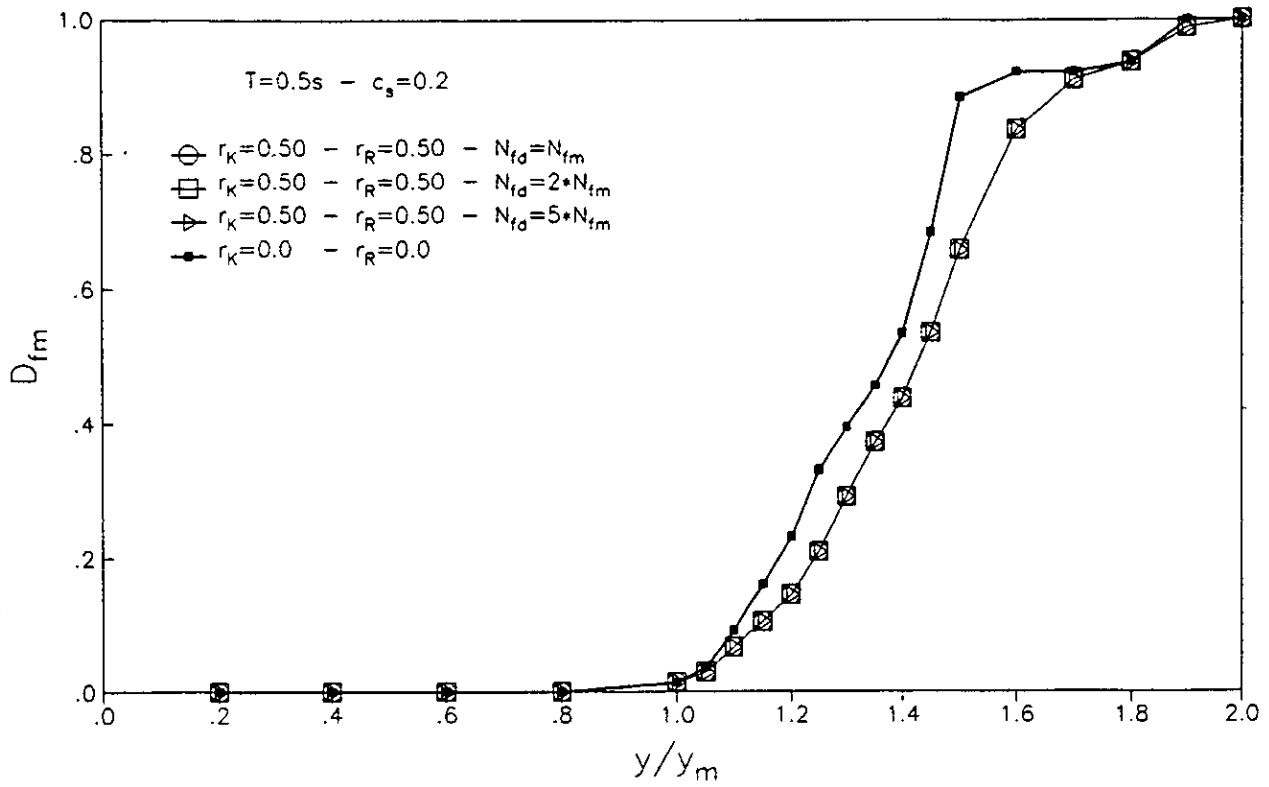
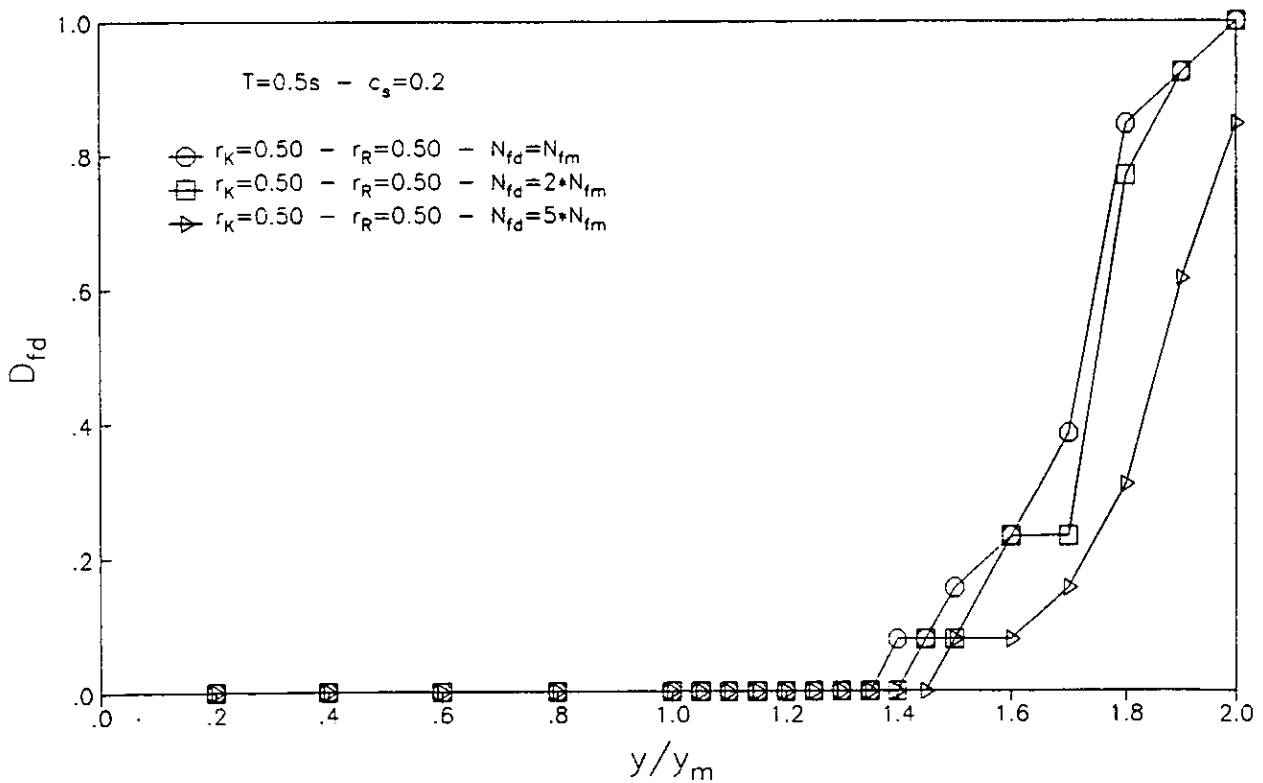


Fig. 6.3

Comparación de daños medios de marcos reales y sistemas equivalentes



a) MARCO



b) DISIPADOR

Fig. 6.4 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.50$, $T=0.5s$, $C_s=0.20$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

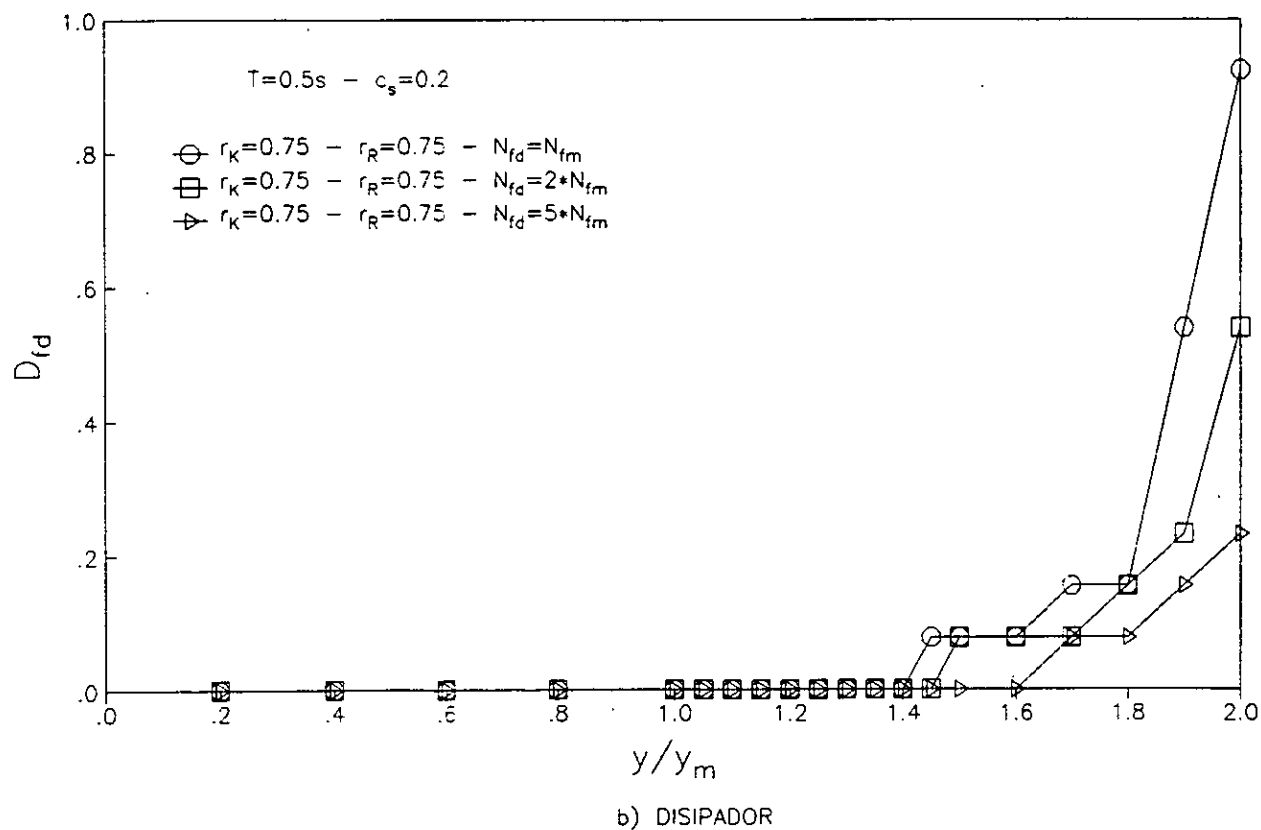
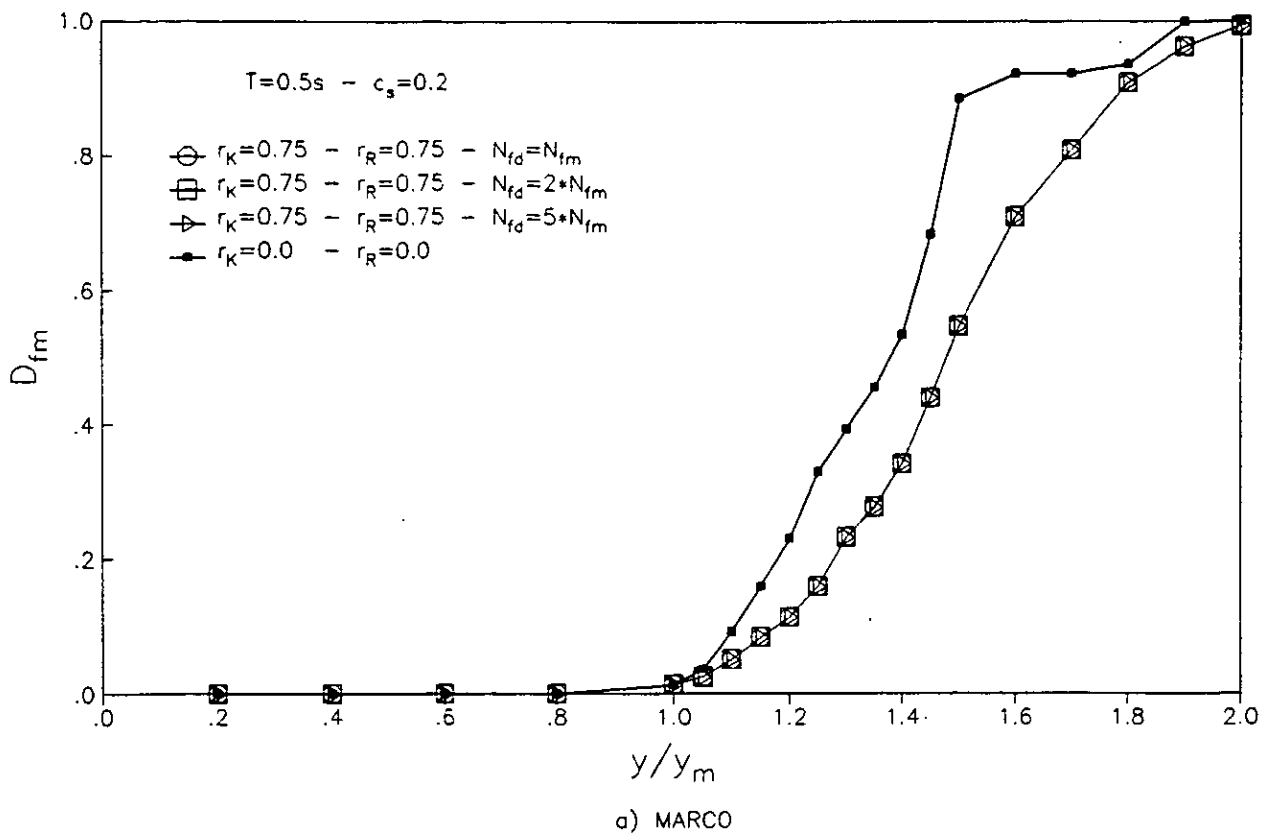


Fig. 6.5 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.75$, $T=0.5s$, $C_s=0.20$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

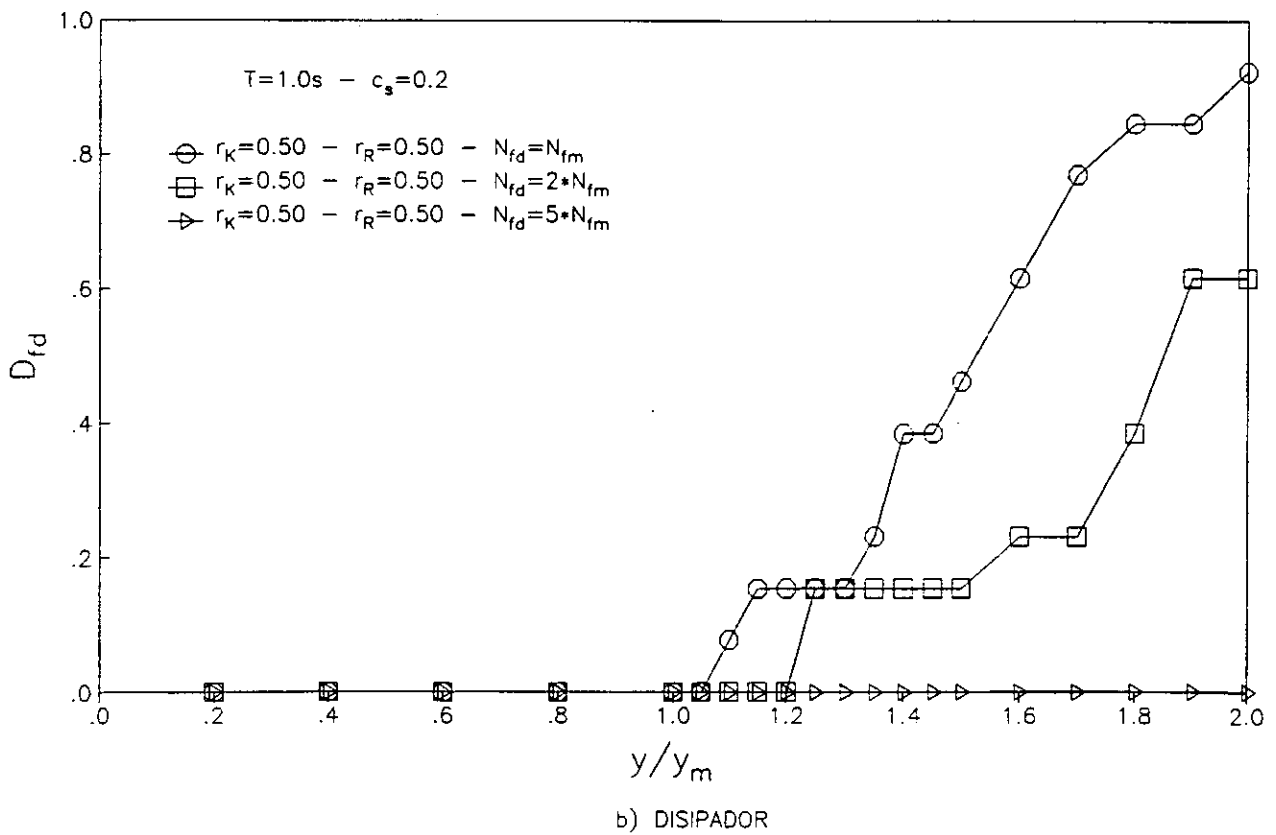
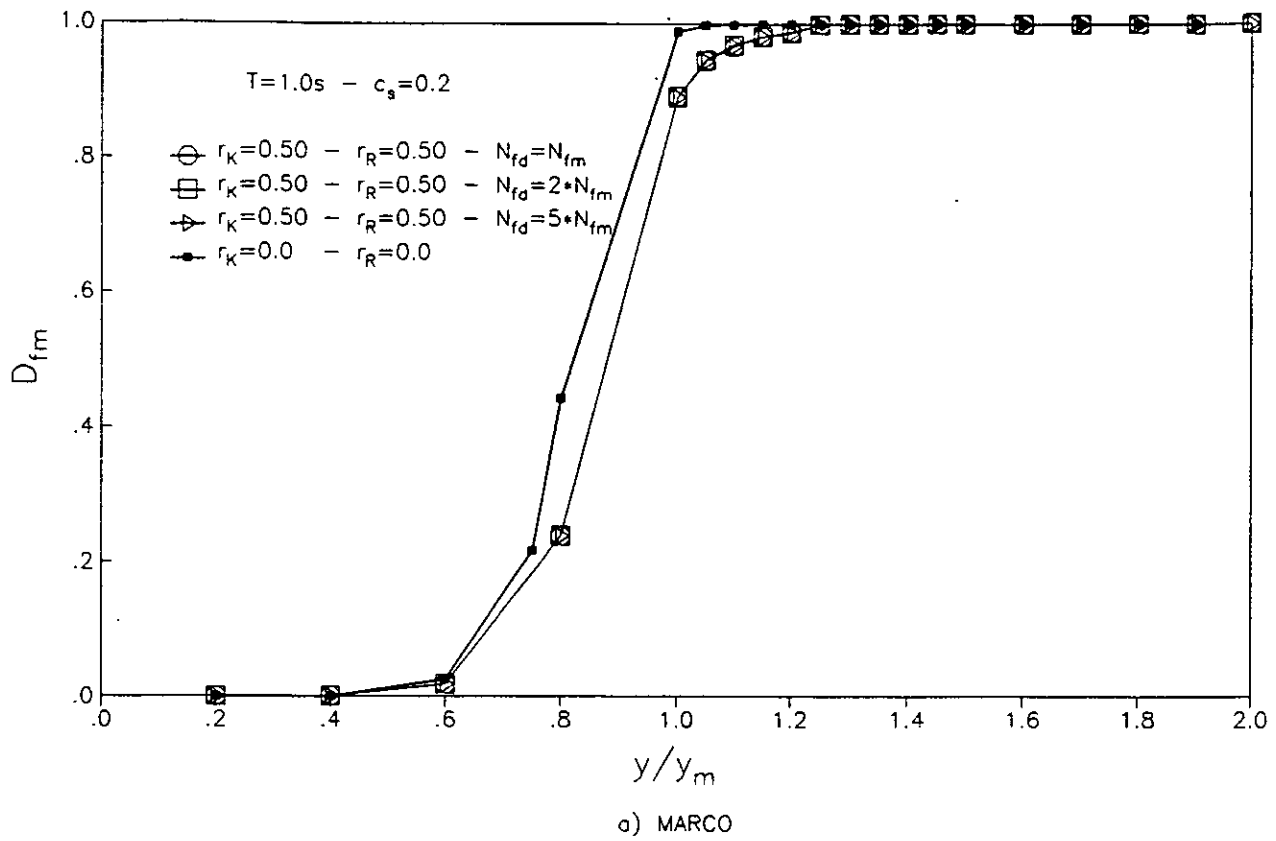
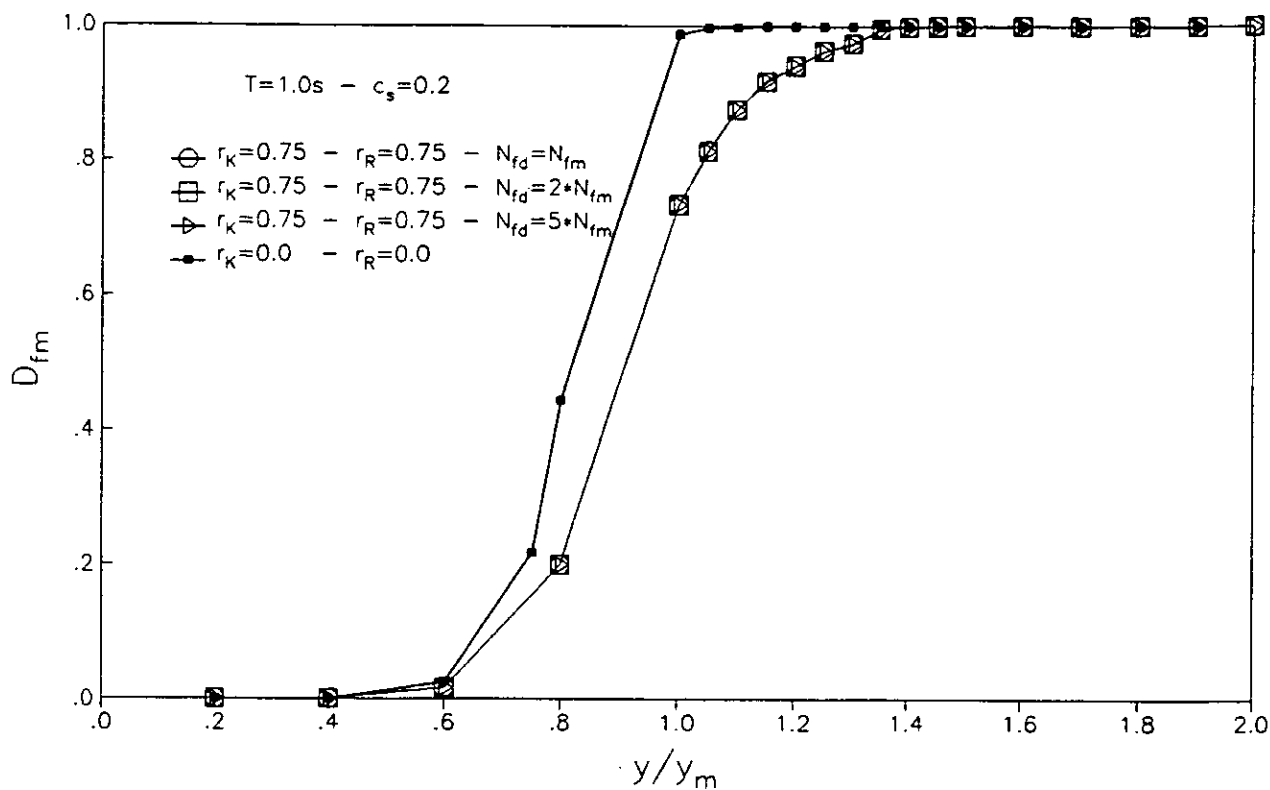
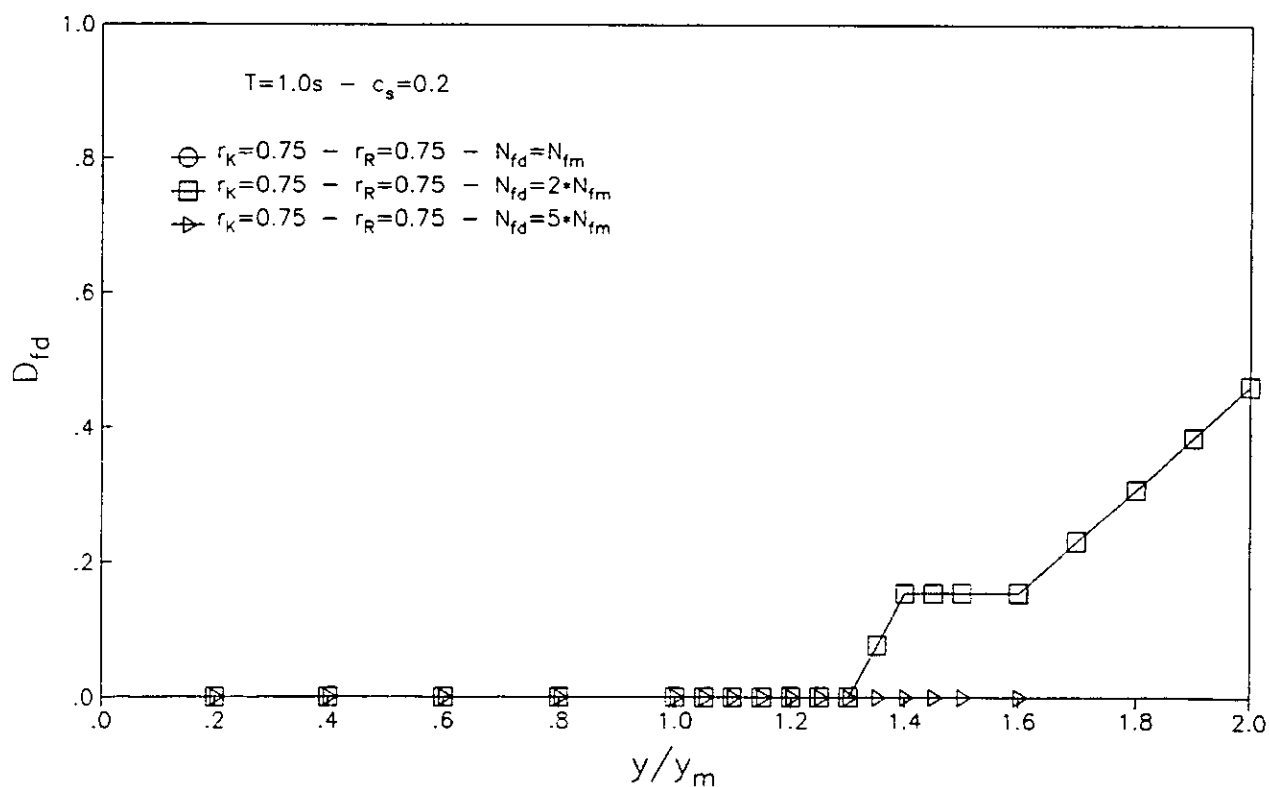


Fig. 6.6 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.50$, $T=1.0s, C_s=0.20$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

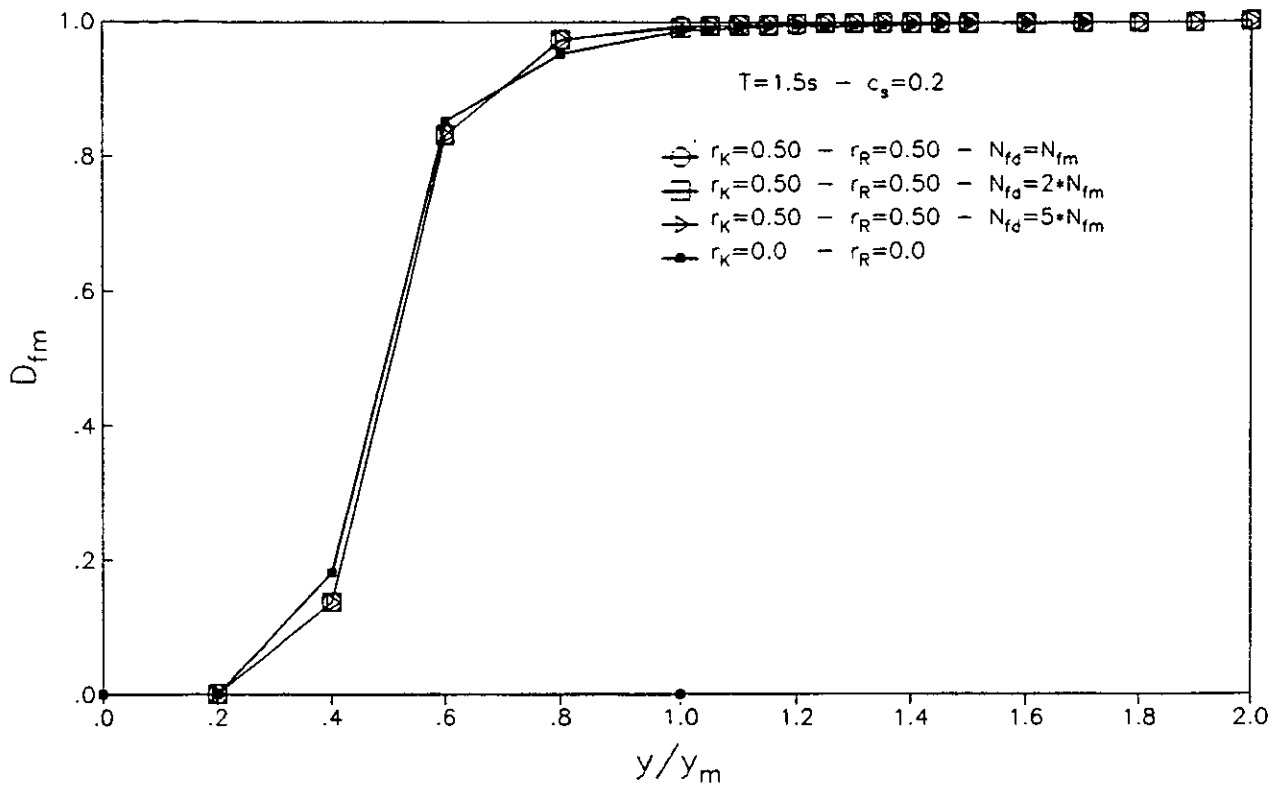


a) MARCO

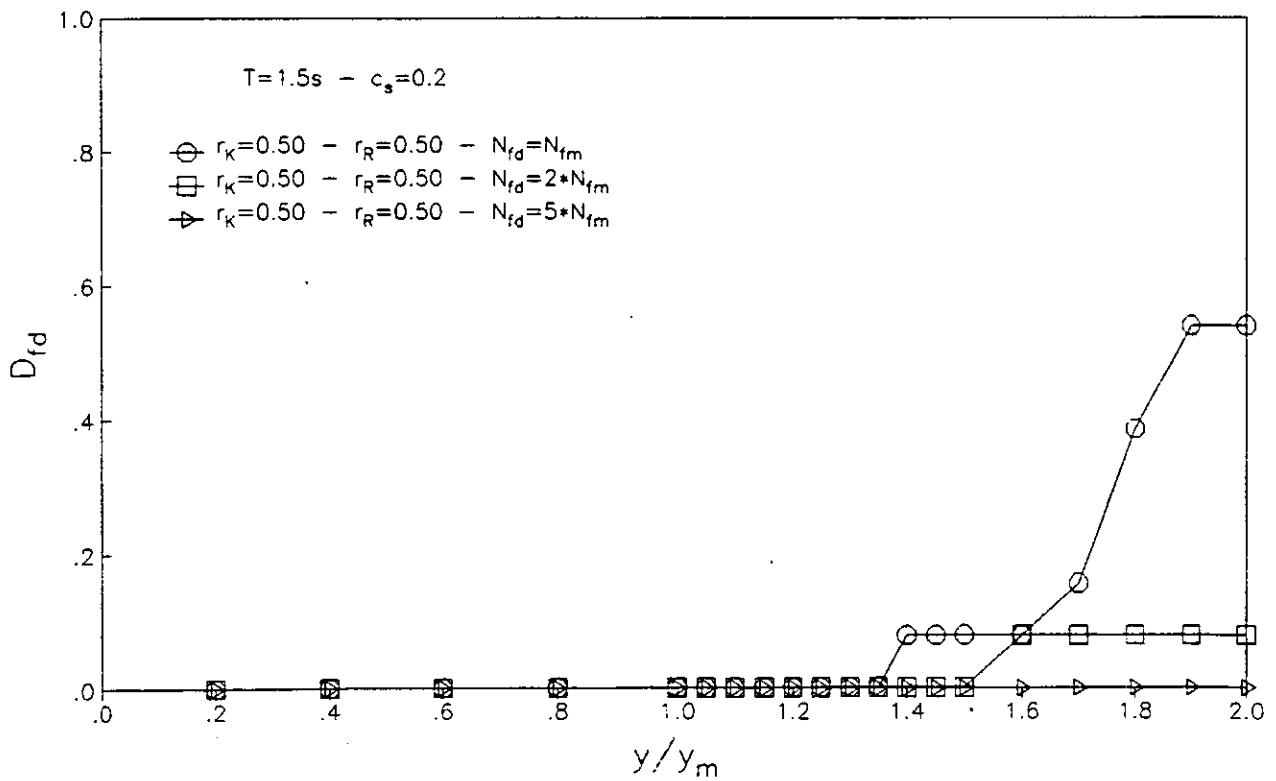


b) DISIPADOR

Fig. 6.7 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.0s, C_s=0.20$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).



a) MARCO



b) DISIPADOR

Fig. 6.8 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.50$, $T=1.5s, c_s=0.20$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

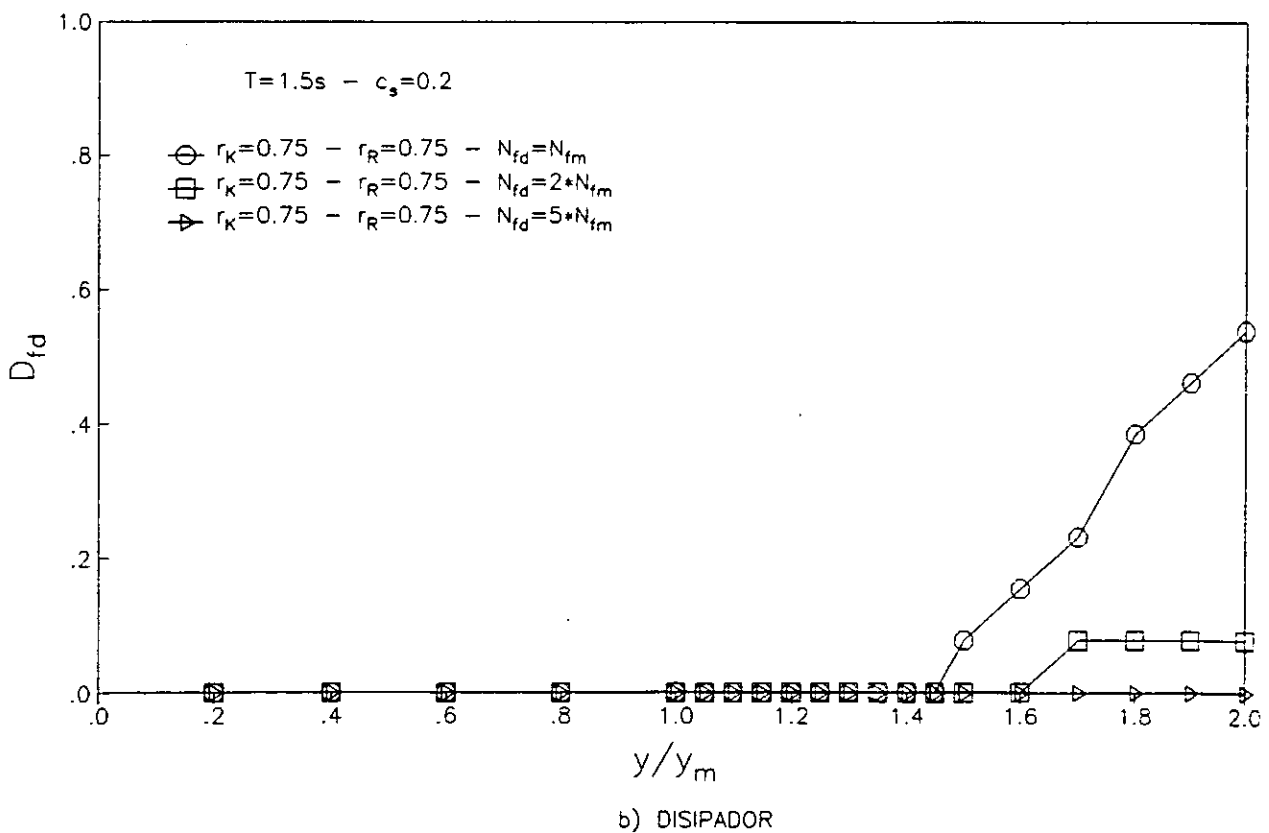
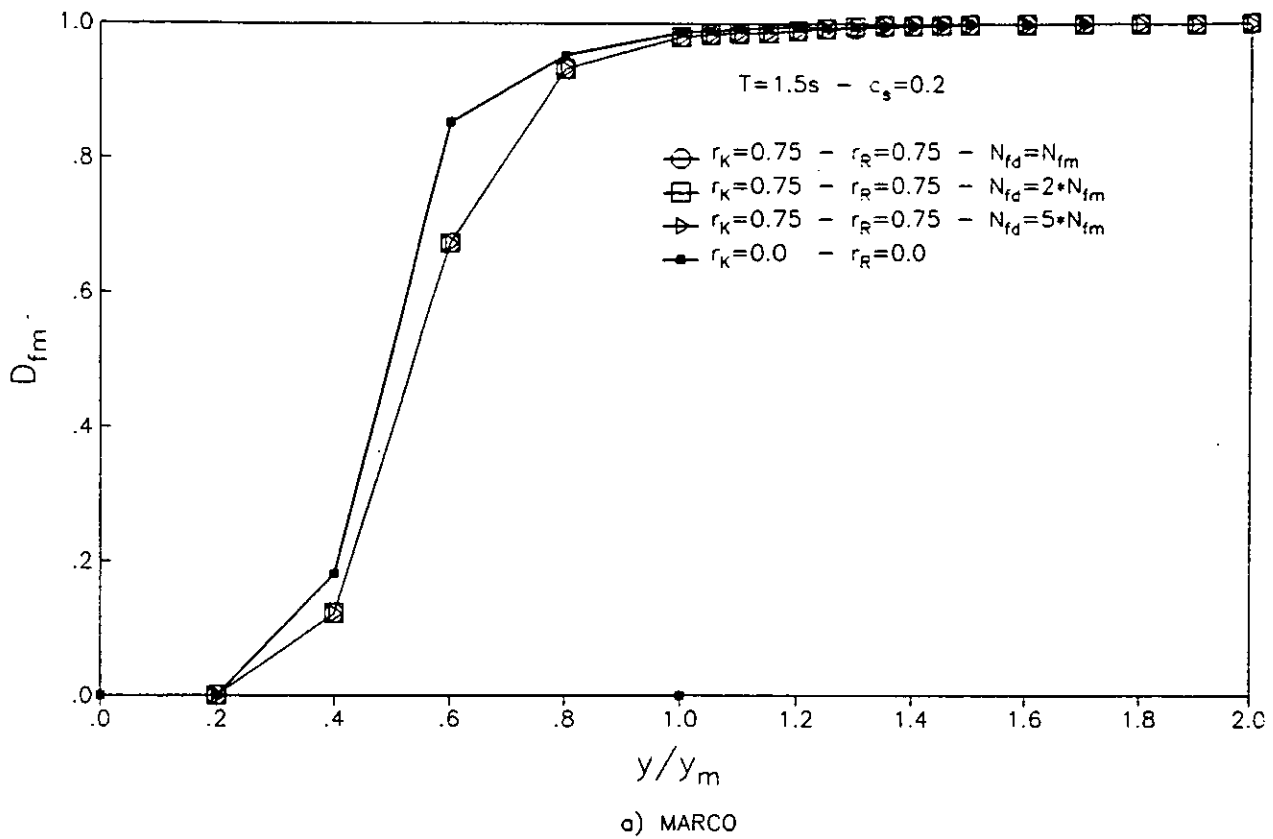


Fig. 6.9 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.5s$, $c_s=0.20$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

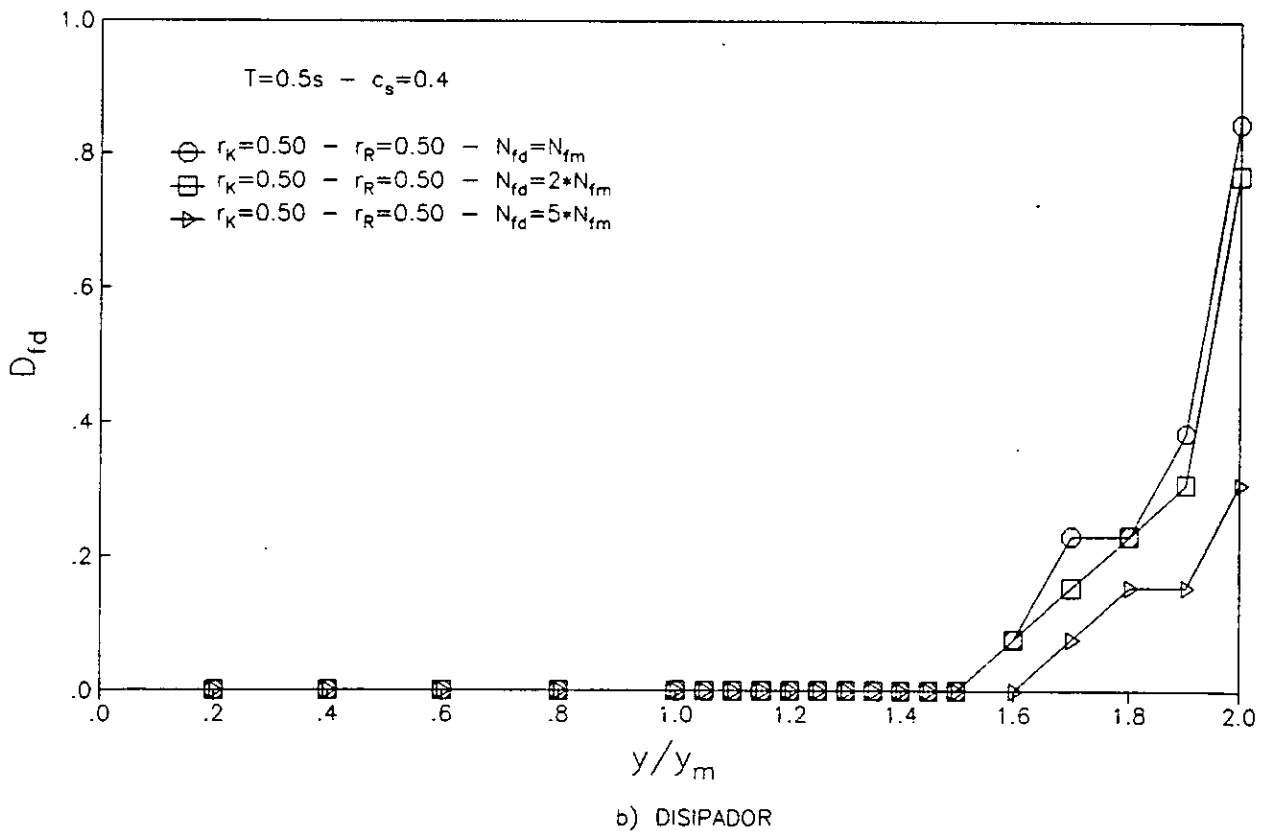
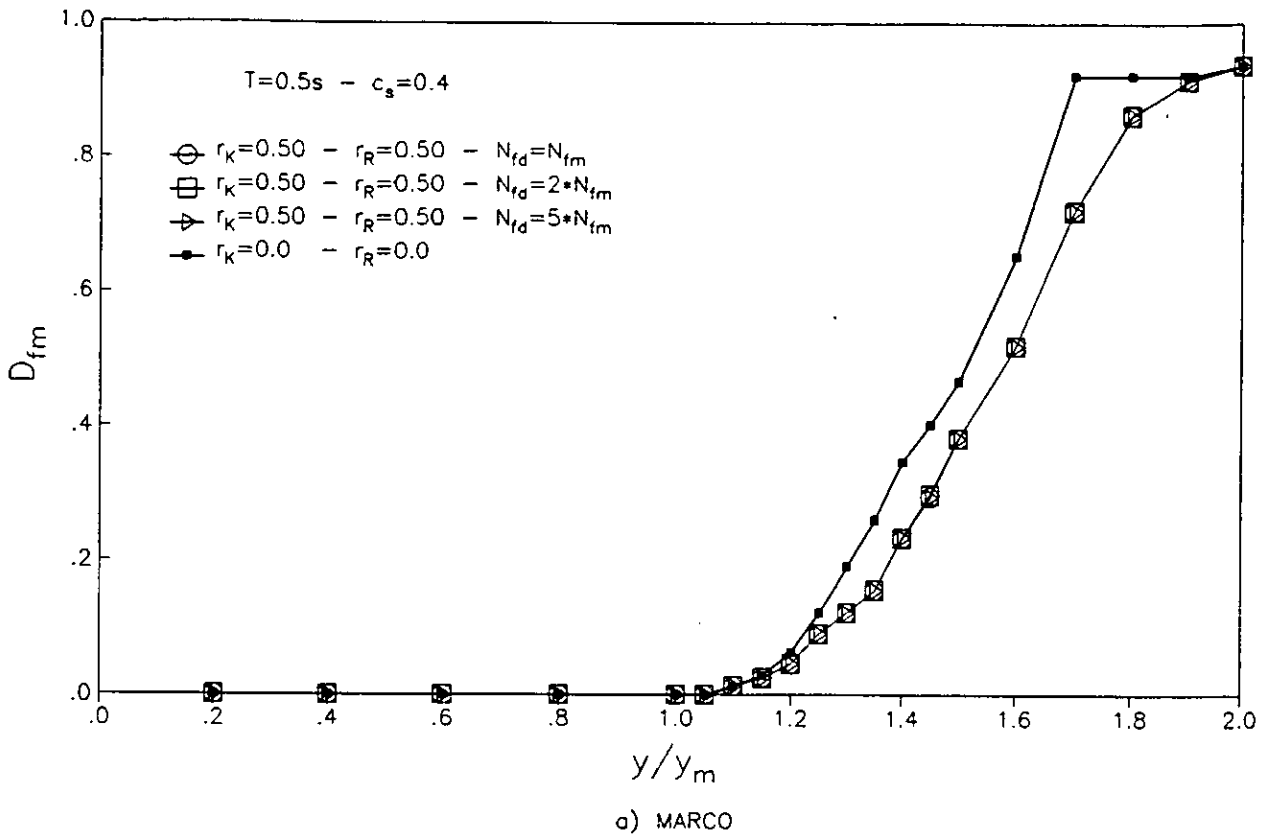


Fig. 6.10 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.50$, $T=0.5s, C_s=0.40$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

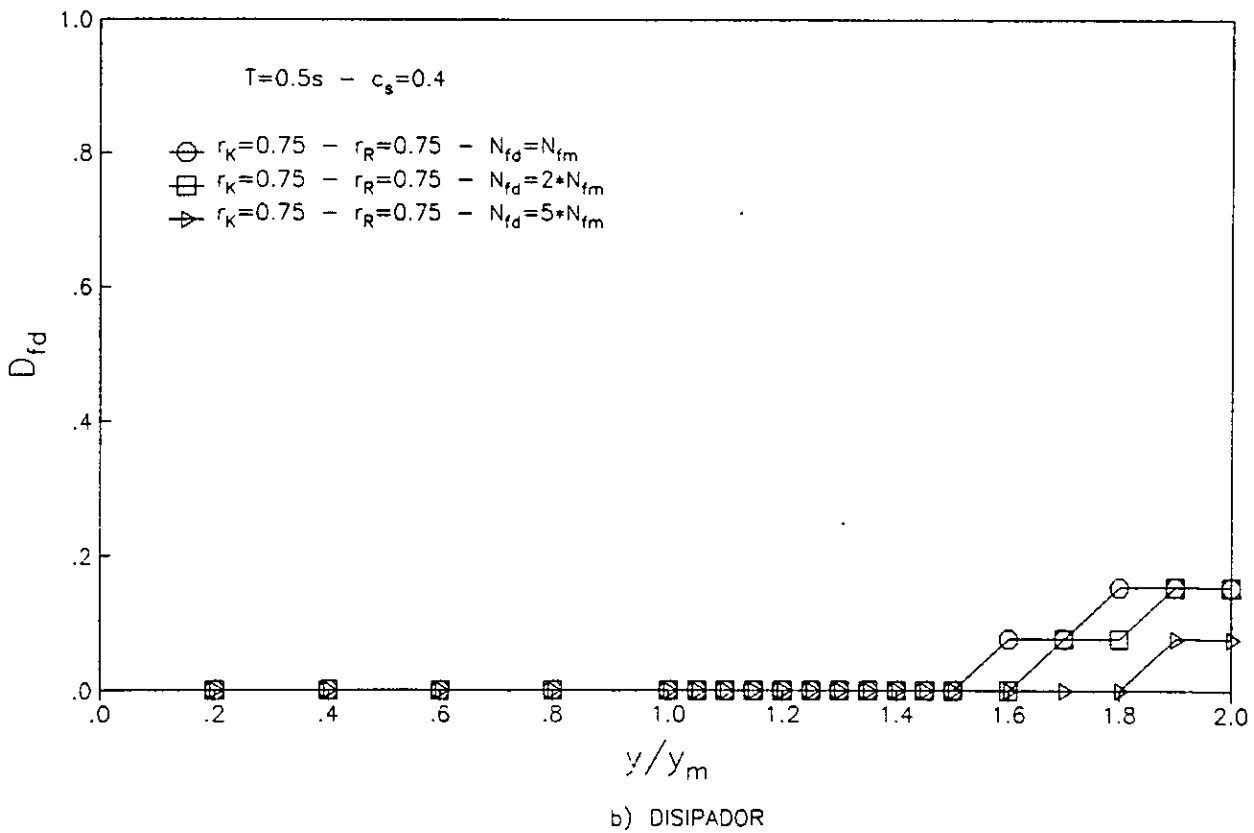
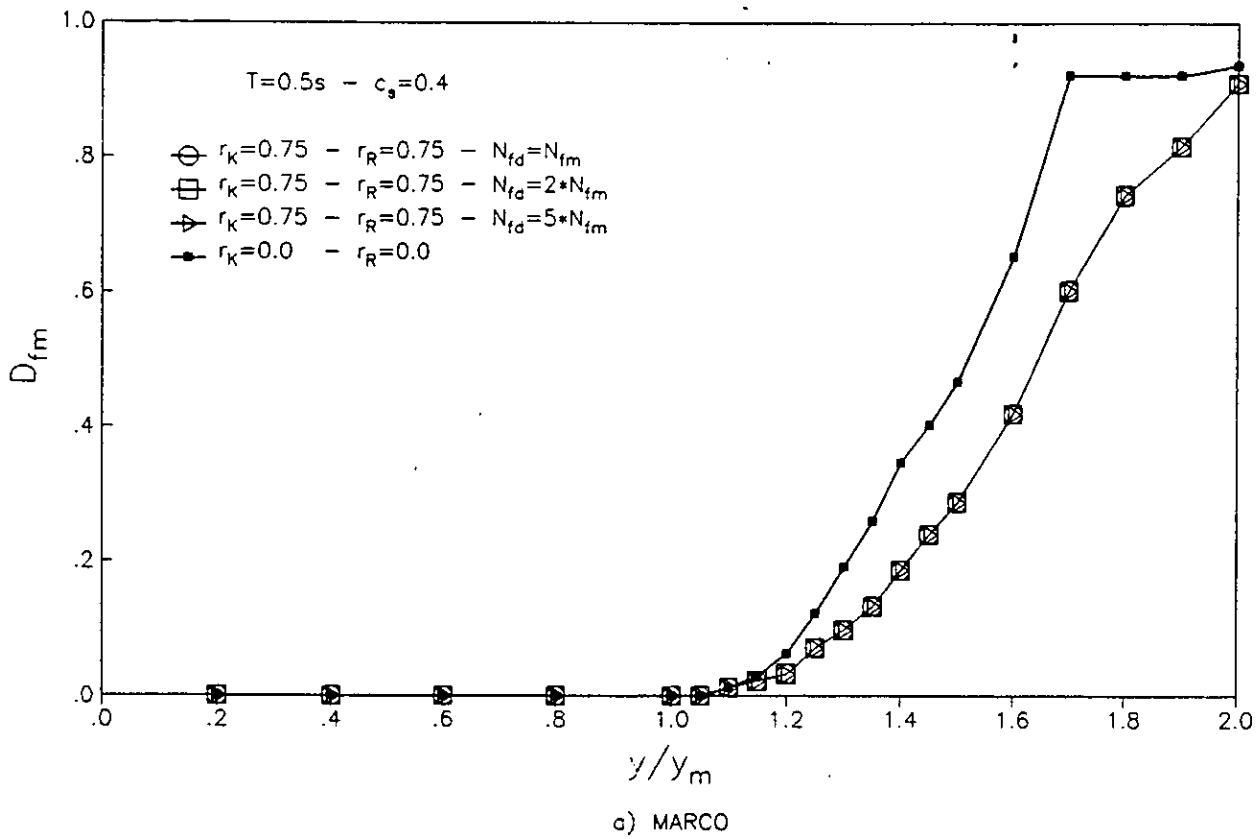


Fig. 6.11 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_k=r_R=0.75$, $T=0.5s, C_s=0.40$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

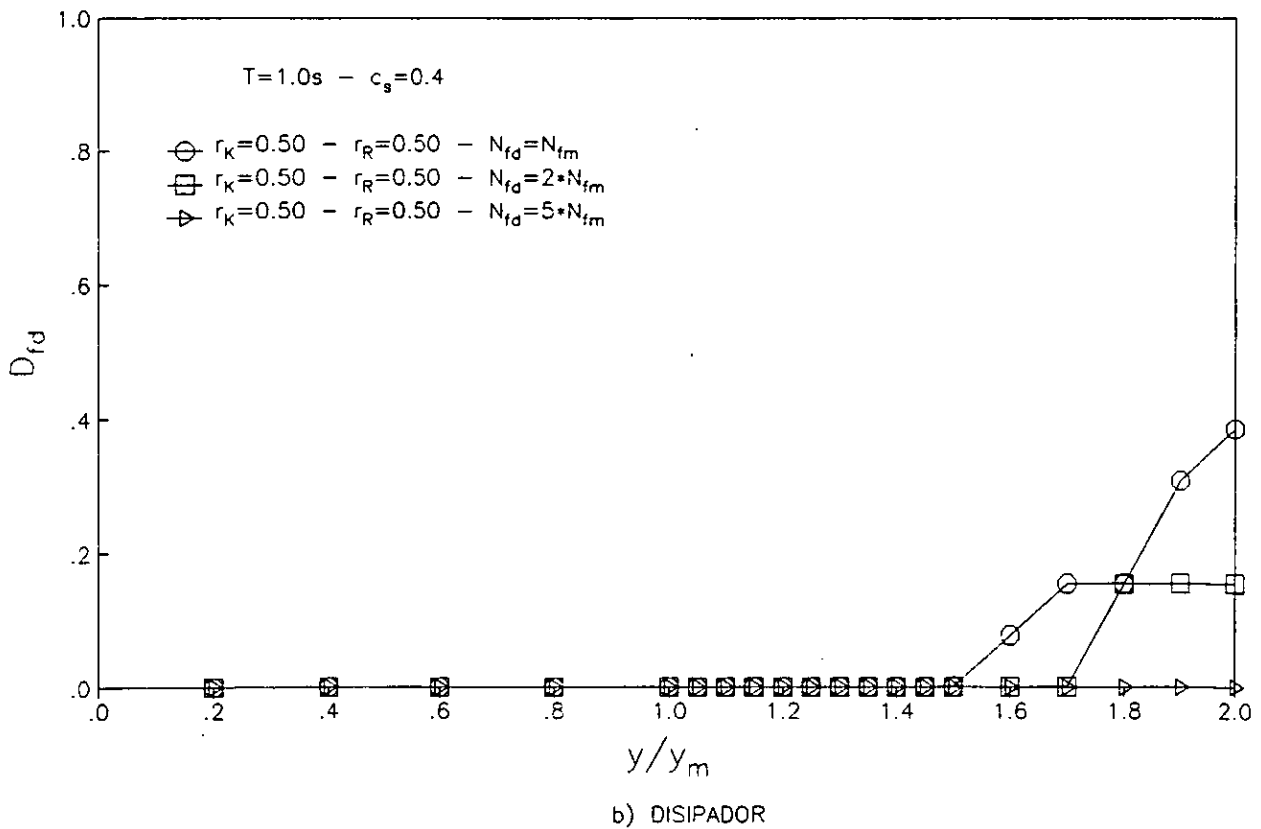
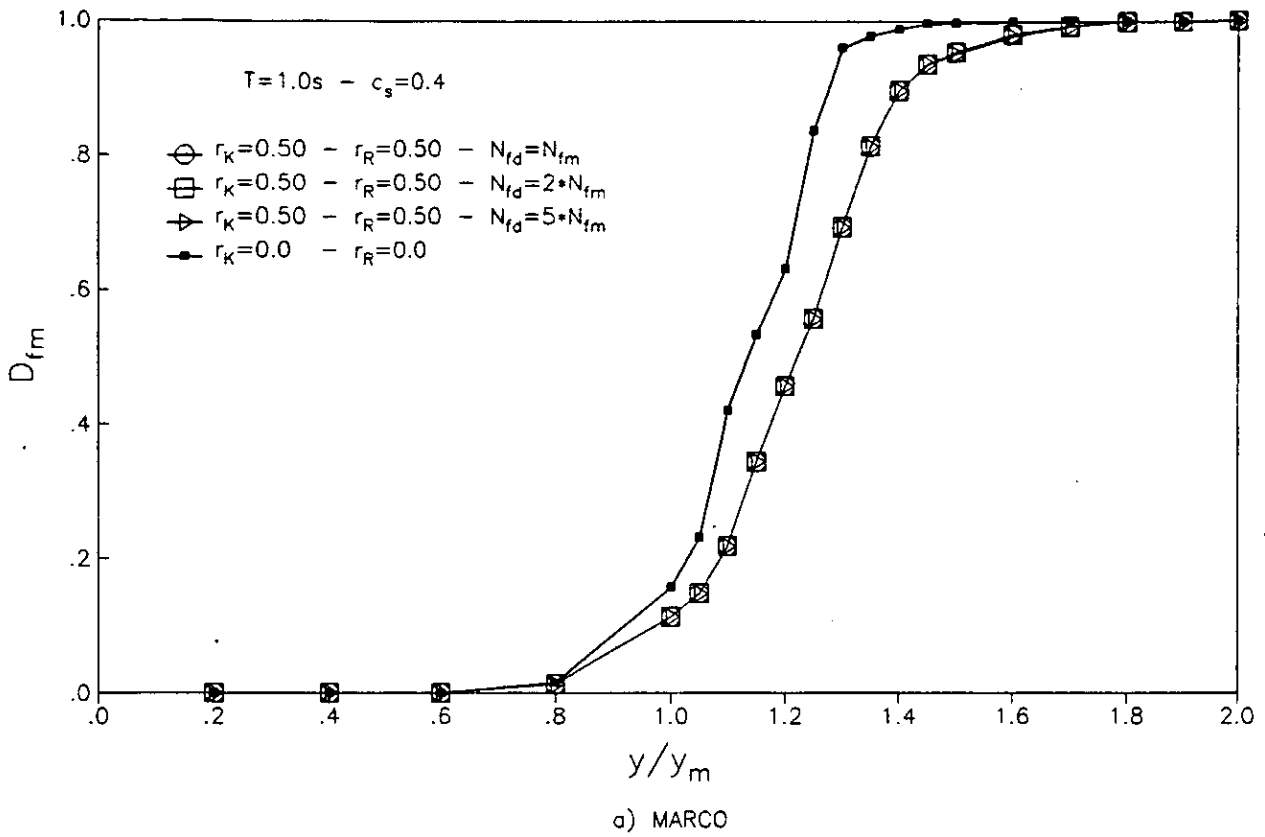


Fig. 6.12 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.50$, $T=1.0s, C_s=0.40$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

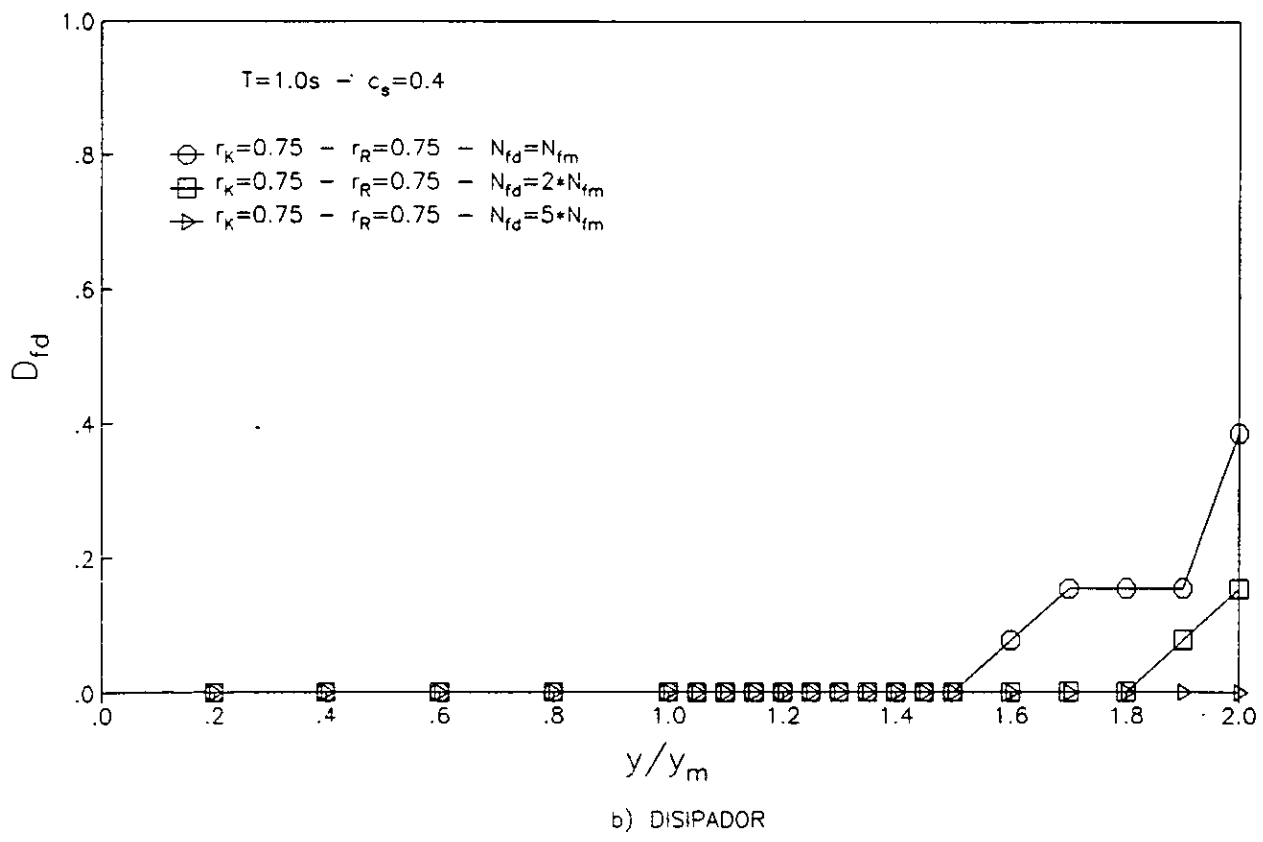
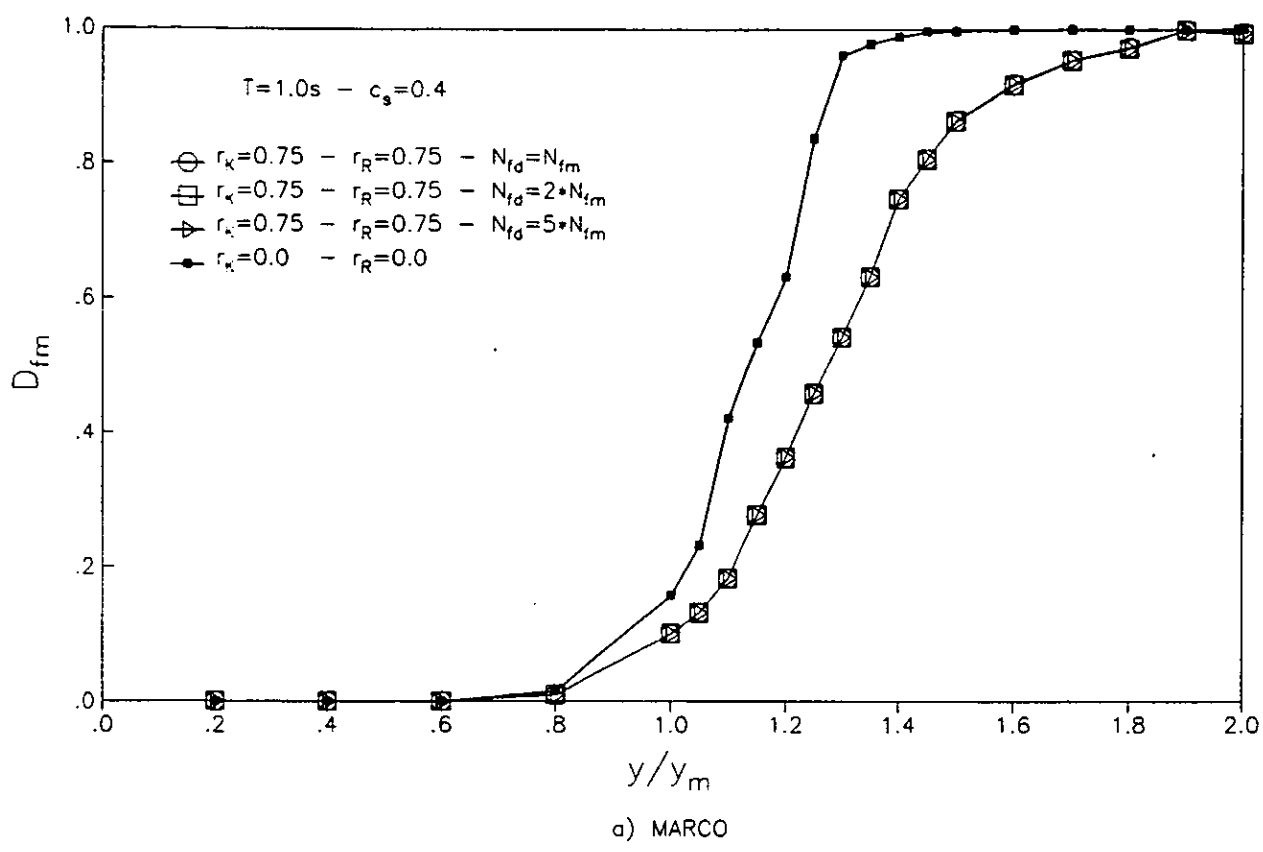


Fig. 6.13 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.75$, $T=1.0s, C_s=0.40$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

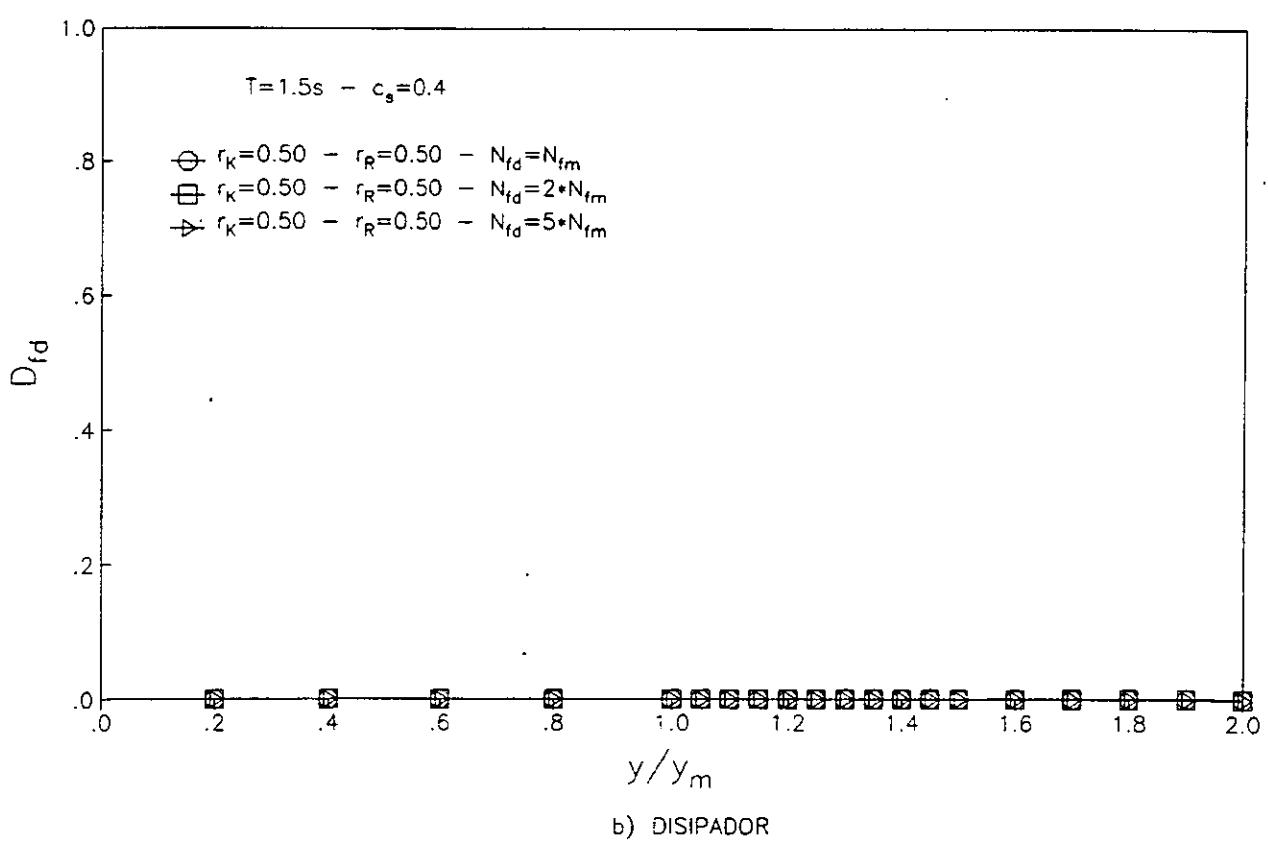
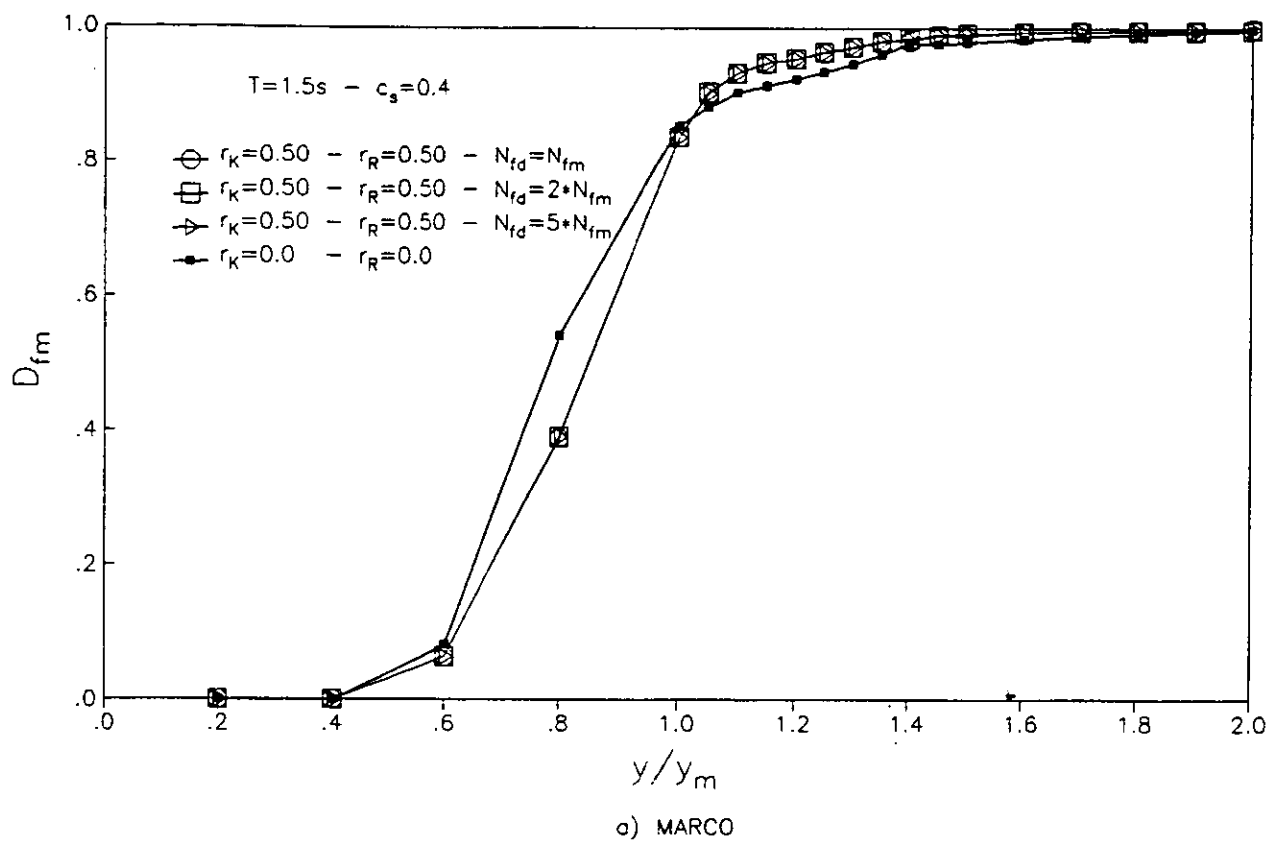


Fig. 6.14 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_k=r_R=0.50$, $T=1.5s, C_s=0.40$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

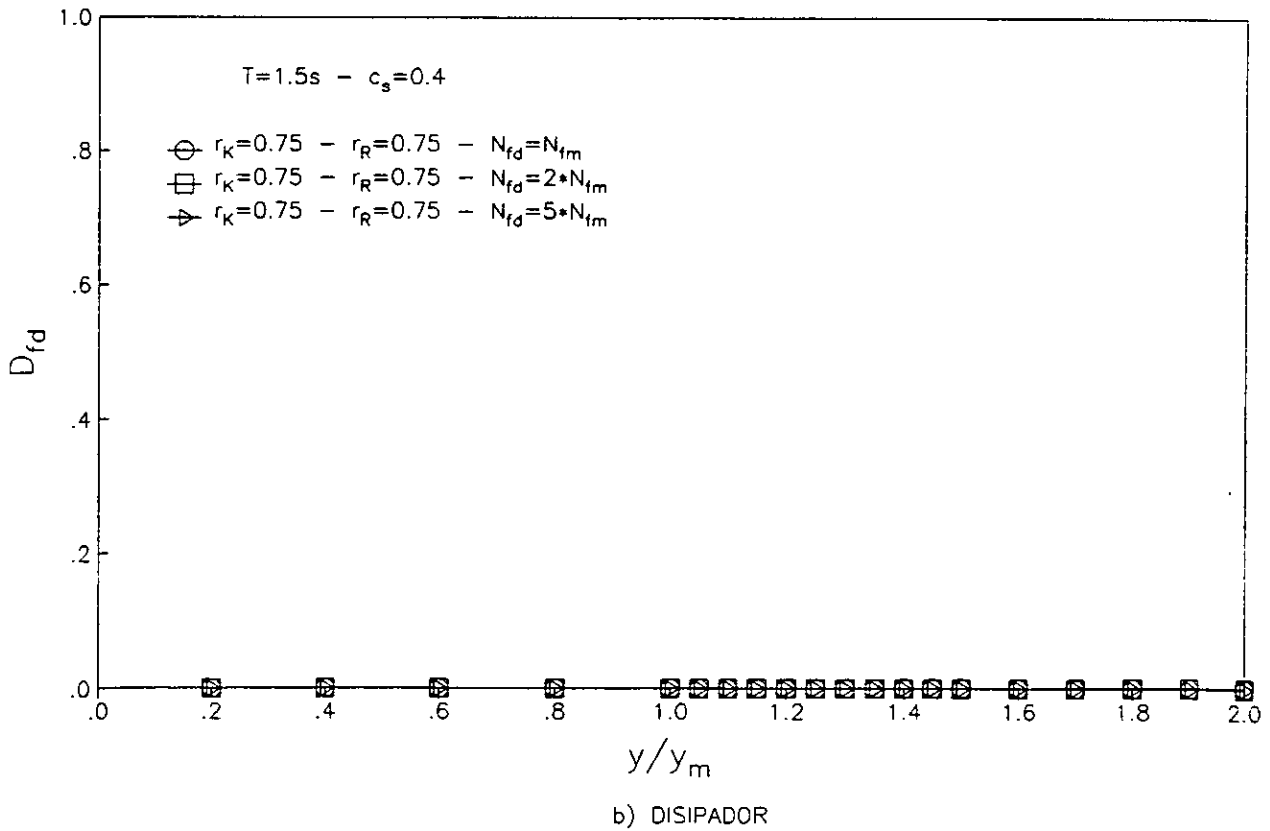
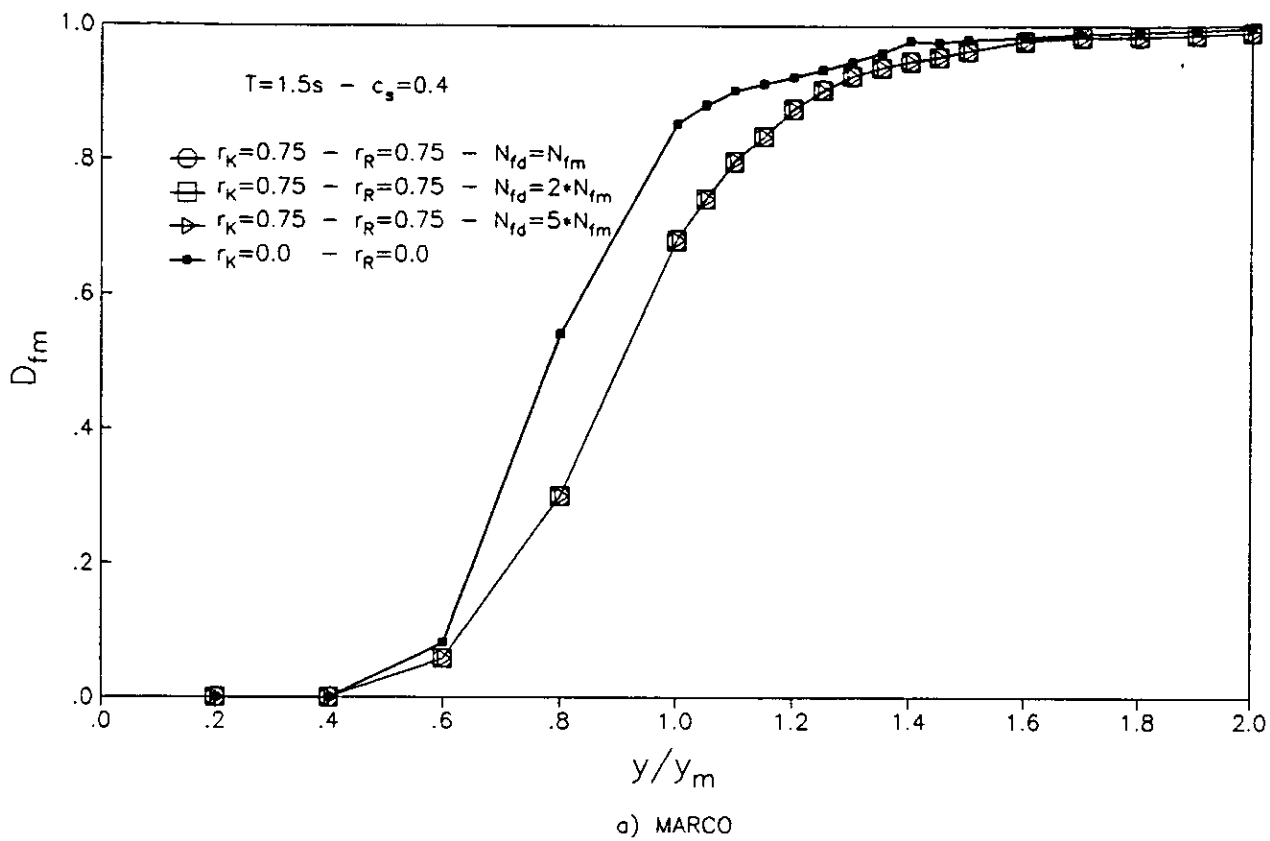
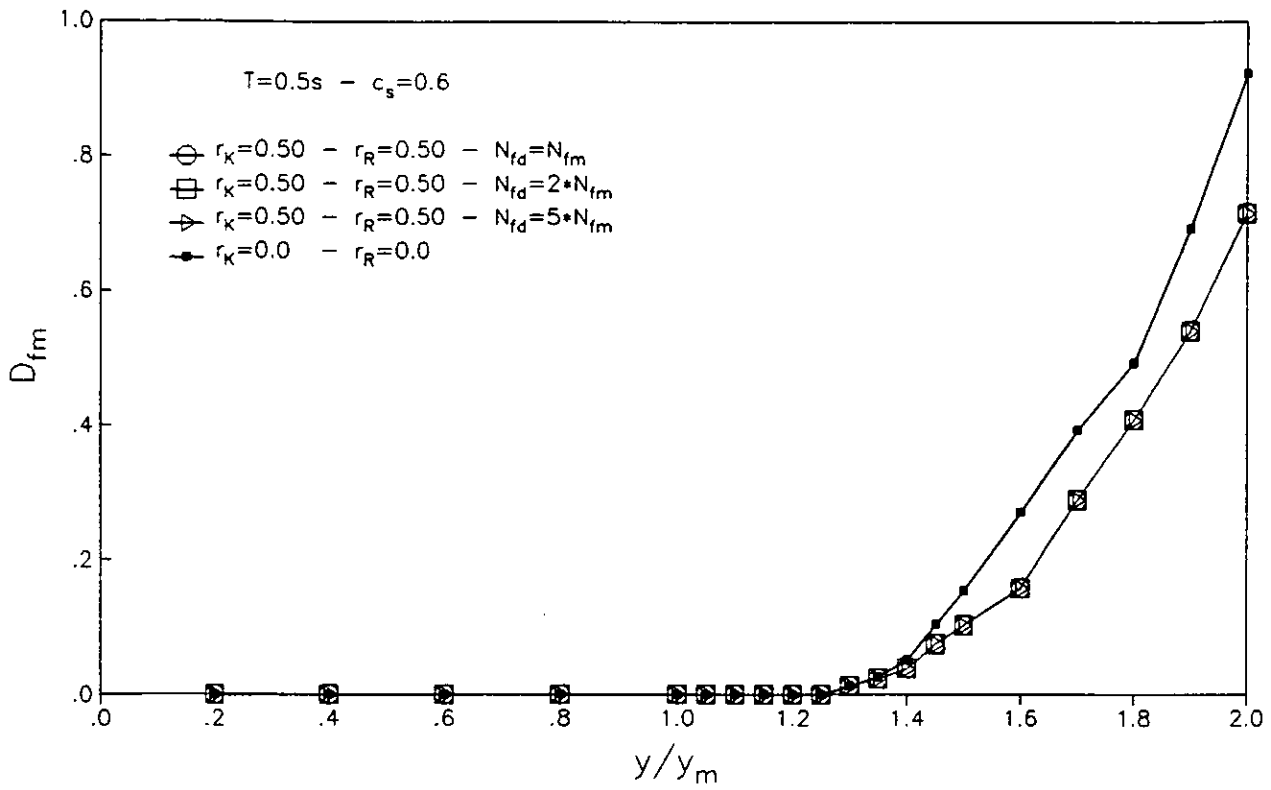
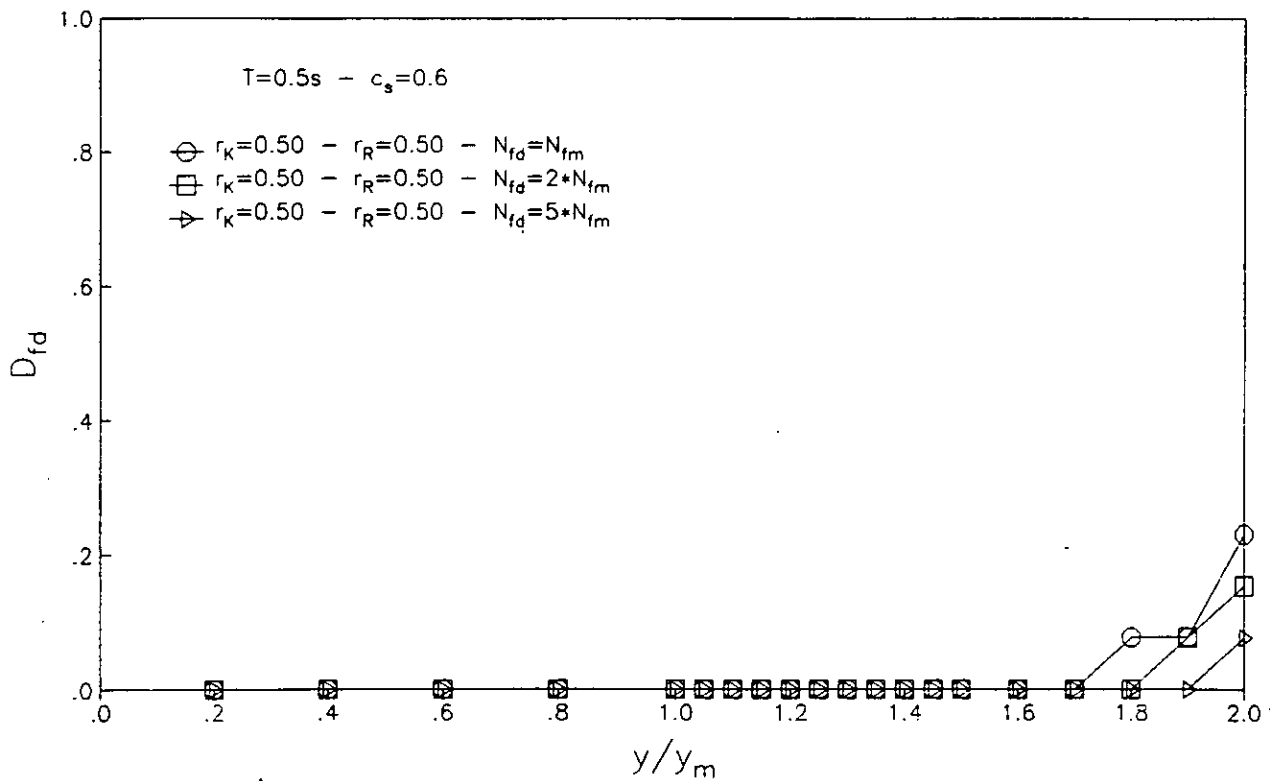


Fig. 6.15 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.5s, C_s=0.40$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fdF} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).



a) MARCO



b) DISIPADOR

Fig. 6.16 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.50$, $T=0.5s, C_s=0.60$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

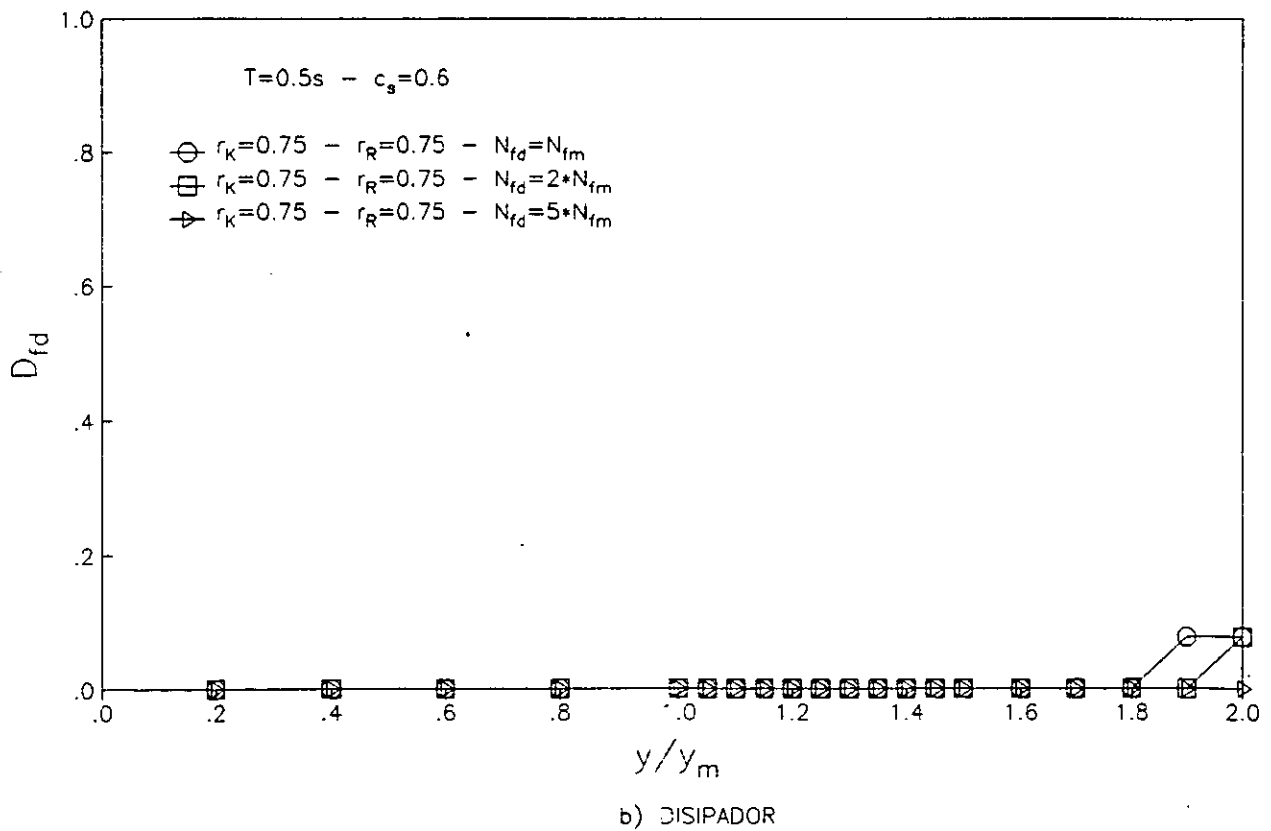
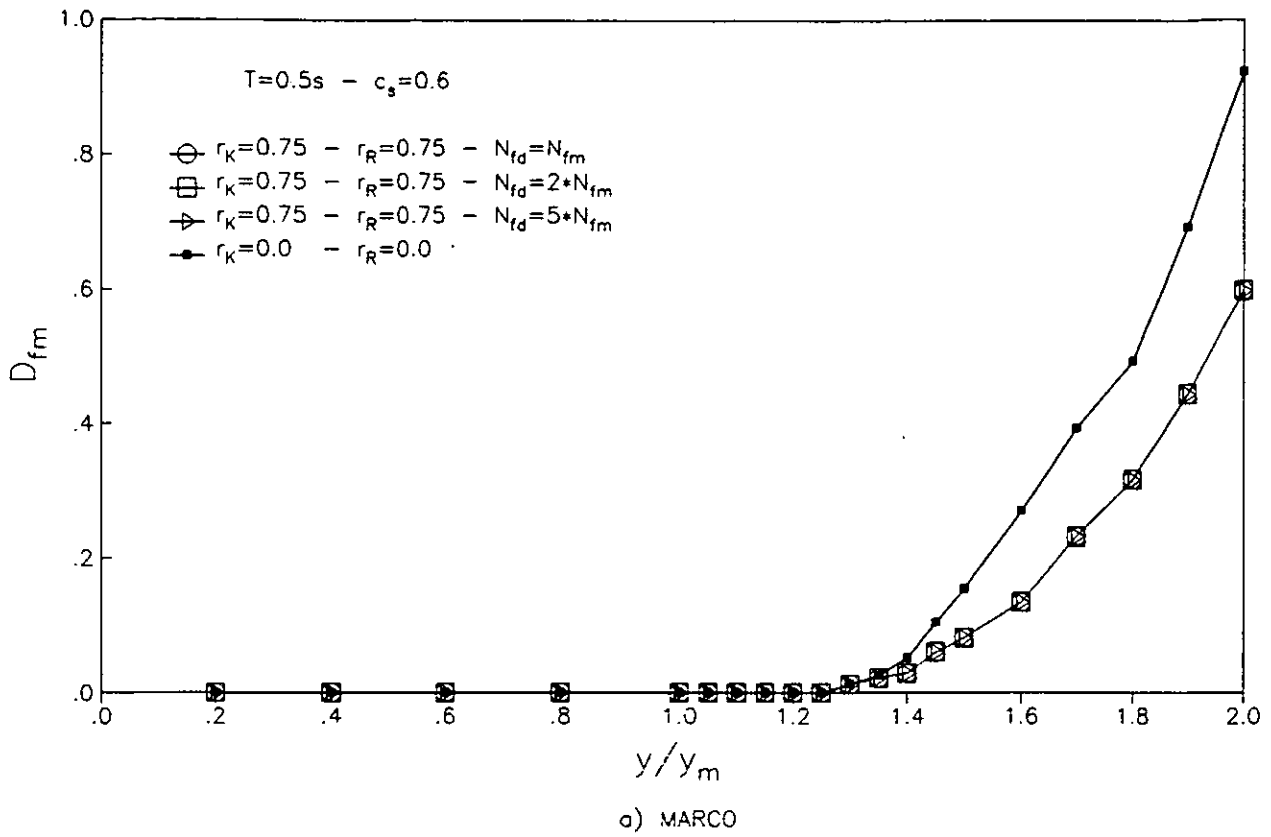
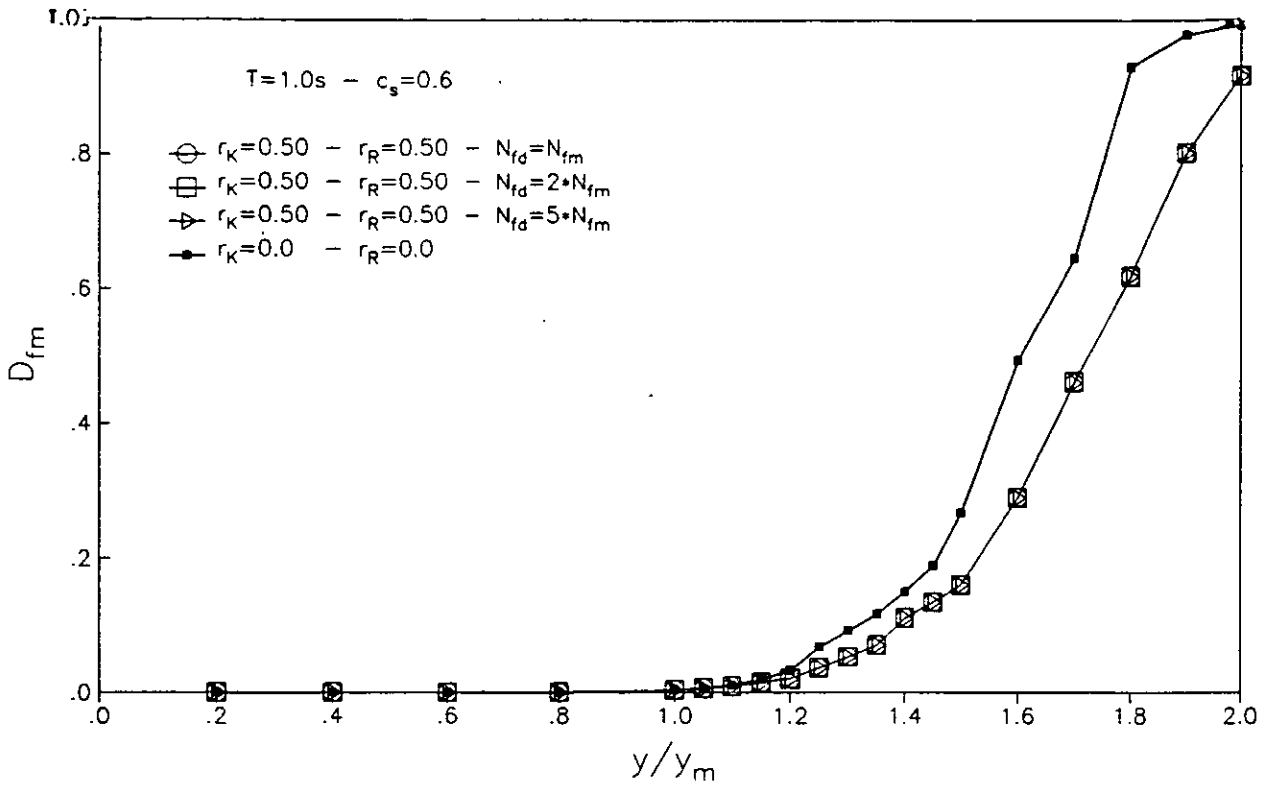
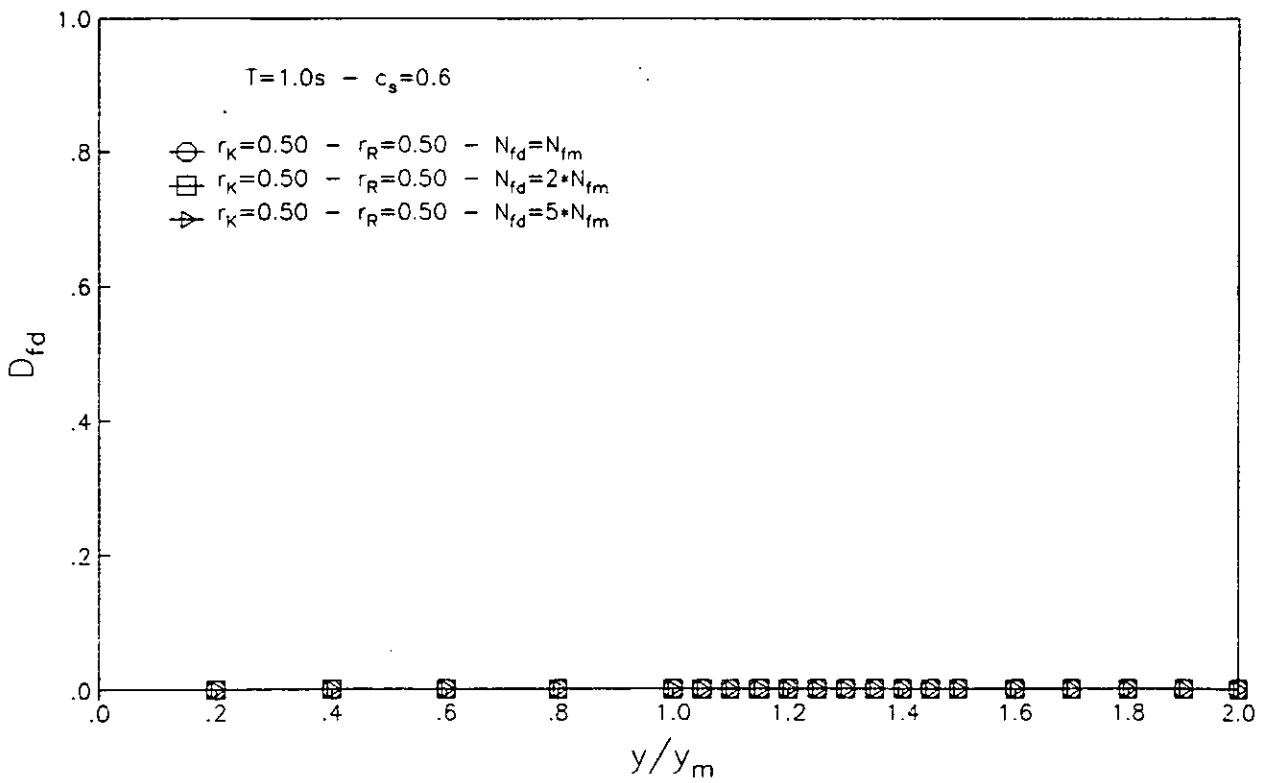


Fig. 6.17 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.75$, $T=0.5s$, $C_s=0.60$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).



a) MARCO



b) DISIPADOR

Fig. 6.18 Comparación del daño medio en el marco y dissipador con $r_k=r_R=0.50$, $T=1.0s$, $C_s=0.60$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

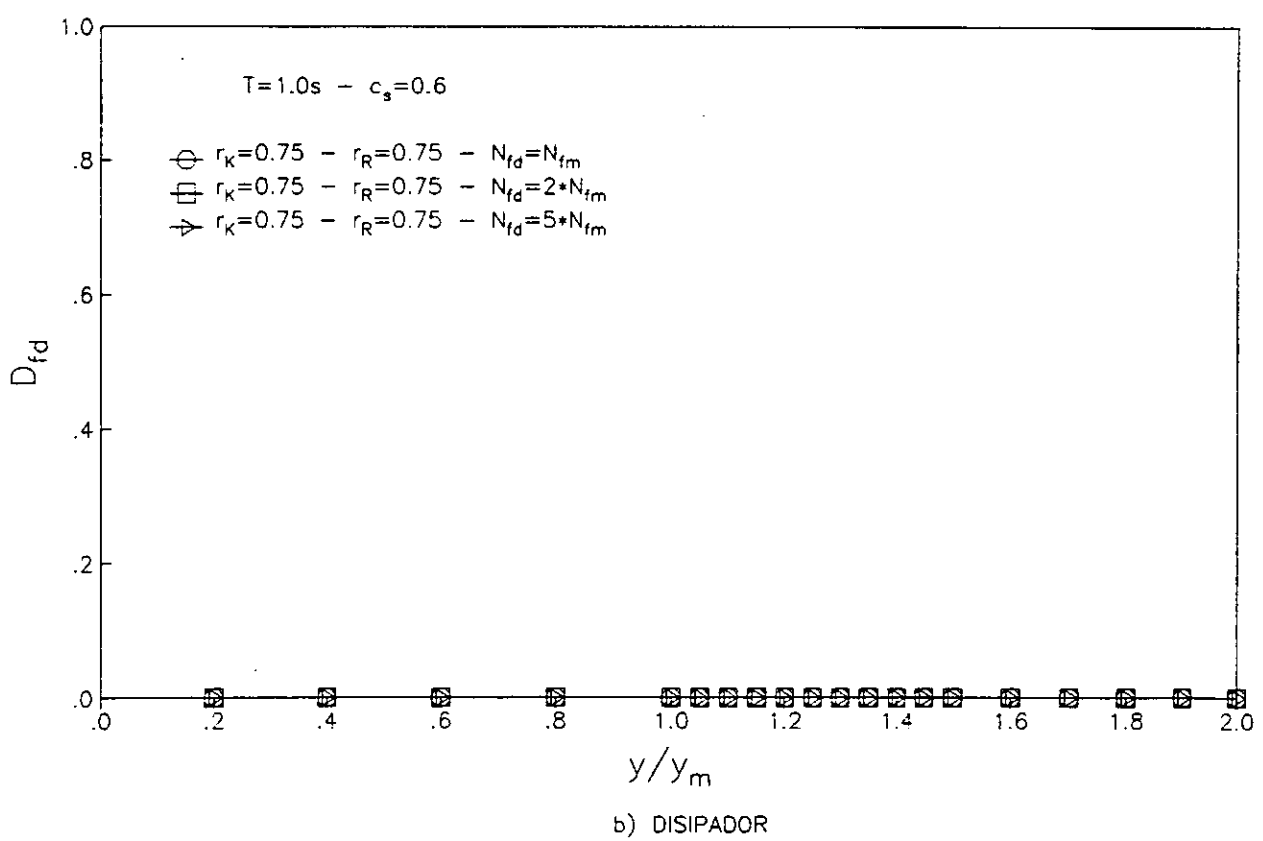
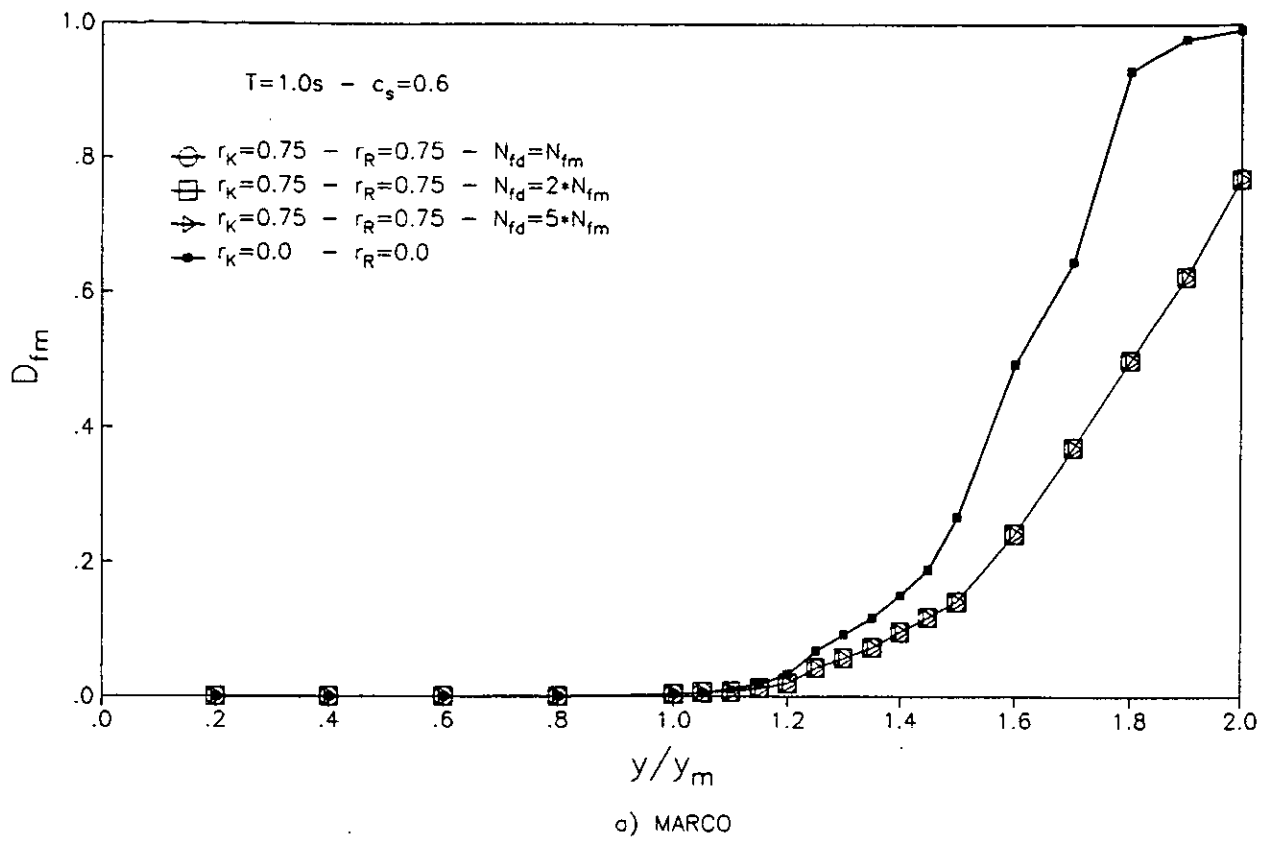


Fig. 6.19 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.75$, $T=1.0s, C_s=0.60$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

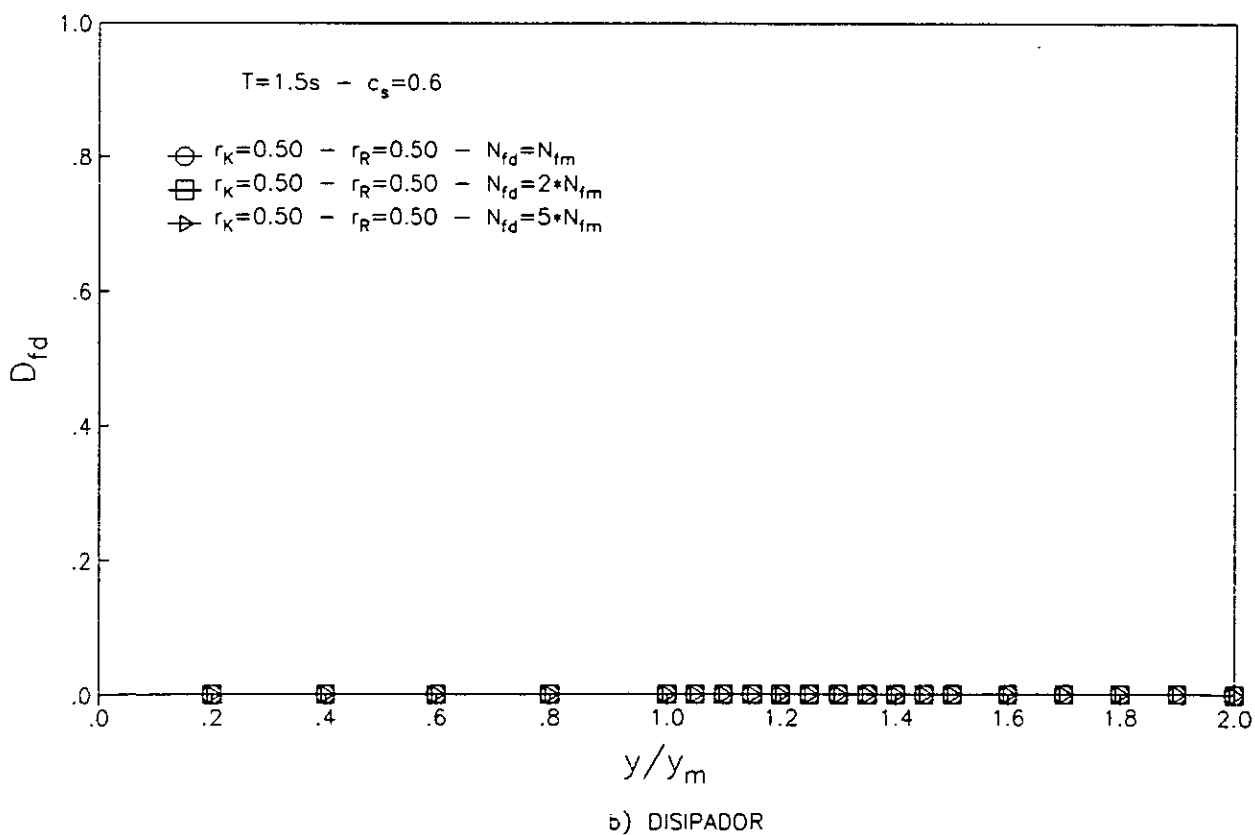
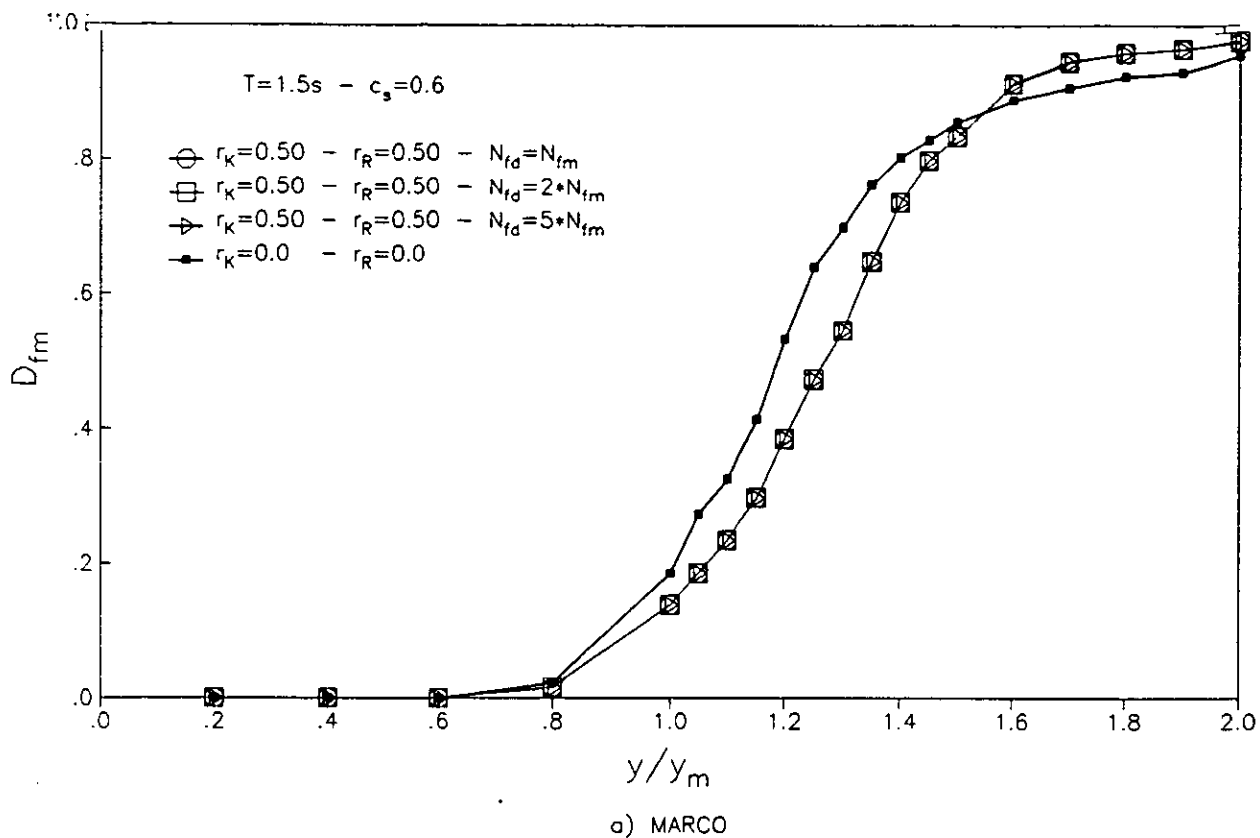


Fig. 6.20 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.50$, $T=1.5s, C_s=0.60$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

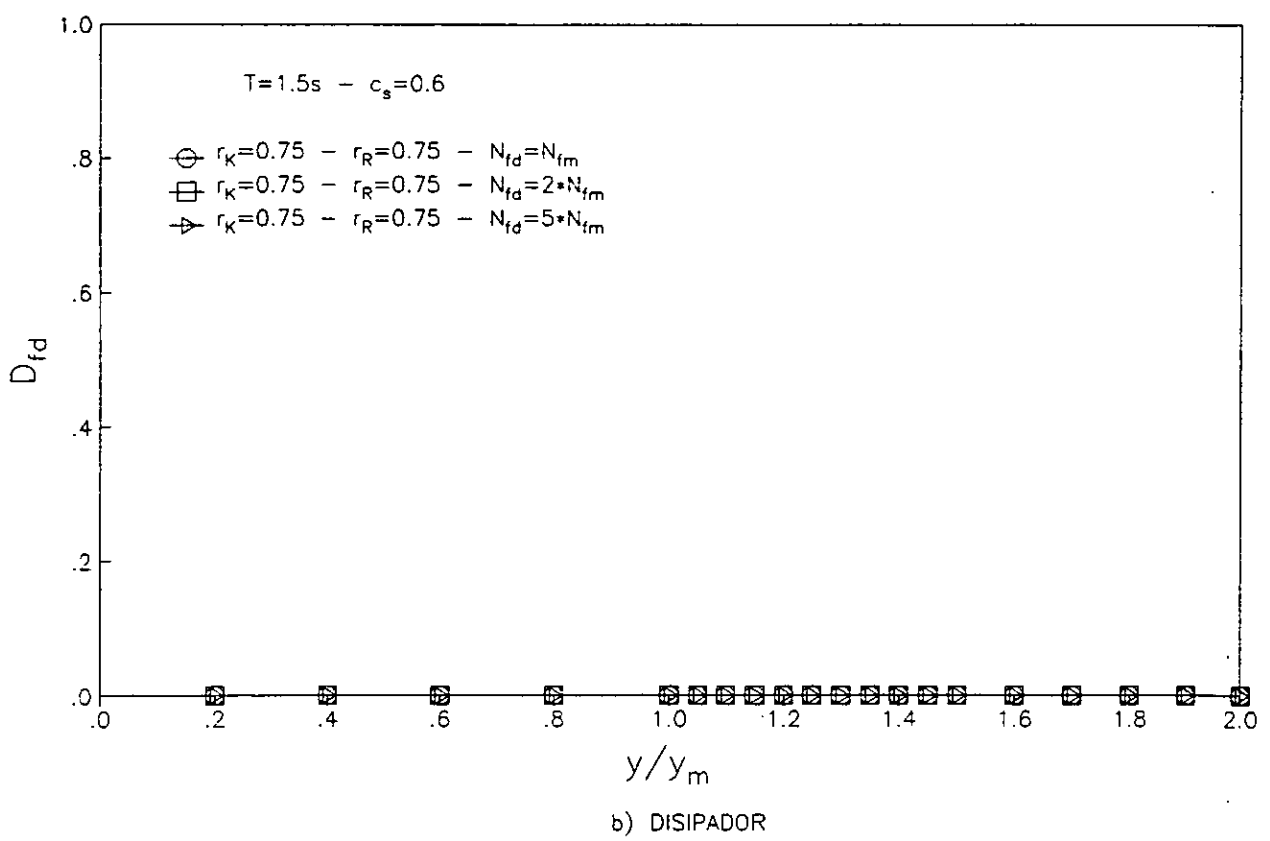
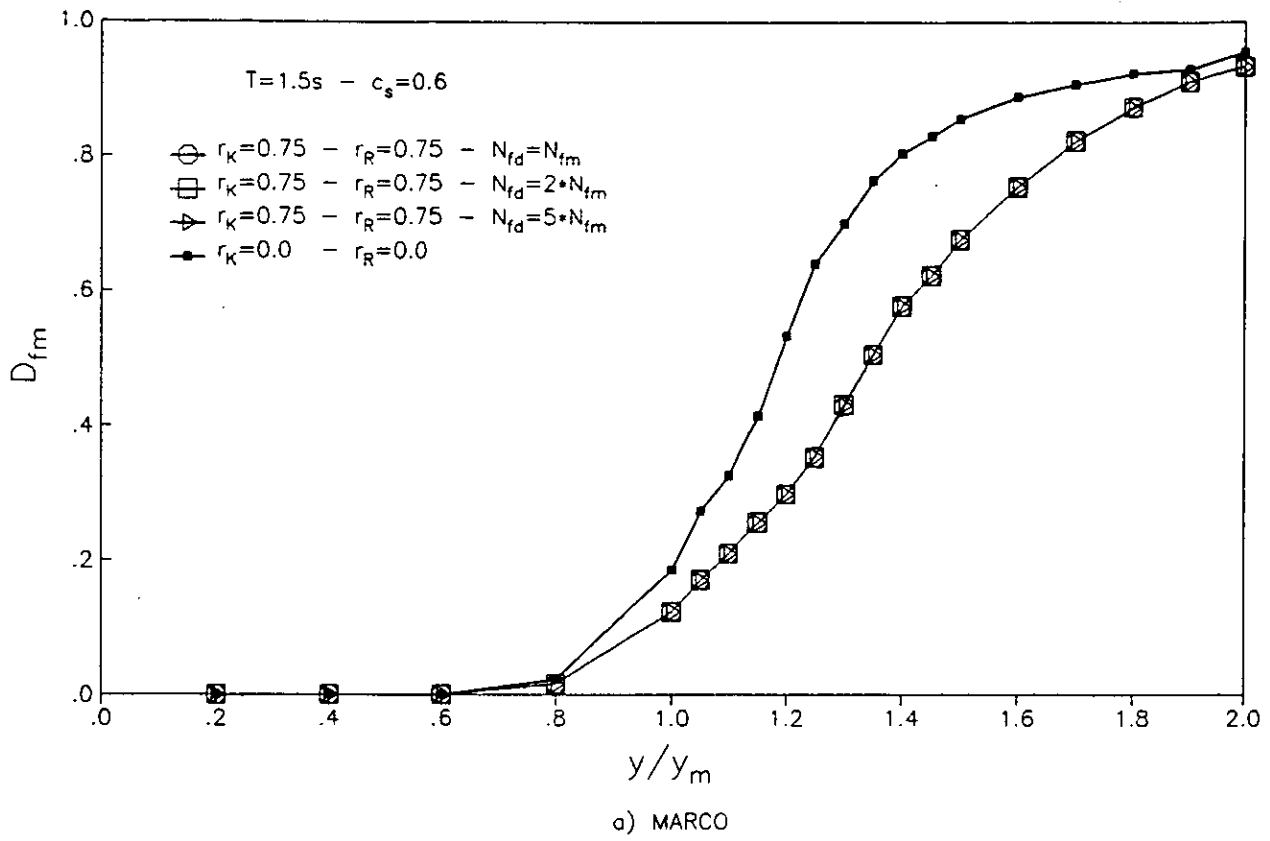


Fig. 6.21 Comparación del daño medio en el marco y disipador con $r_K=r_R=0.75$, $T=1.5s, C_s=0.60$ y diferentes capacidades de ciclos a la falla, N_{fd} , para distintas intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

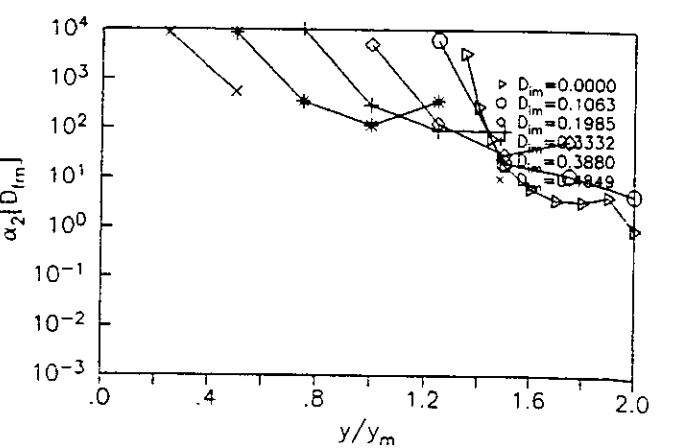
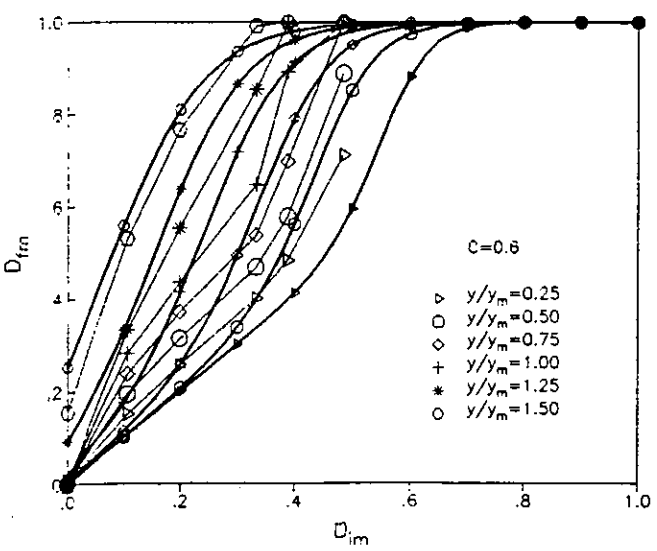
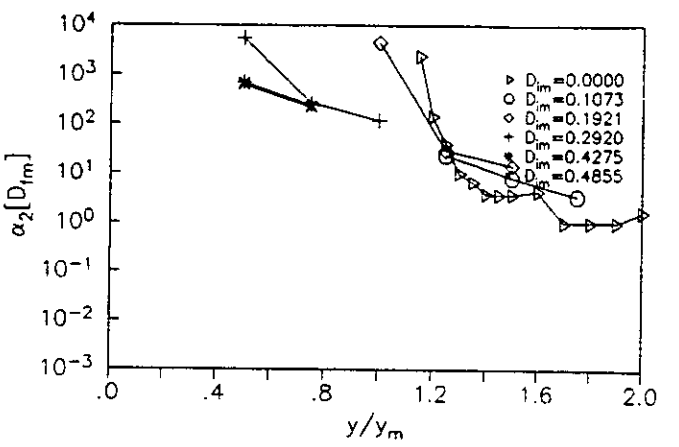
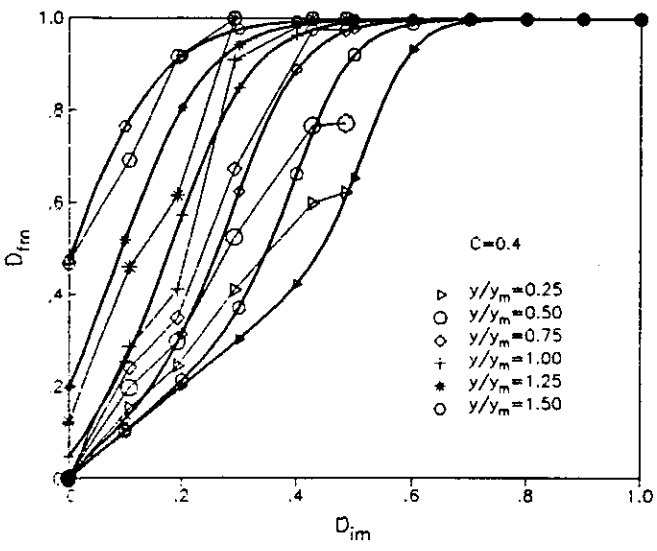
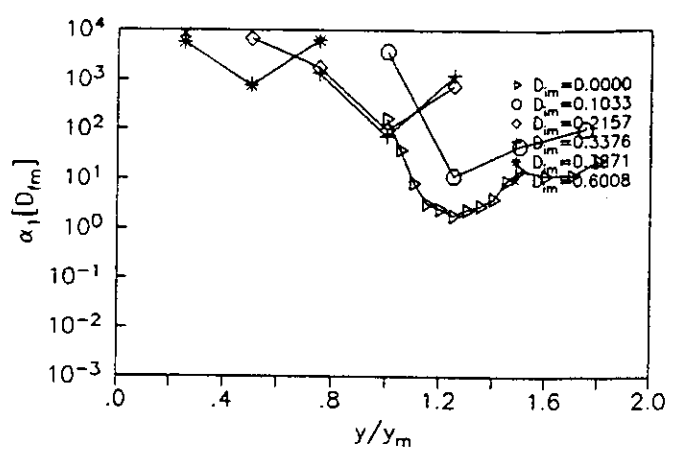
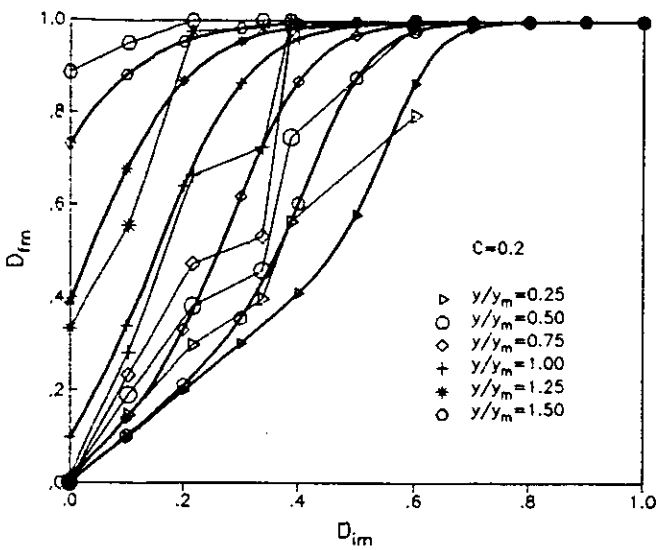


Fig. 6.22 Daño medio en marco convencional con $r_k=r_R=0.0$, $T=0.5$ s, para distintos coeficientes sísmicos y diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

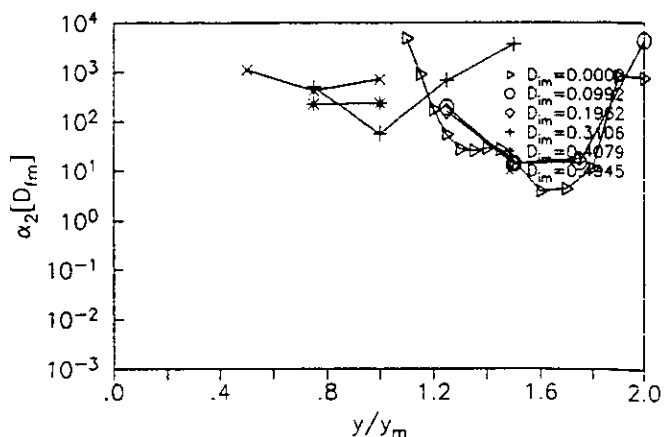
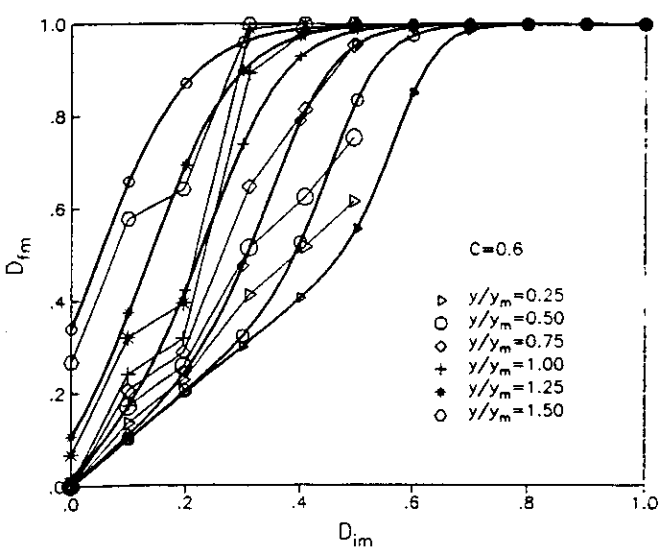
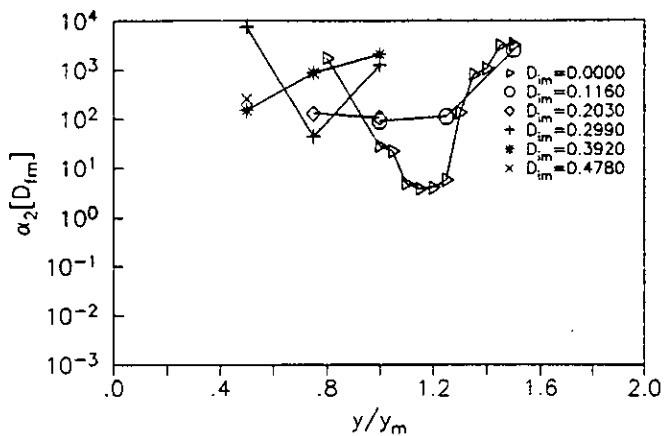
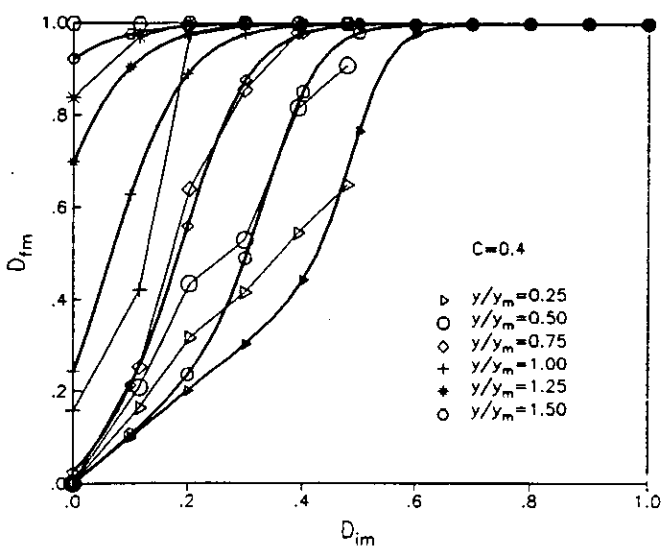
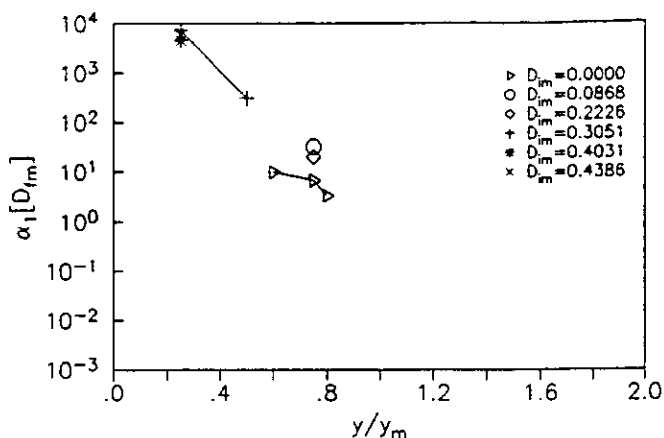
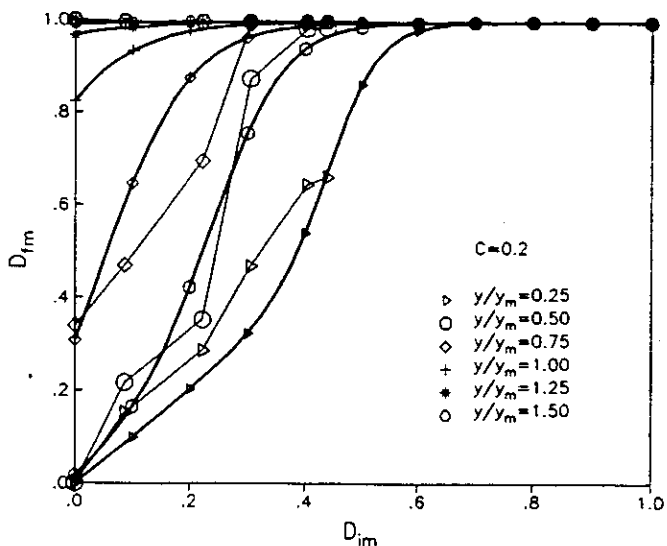


Fig. 6.23 Daño medio en marco convencional con $r_k=r_R=0.0$, $T=1.0$ s, para distintos coeficientes sísmicos y diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

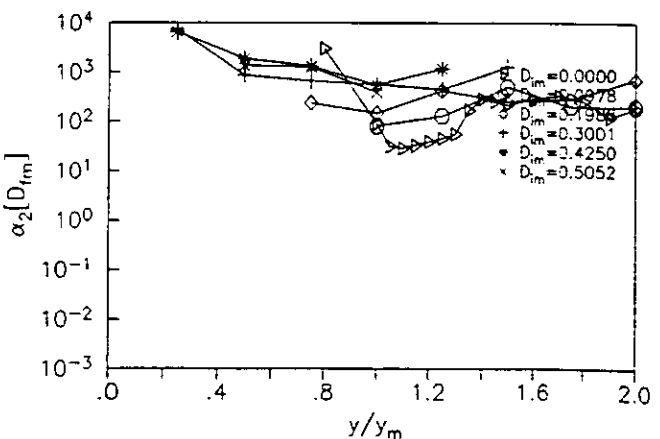
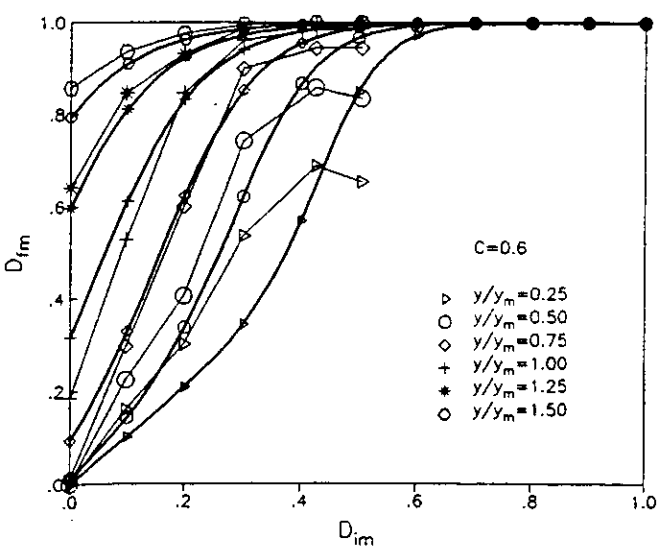
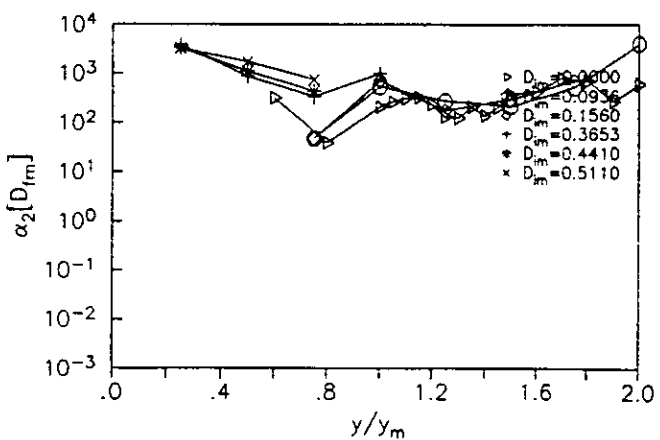
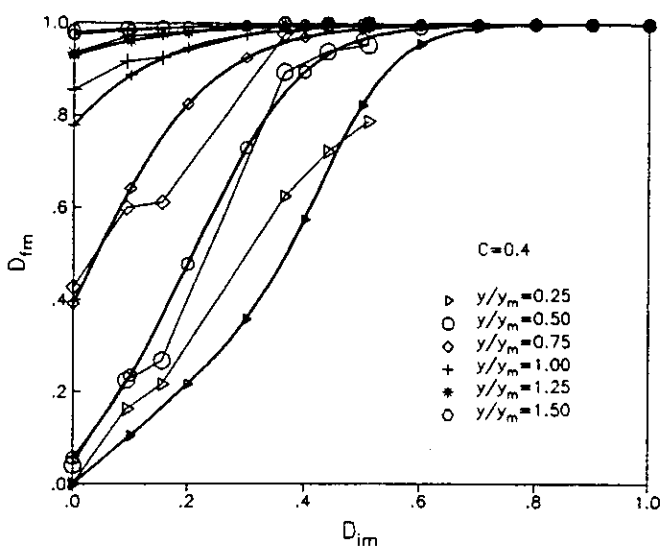
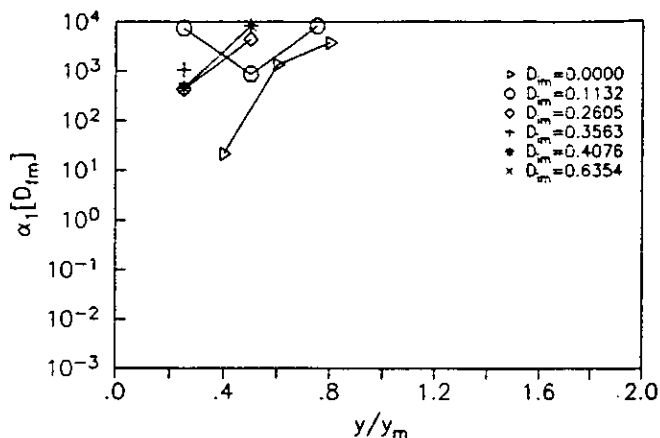
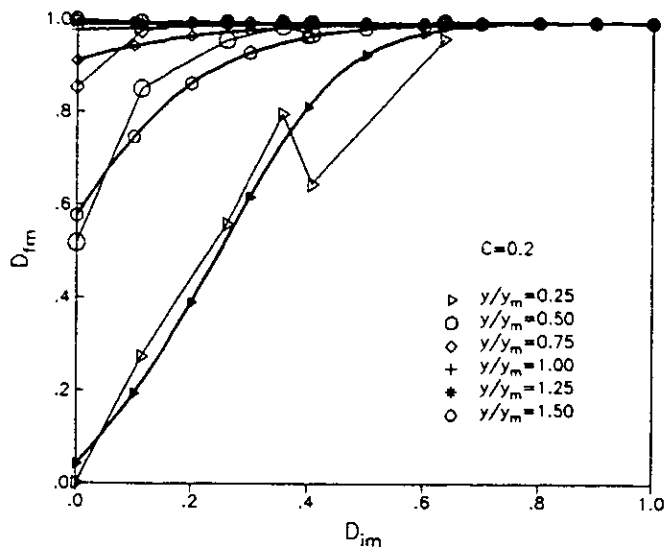


Fig. 6.24 Daño medio en marco convencional con $r_k=r_R=0.0$, $T=1.5$ s, para distintos coeficientes sísmicos y diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

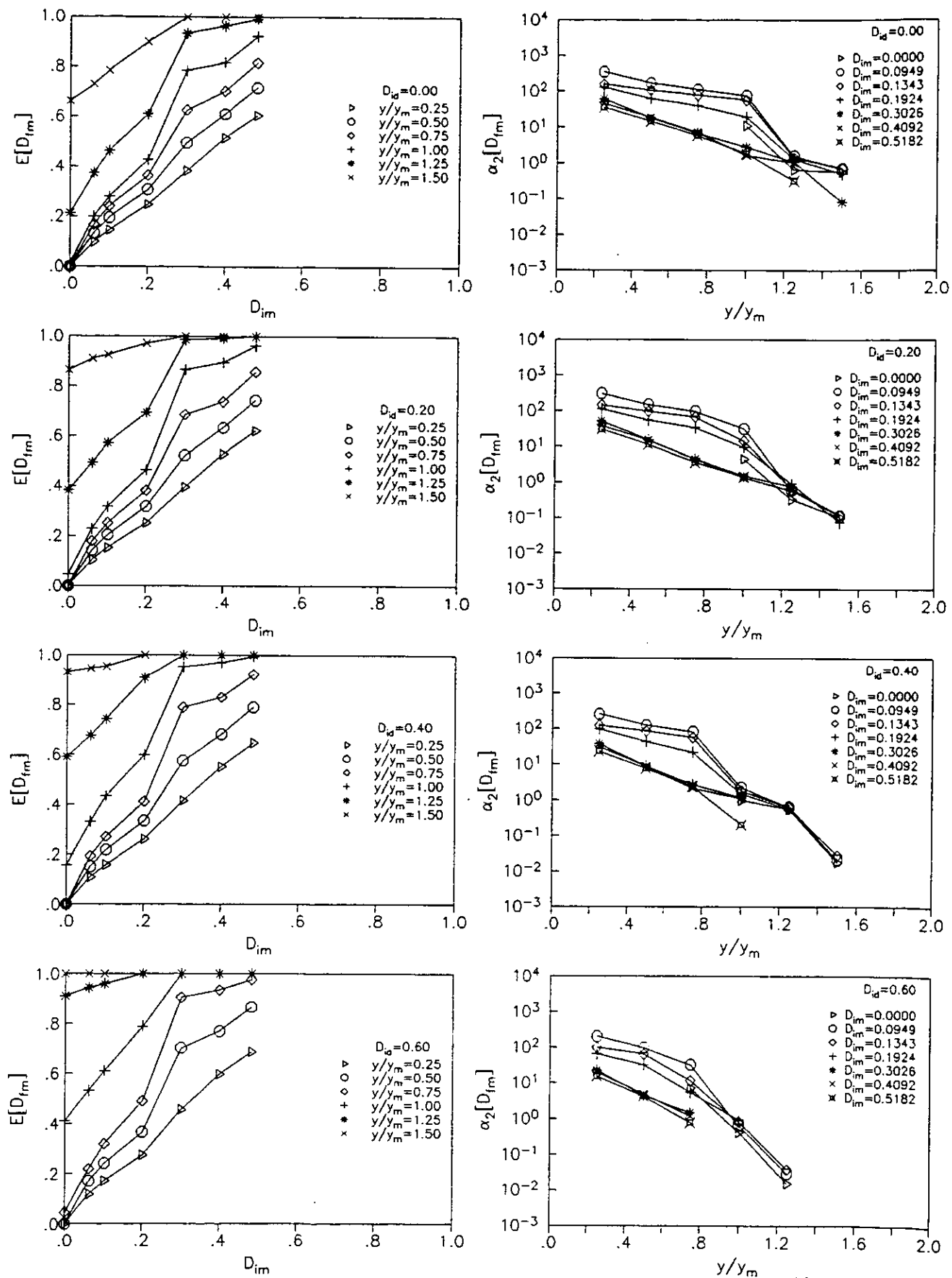


Fig. 6.25 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=0.5$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

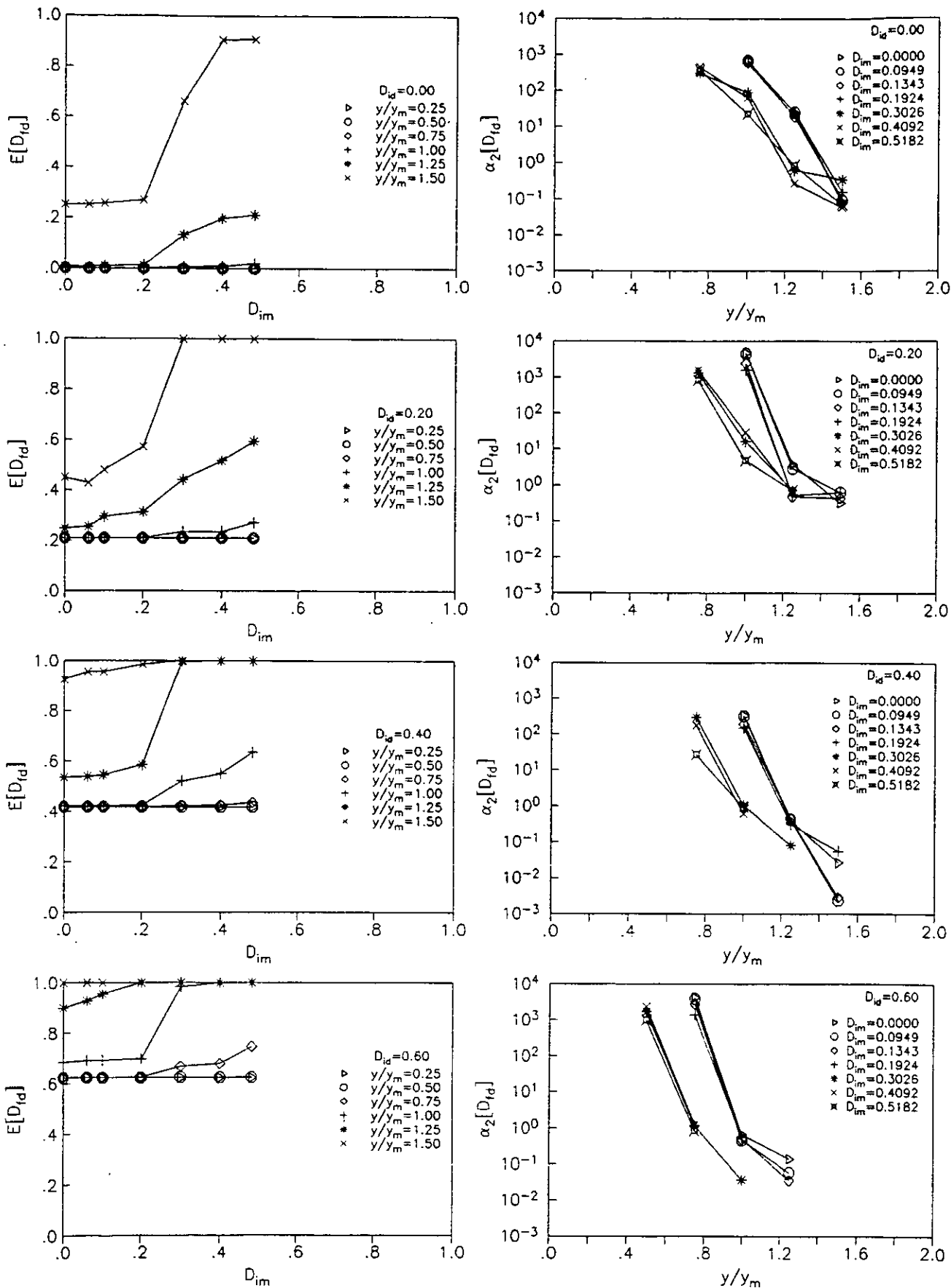


Fig. 6.26 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=0.5$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

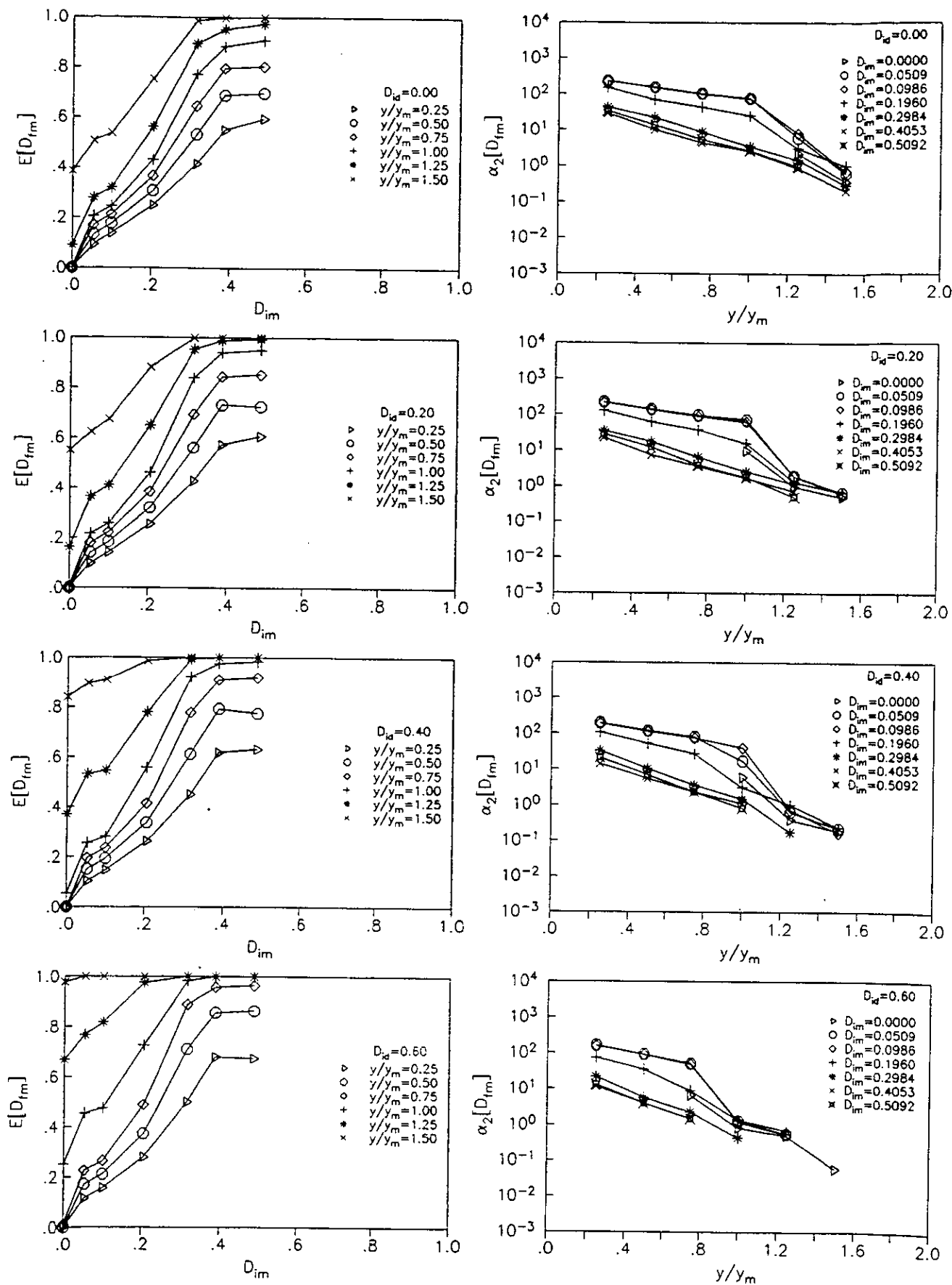


Fig. 6.27 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=0.5$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

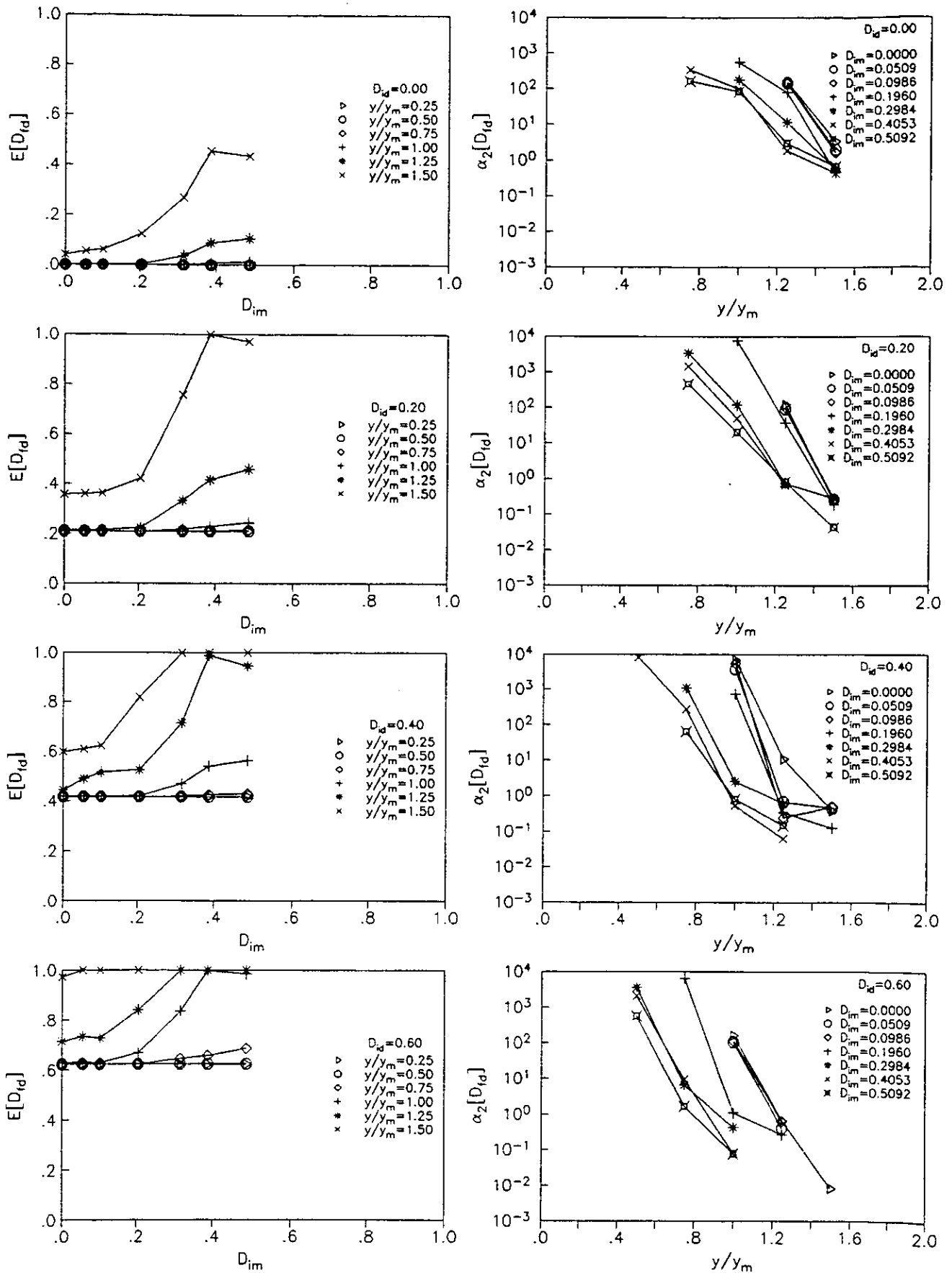


Fig. 6.28 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=0.5$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

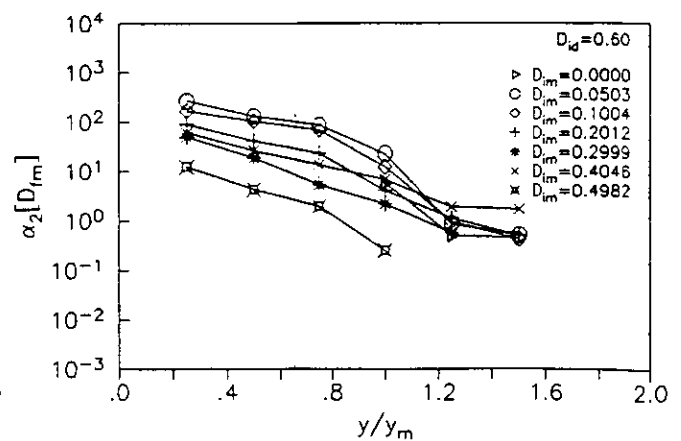
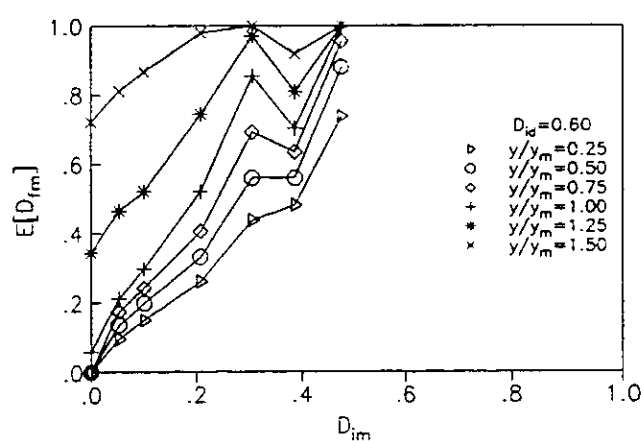
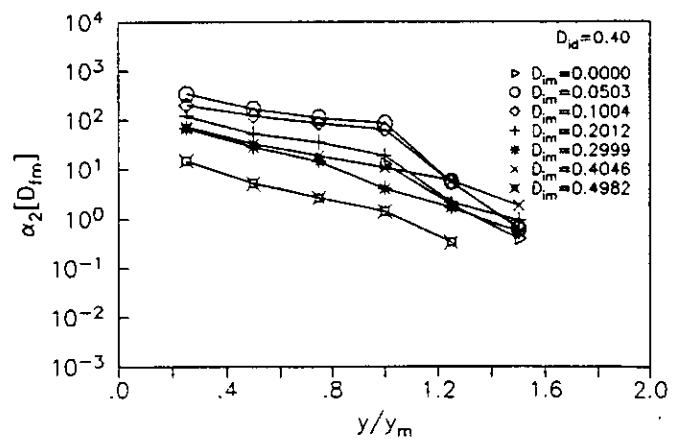
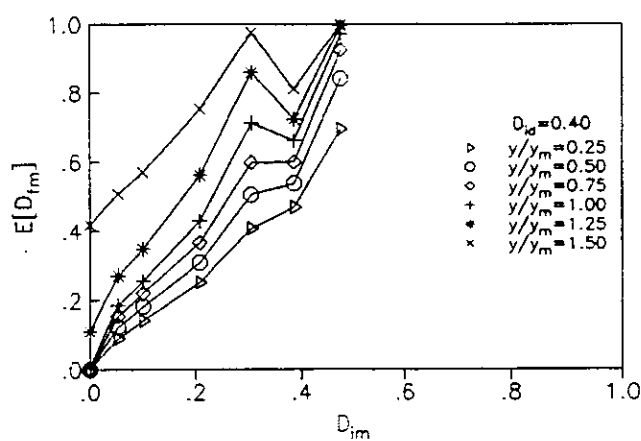
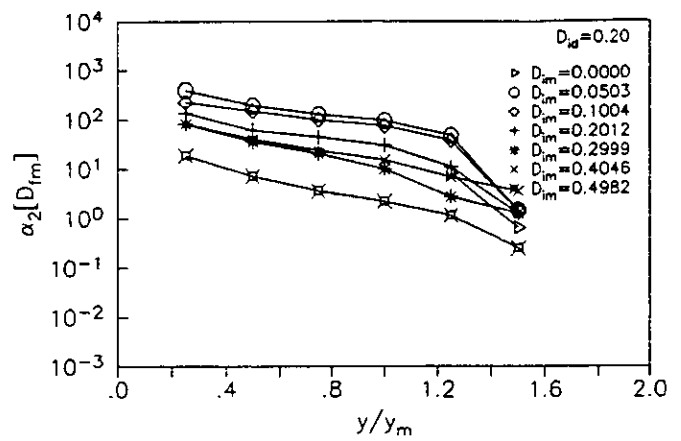
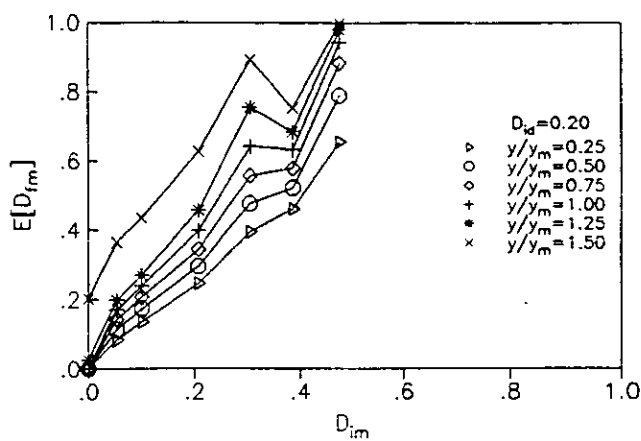
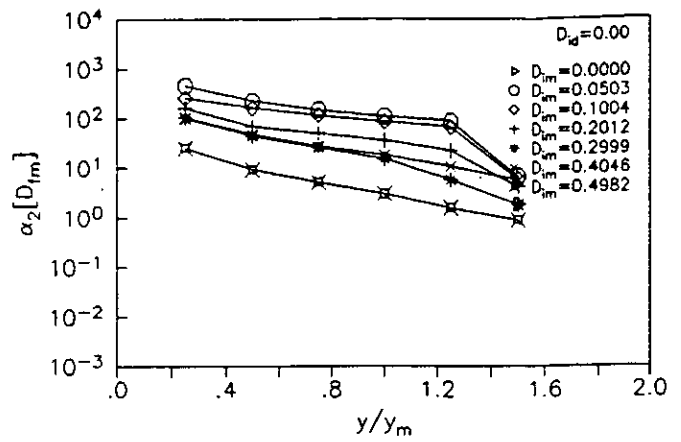
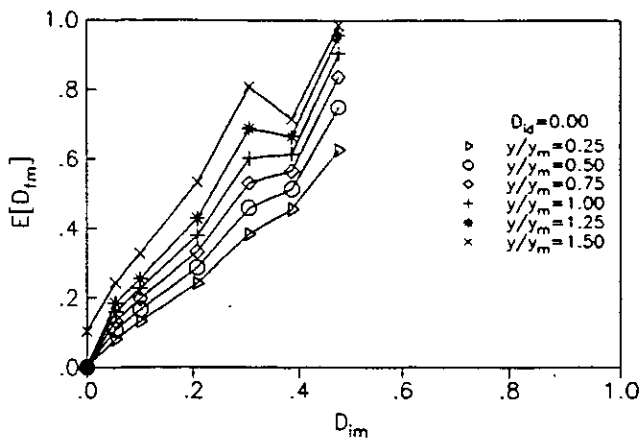


Fig. 6.29 Daño medio en marco equivalente con $\eta_k = \eta_R = 0.5$, $T = 0.5$ s, $c_s = 0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

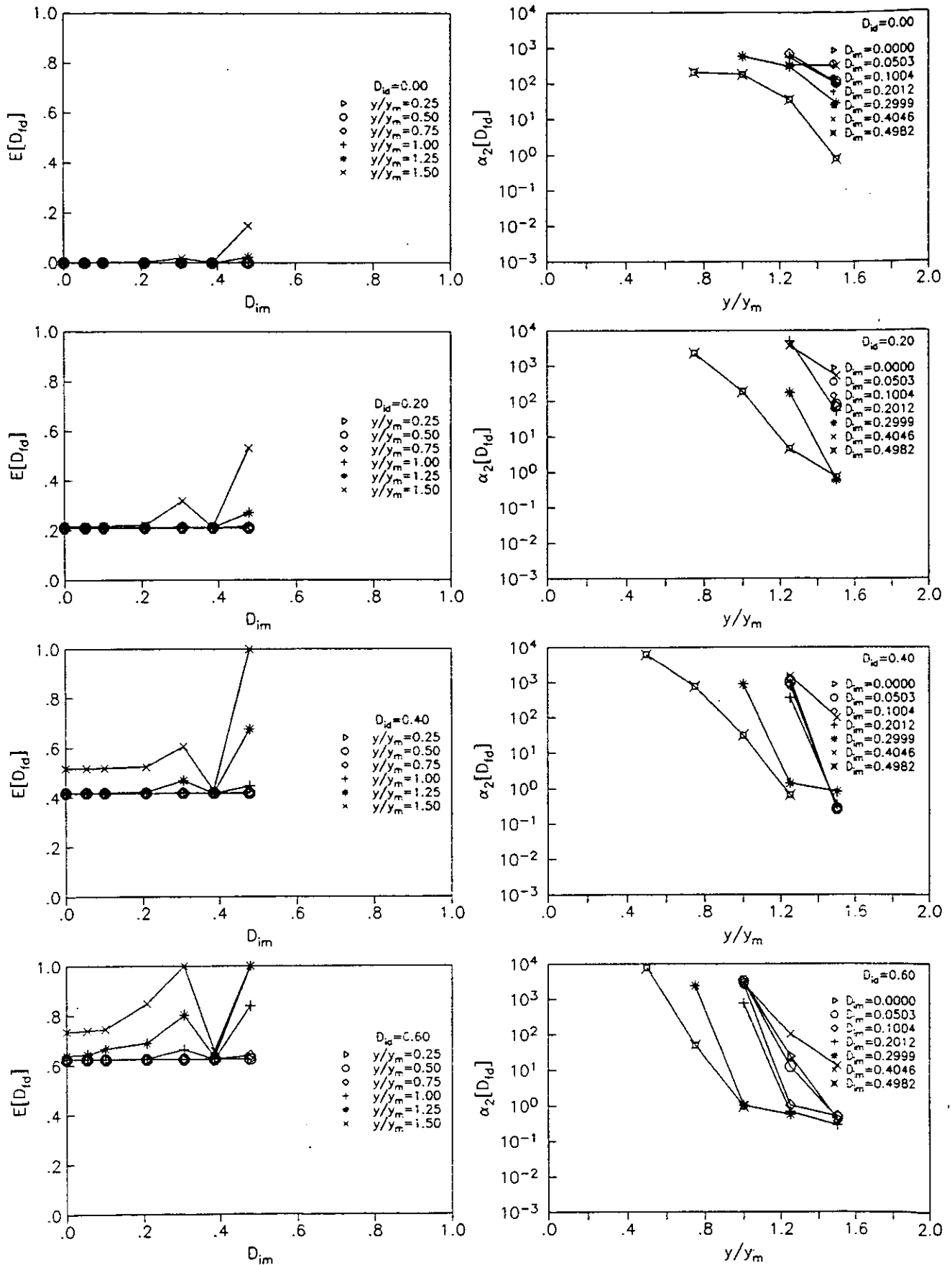


Fig. 6.30 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=0.5$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

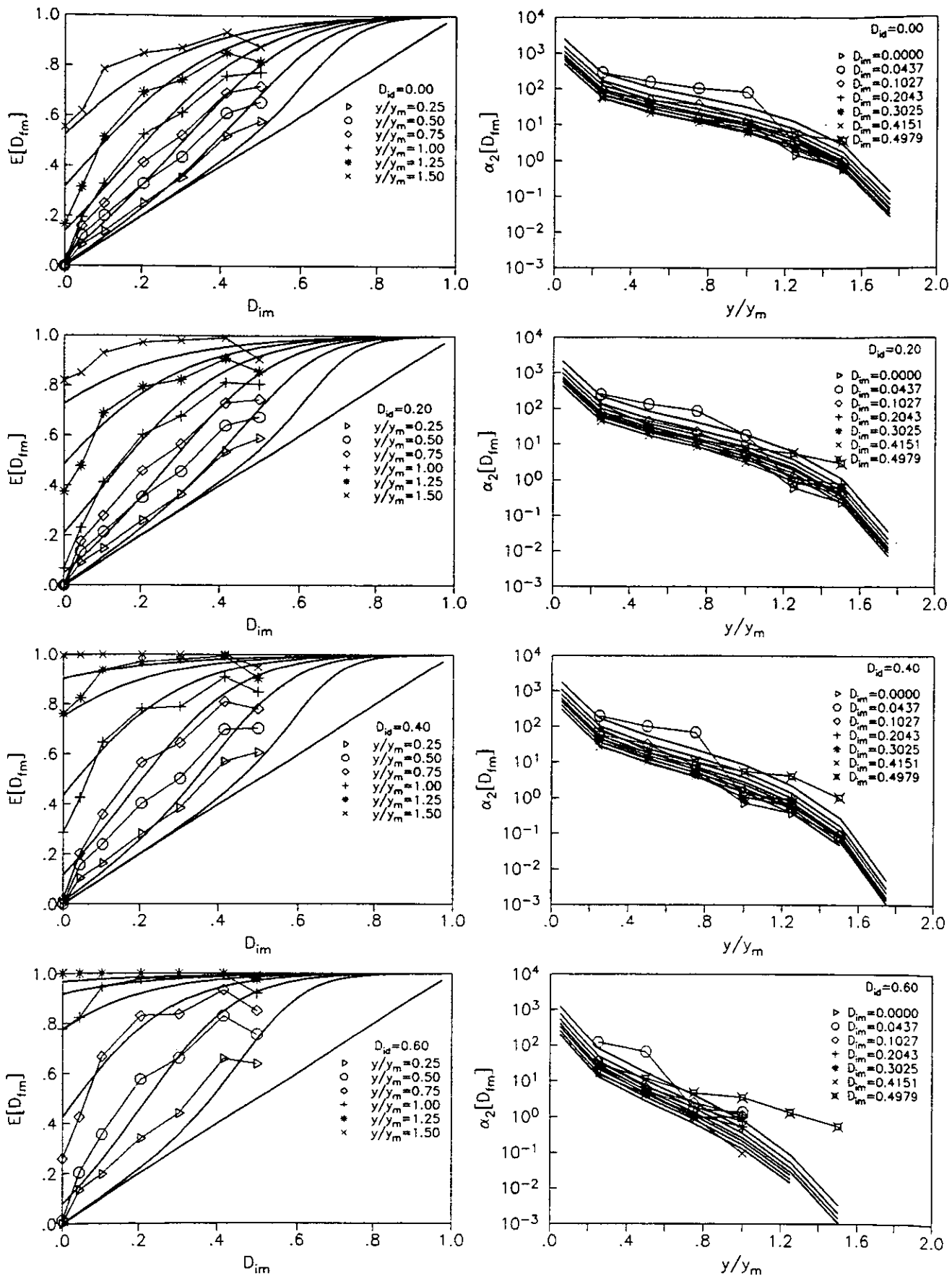


Fig. 6.31 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=0.5$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

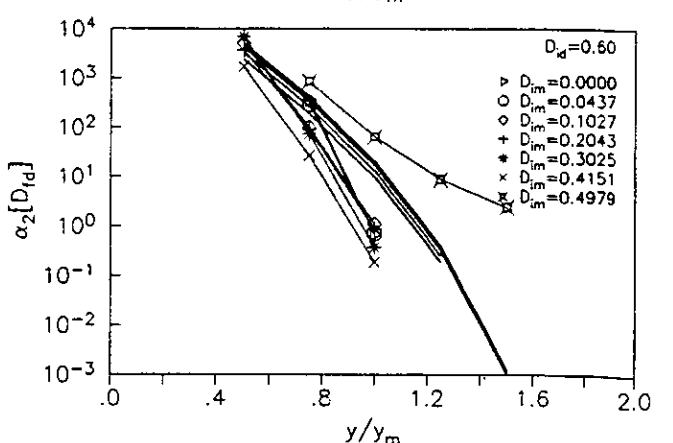
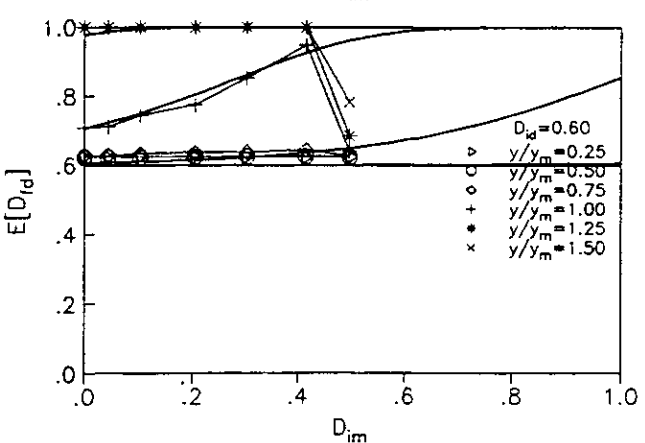
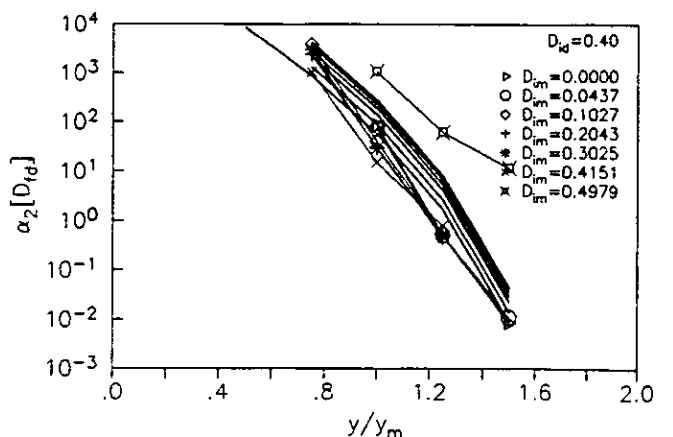
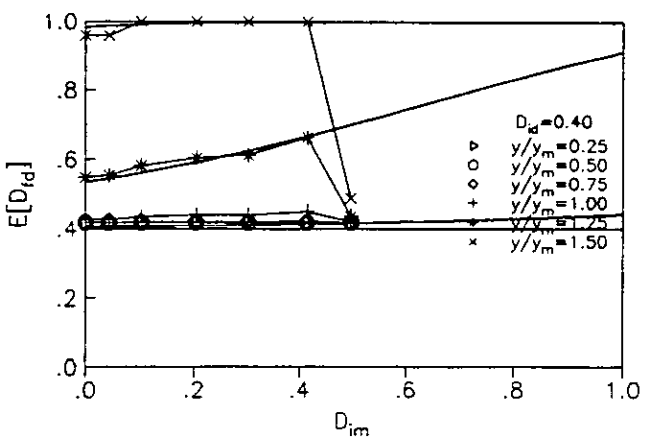
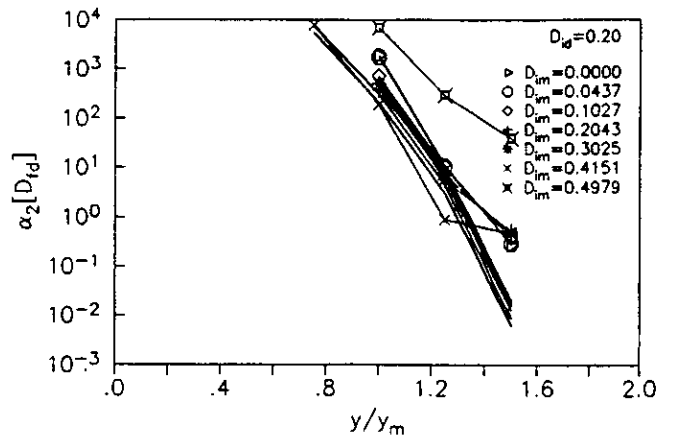
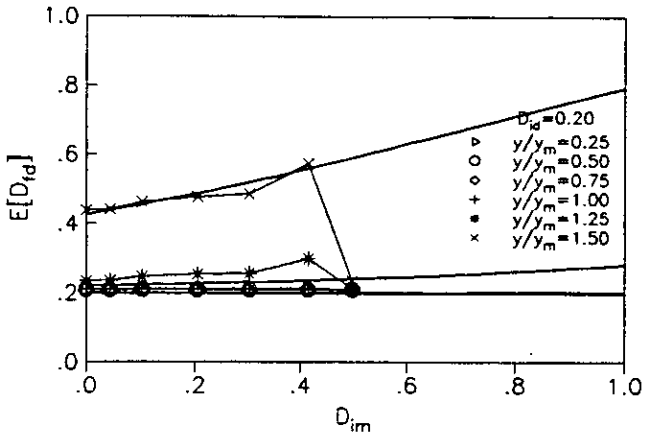
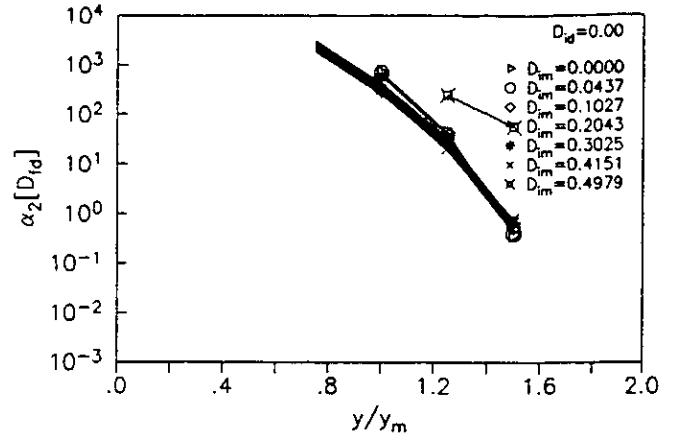
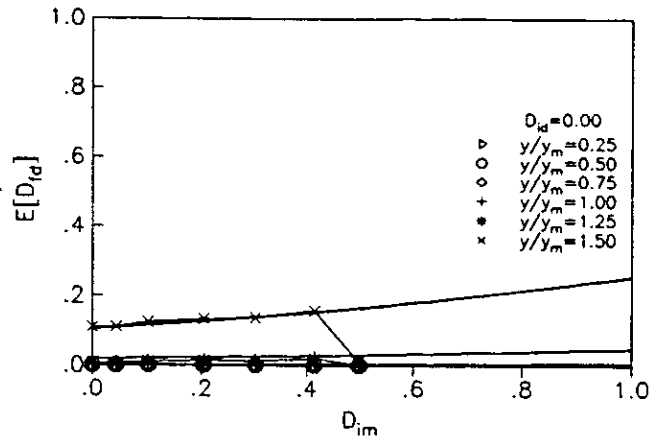


Fig. 6.32 Daño medio en disipador de marco equivalente con $n_k=\tau_R=0.75$, $T=0.5$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

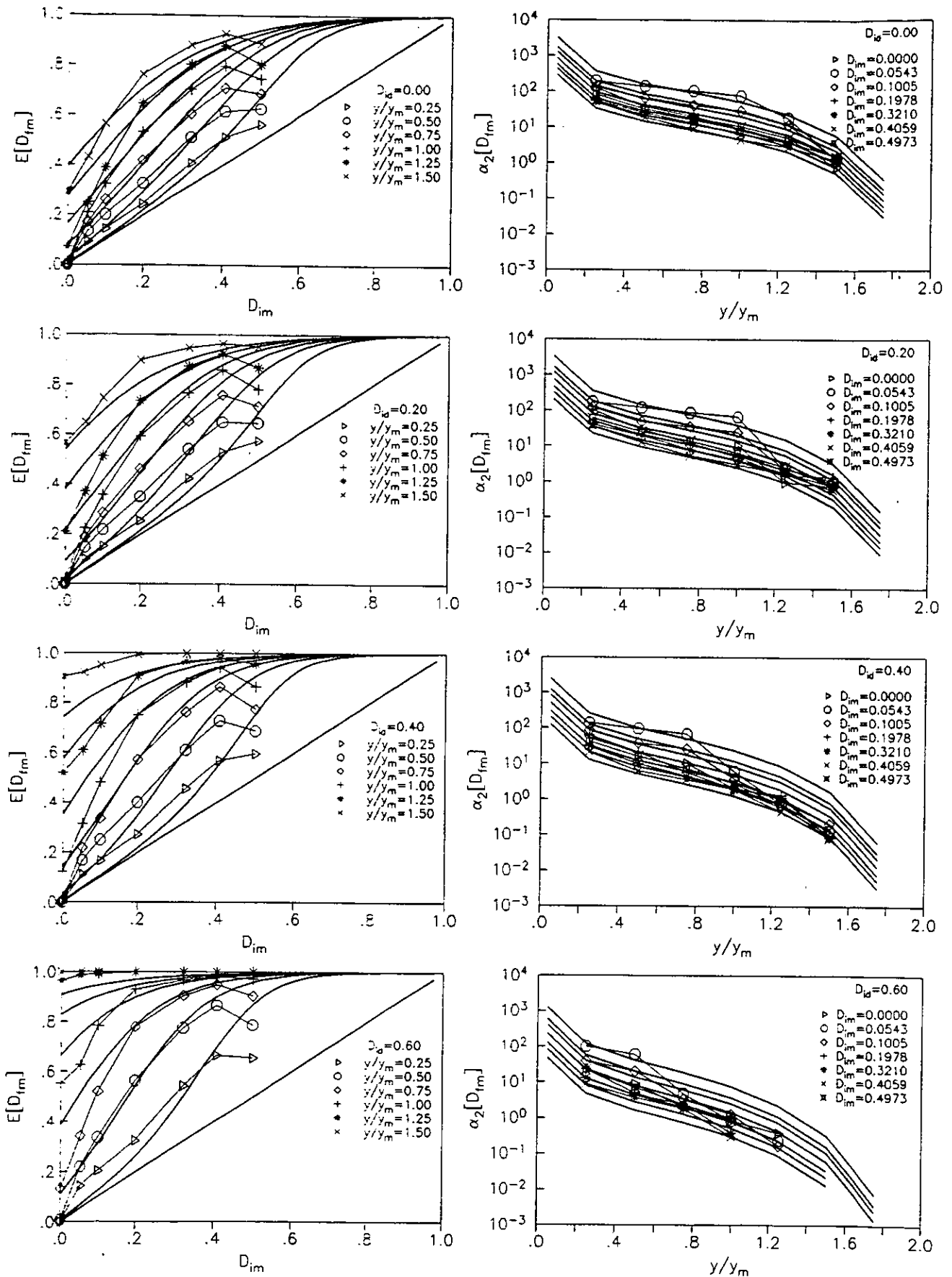


Fig. 6.33 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=0.5$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

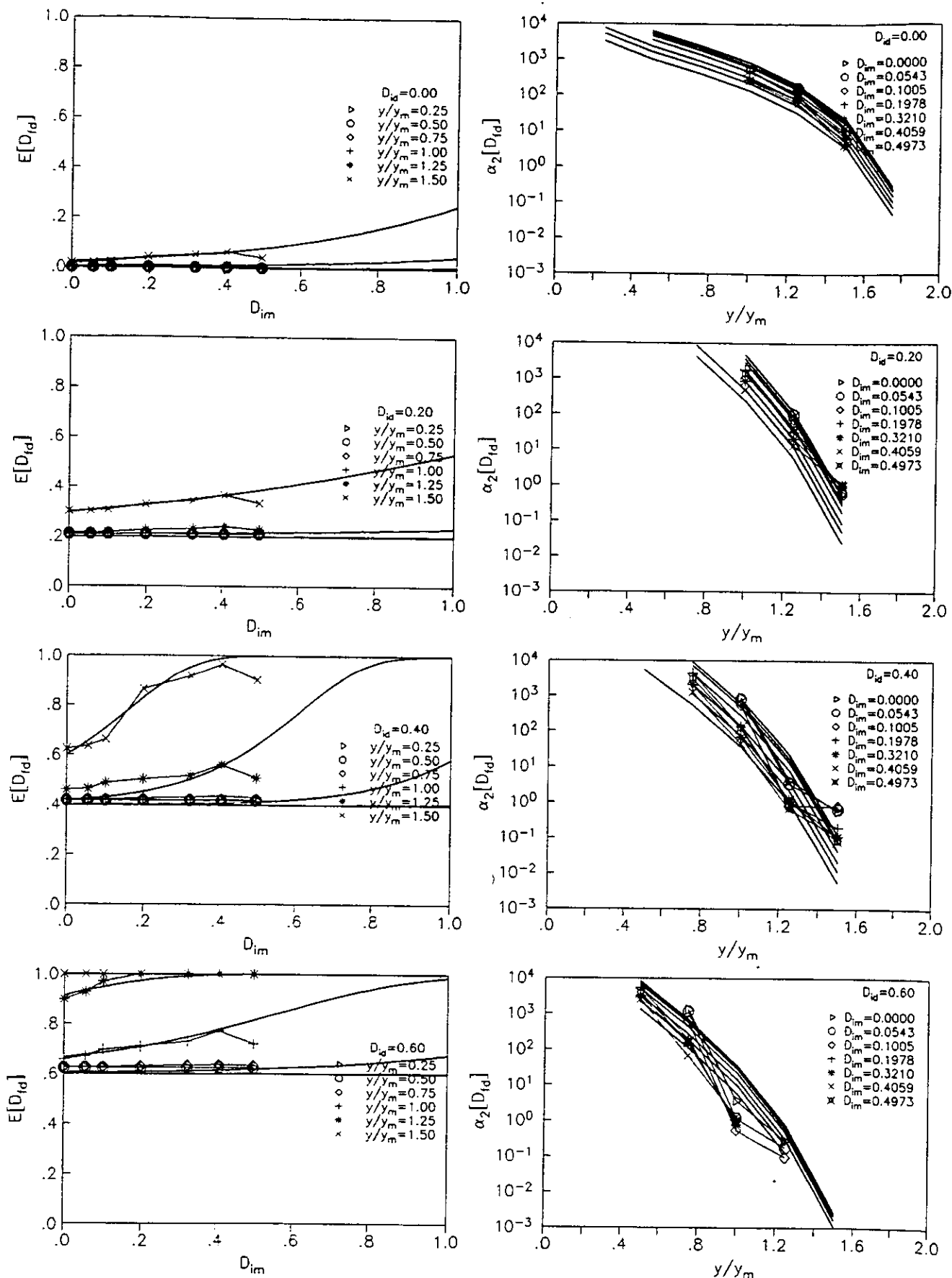


Fig. 6.34 Daño medio en dissipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=0.5$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

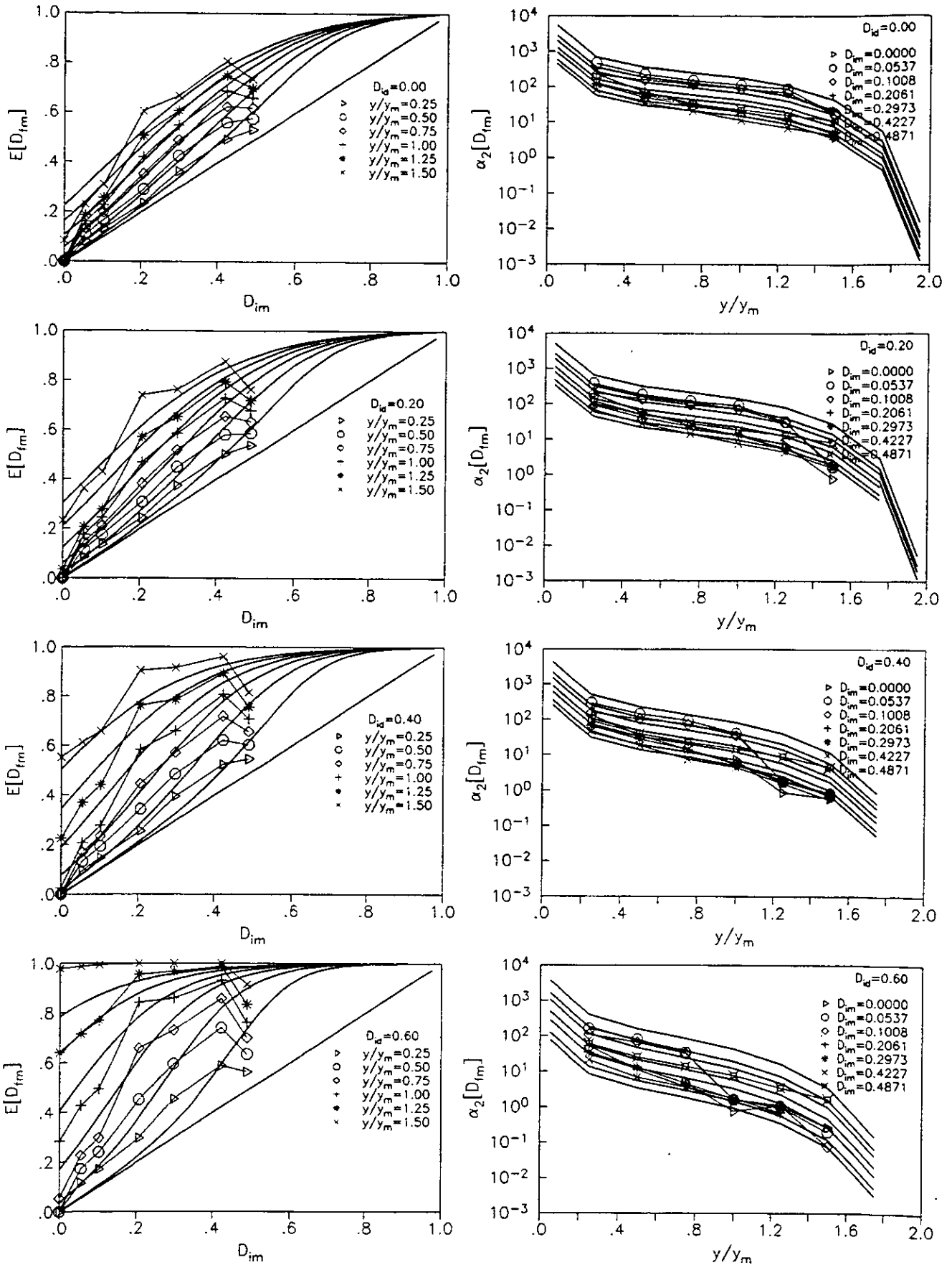


Fig. 6.35 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=0.5$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

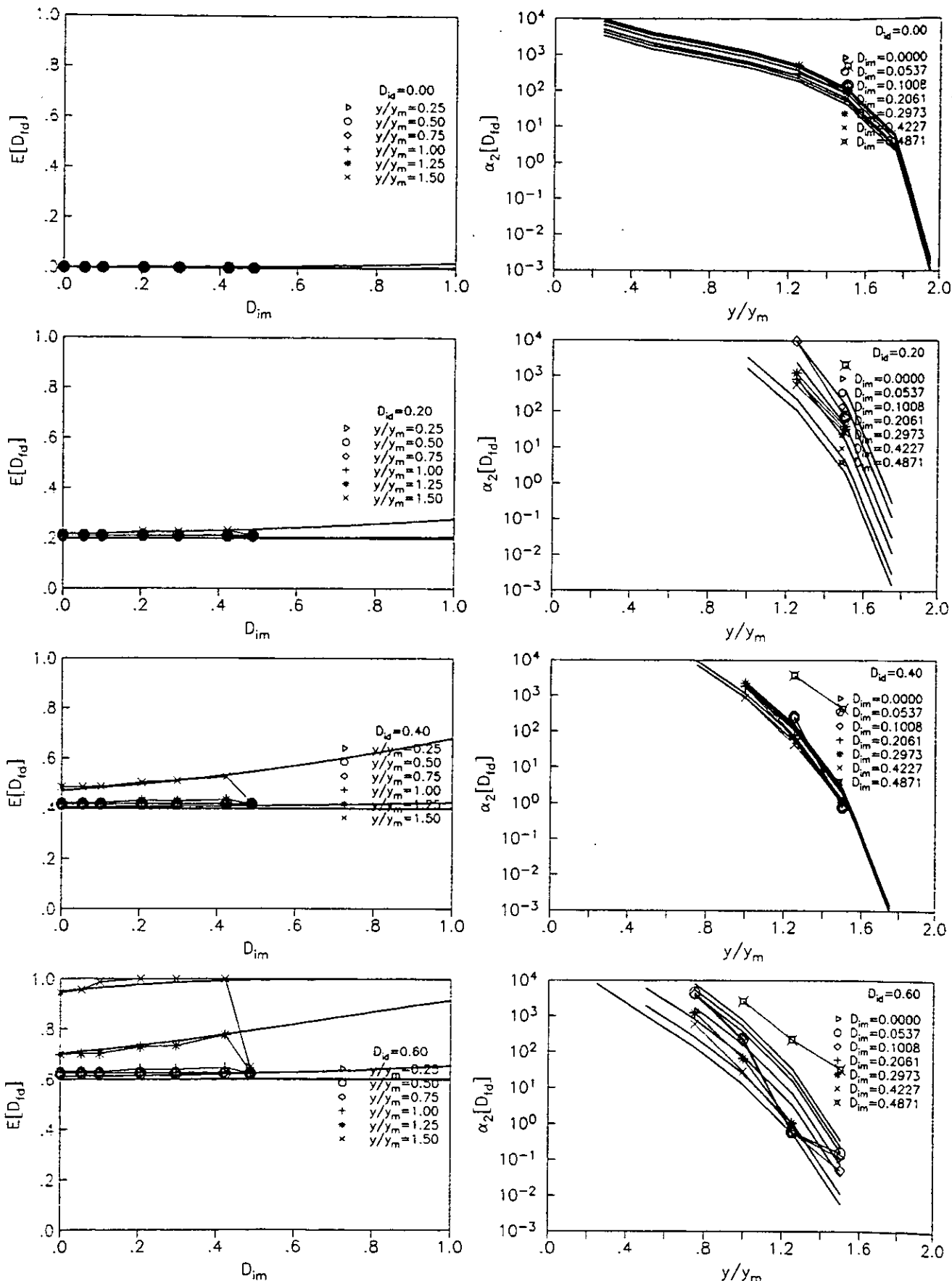


Fig. 6.36 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=0.5$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

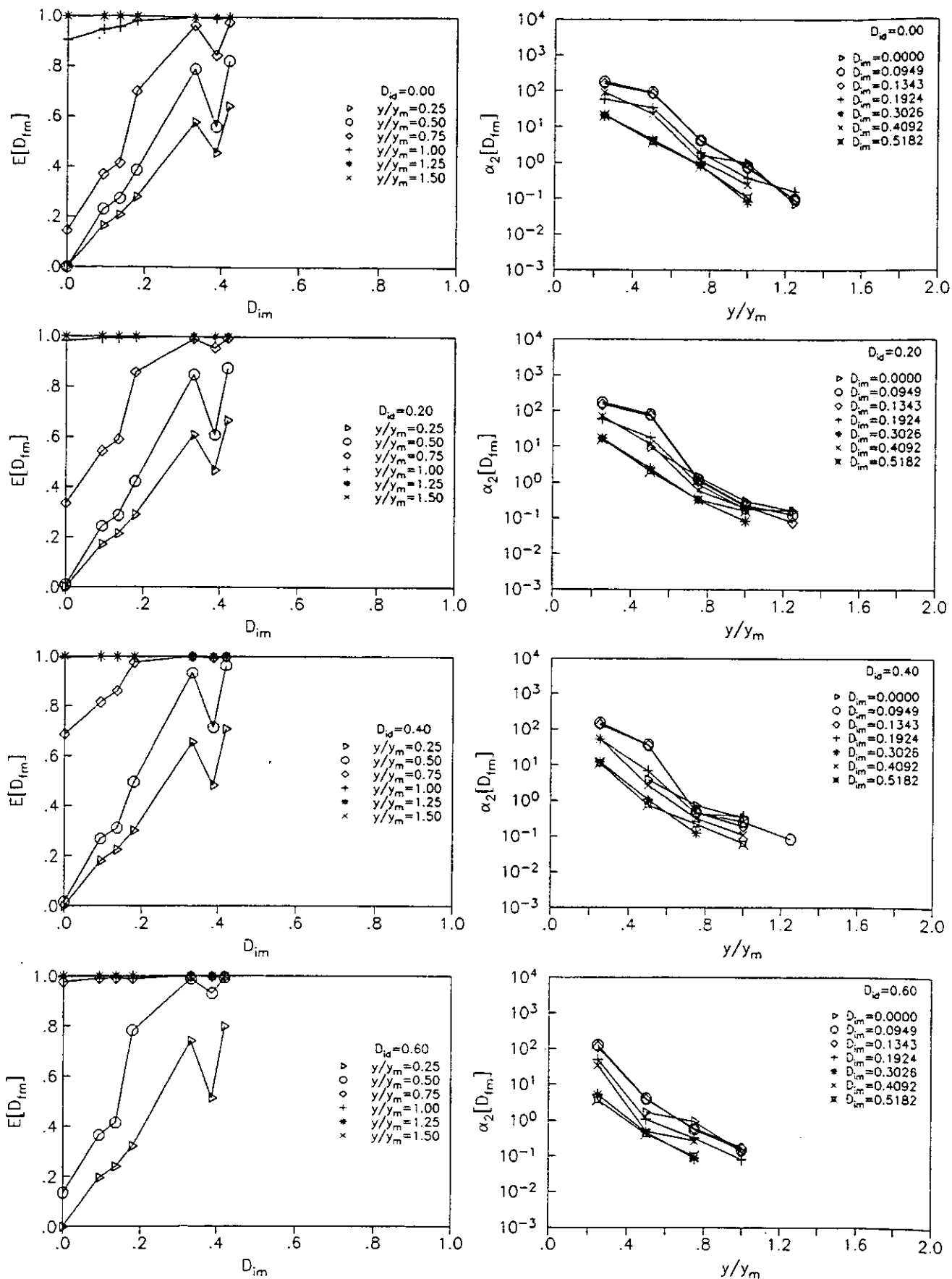


Fig. 6.37 Daño medio en marco equivalente con $\eta_k = \eta_R = 0.5$, $T = 1.0$ s, $c_s = 0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

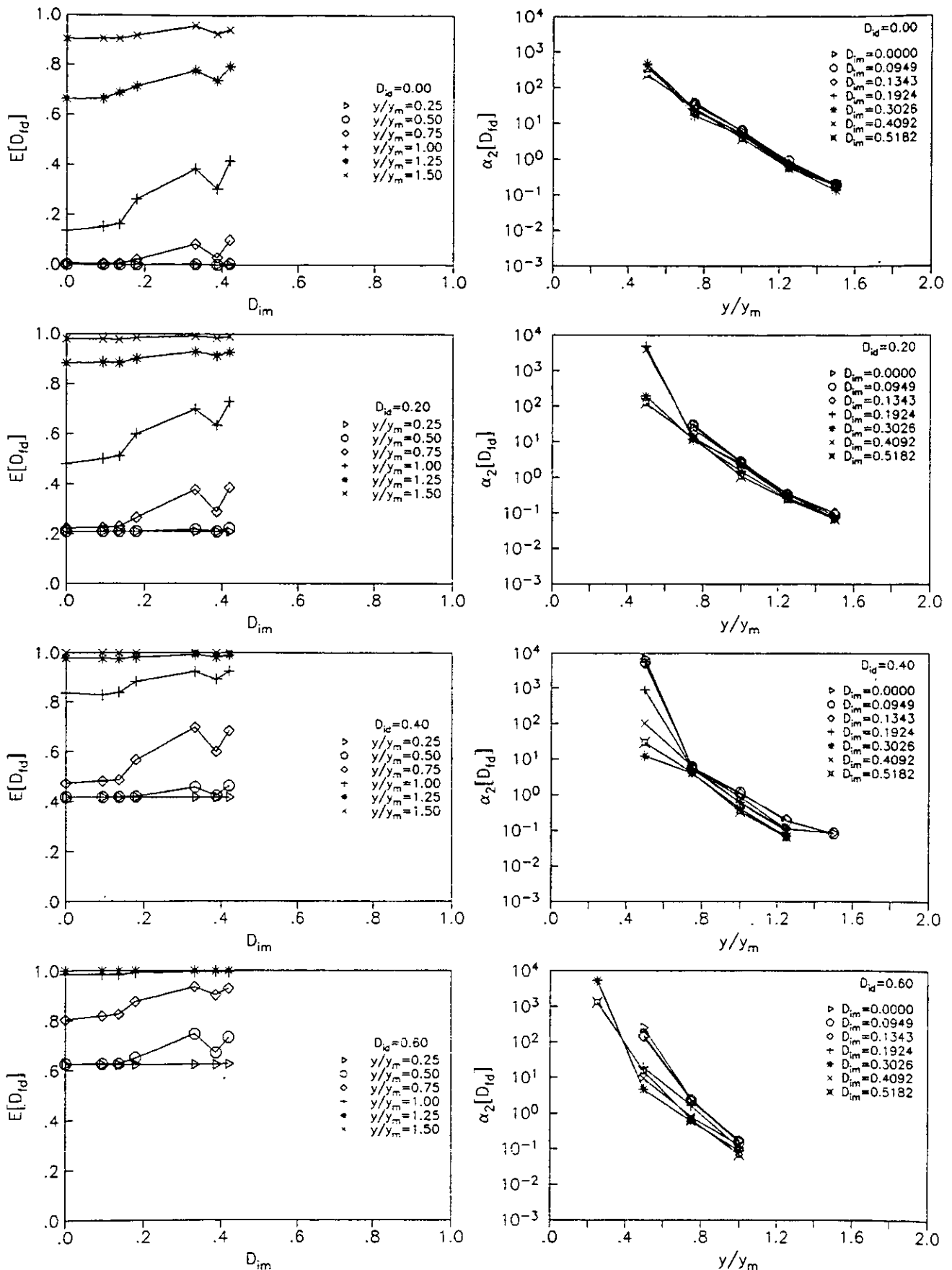


Fig. 6.38 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=1.0$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

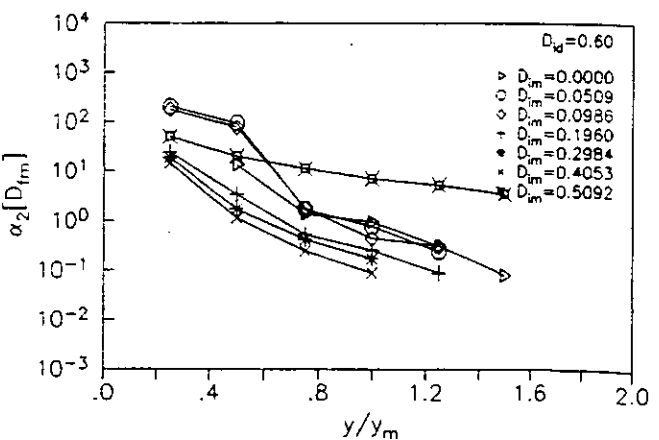
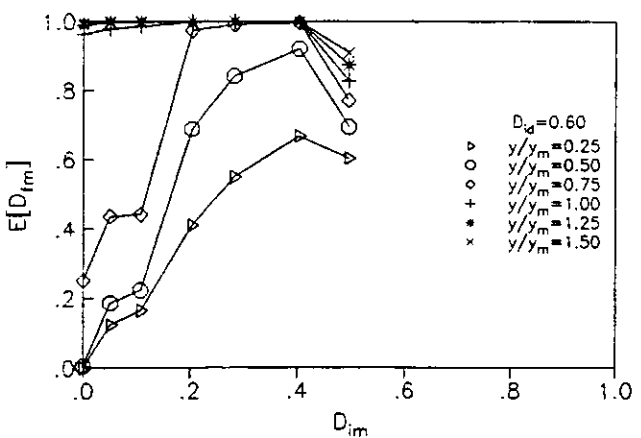
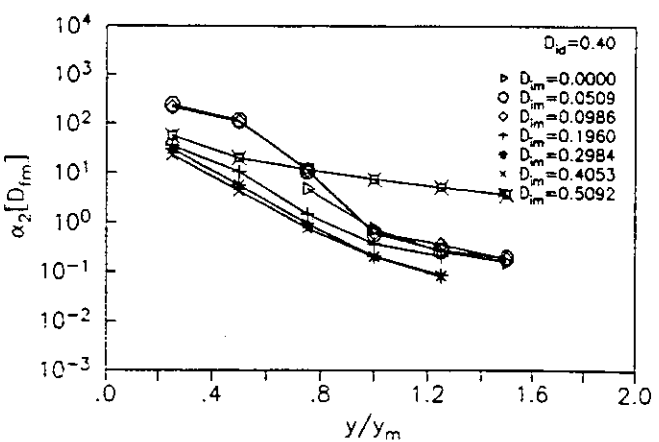
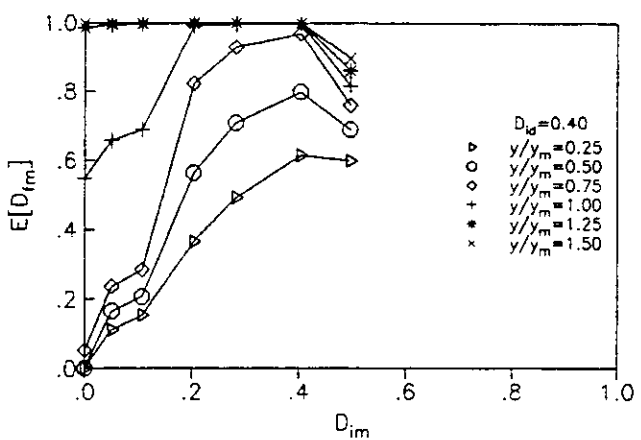
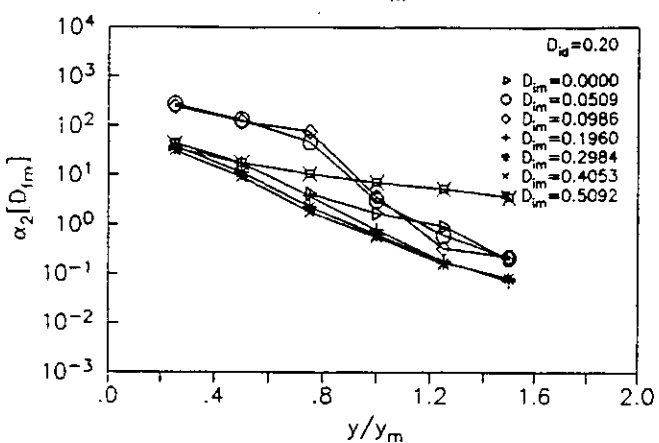
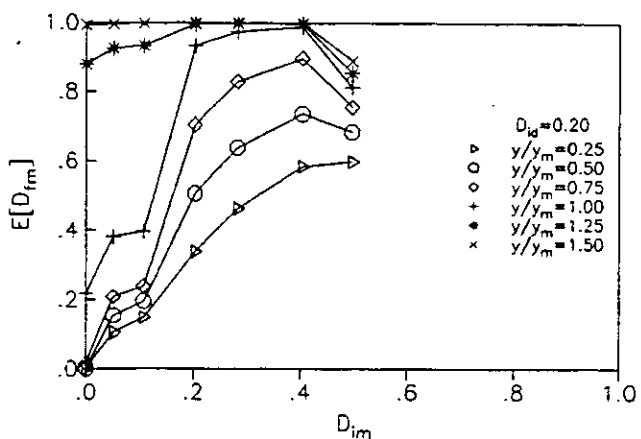
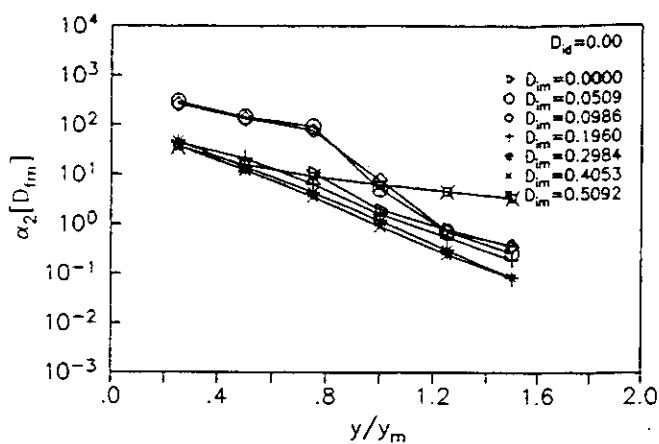
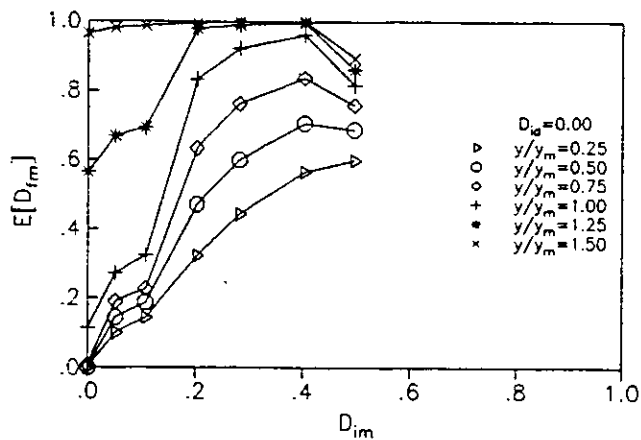


Fig. 6.39 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=1.0$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

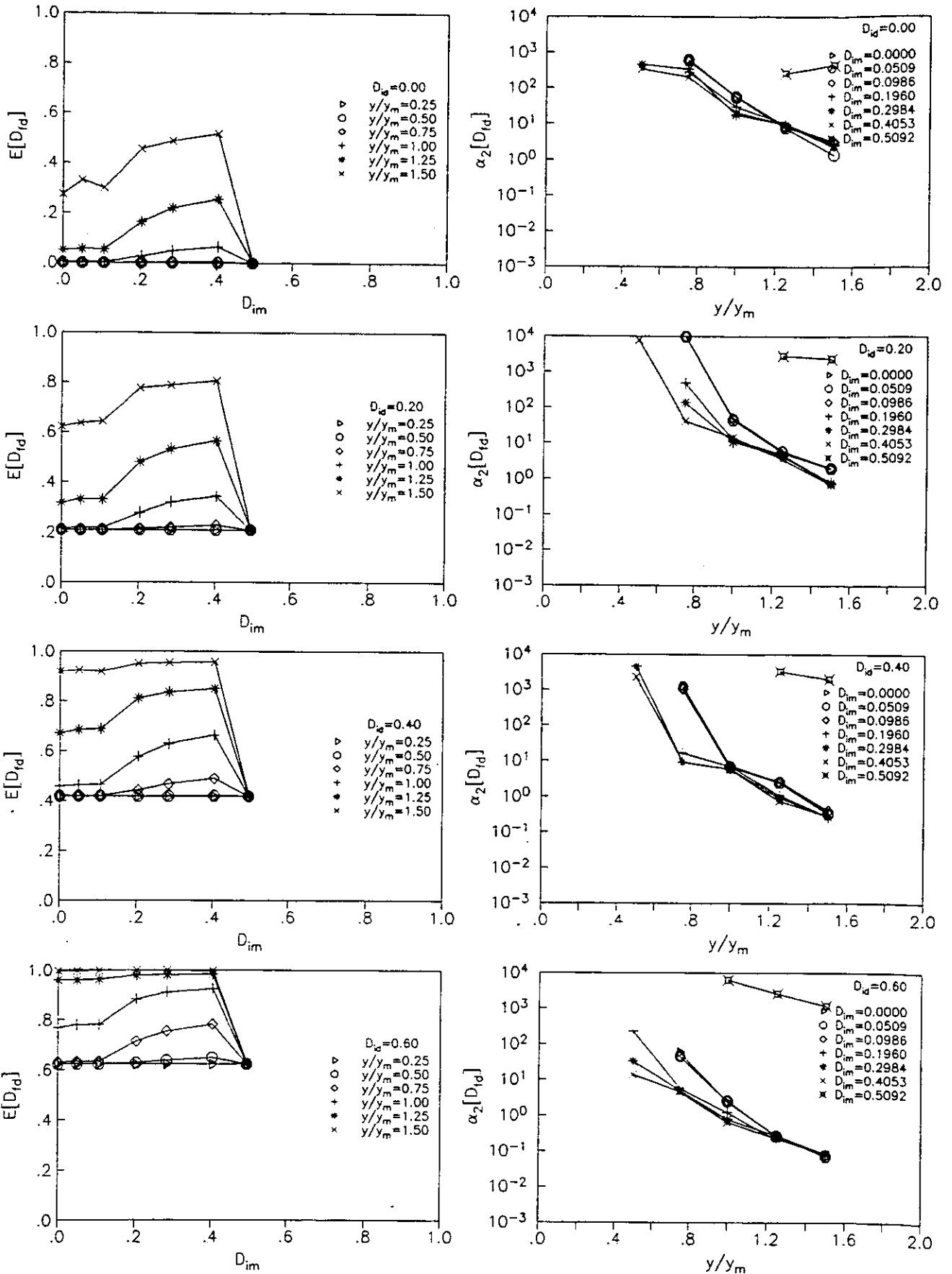


Fig. 6.40 Daño medio en disipador de marco equivalente con $\eta_k = \eta_R = 0.5$, $T = 1.0$ s, $c_s = 0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

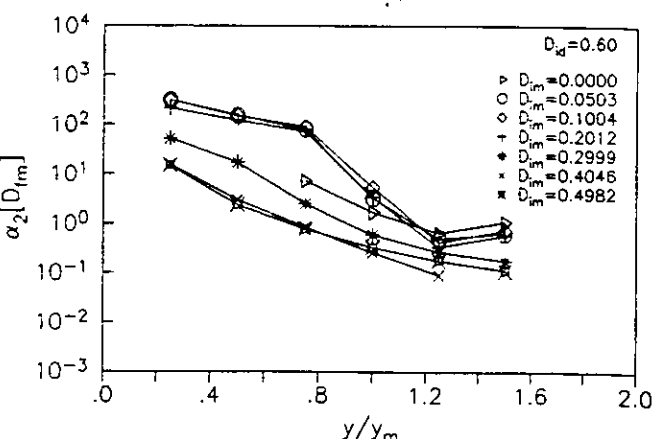
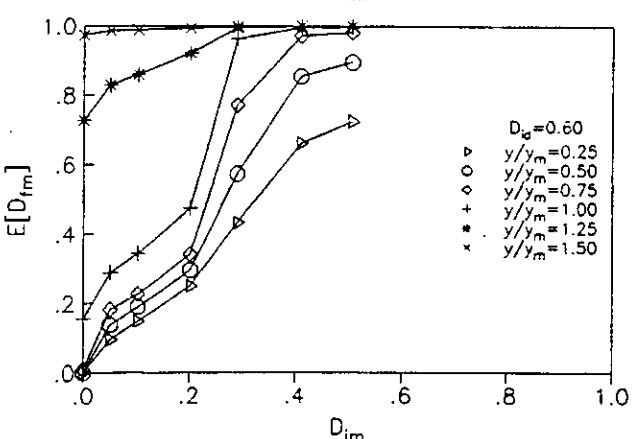
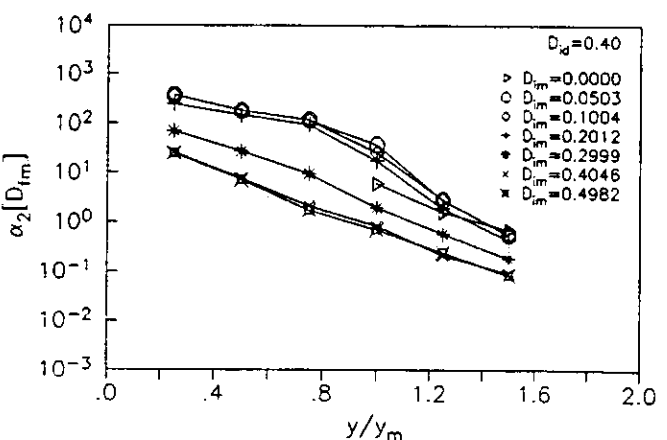
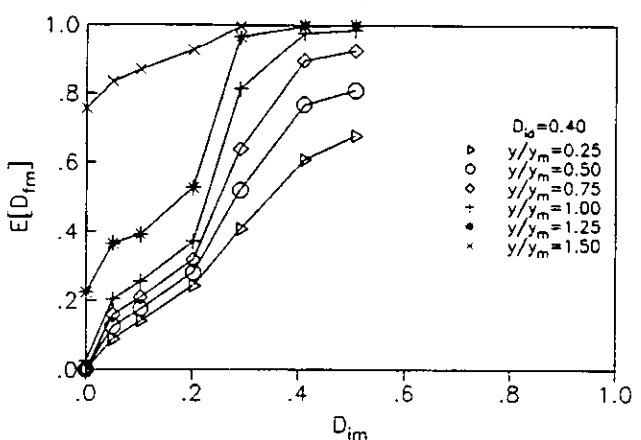
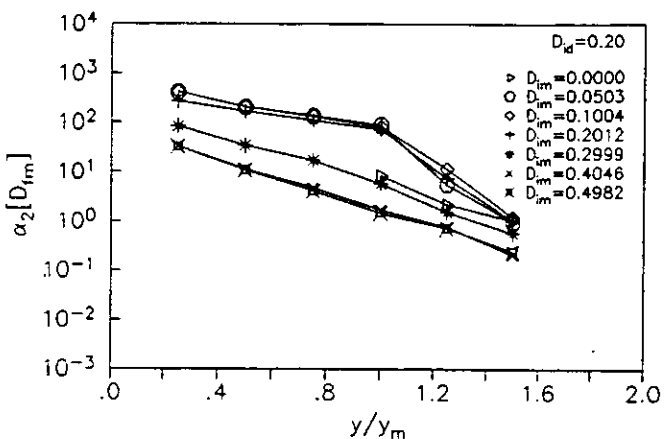
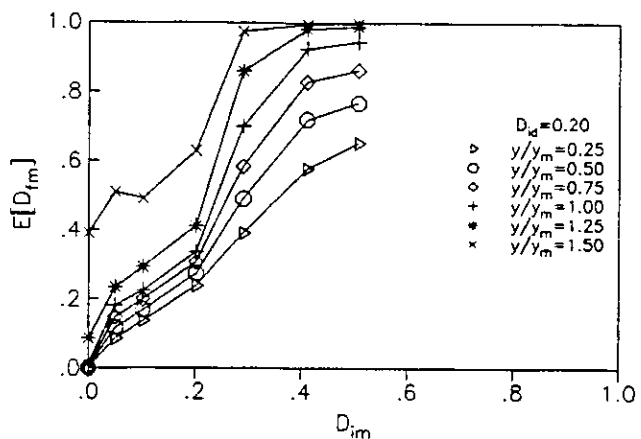
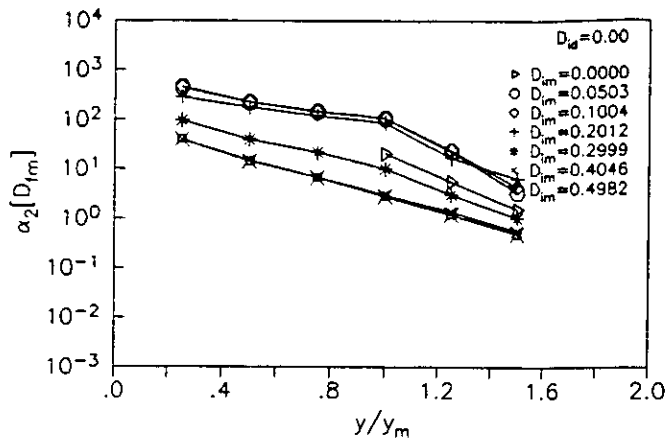
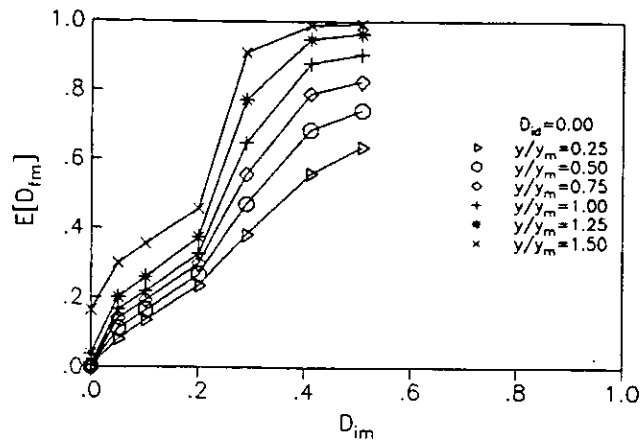


Fig. 6.41 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=1.0$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

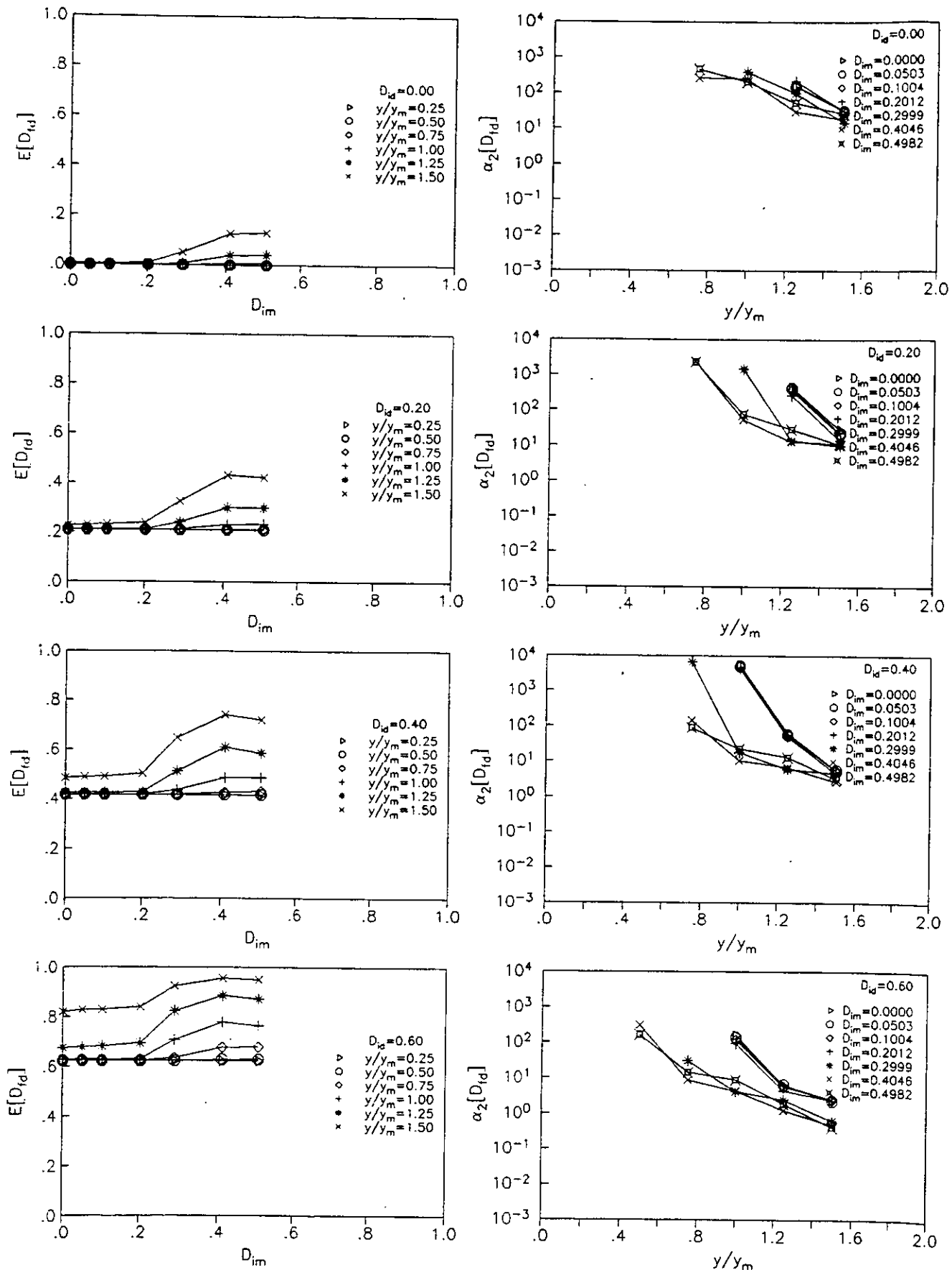


Fig. 6.42 Daño medio en dissipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=1.0$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

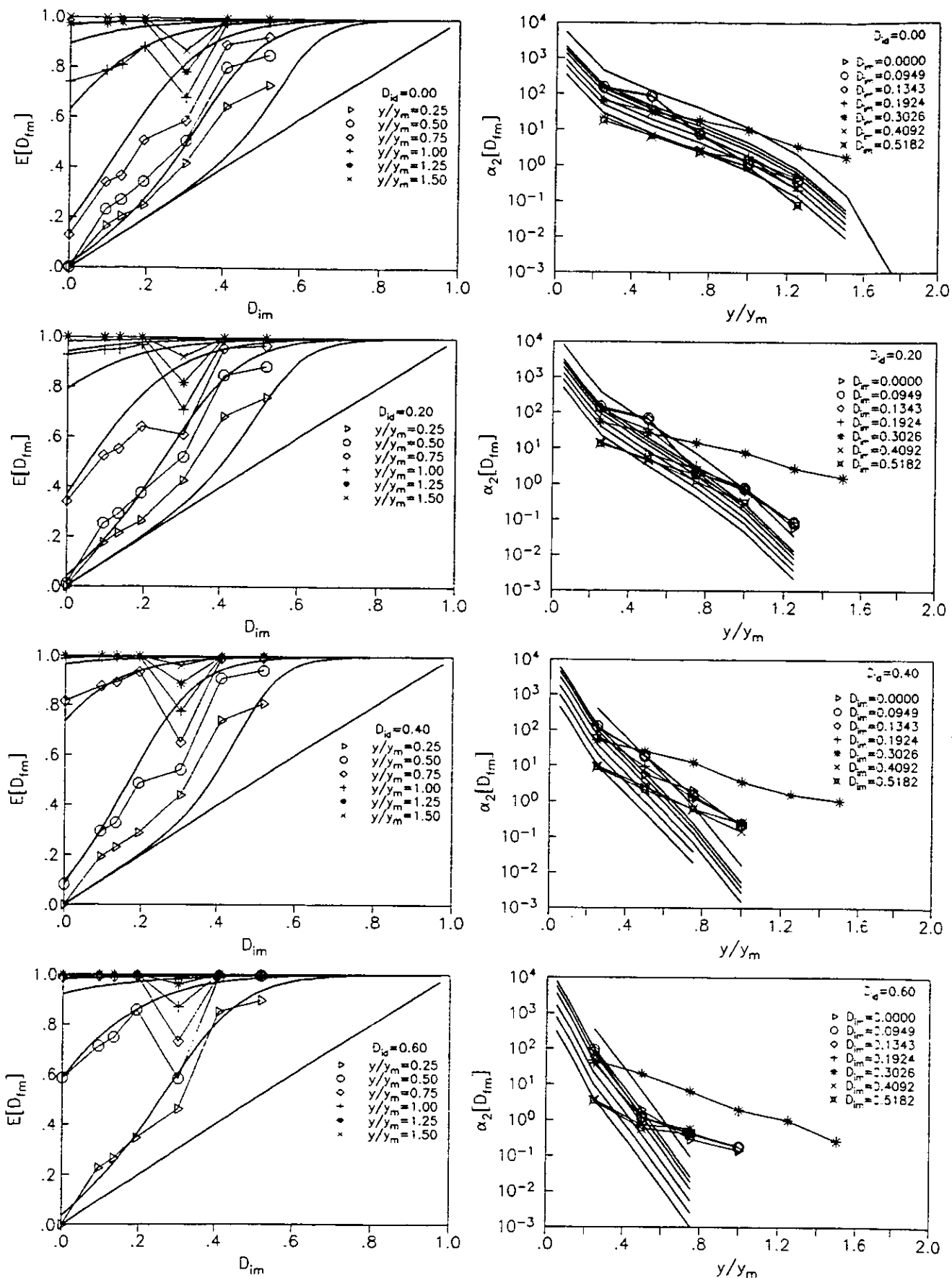


Fig. 6.43 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.0$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

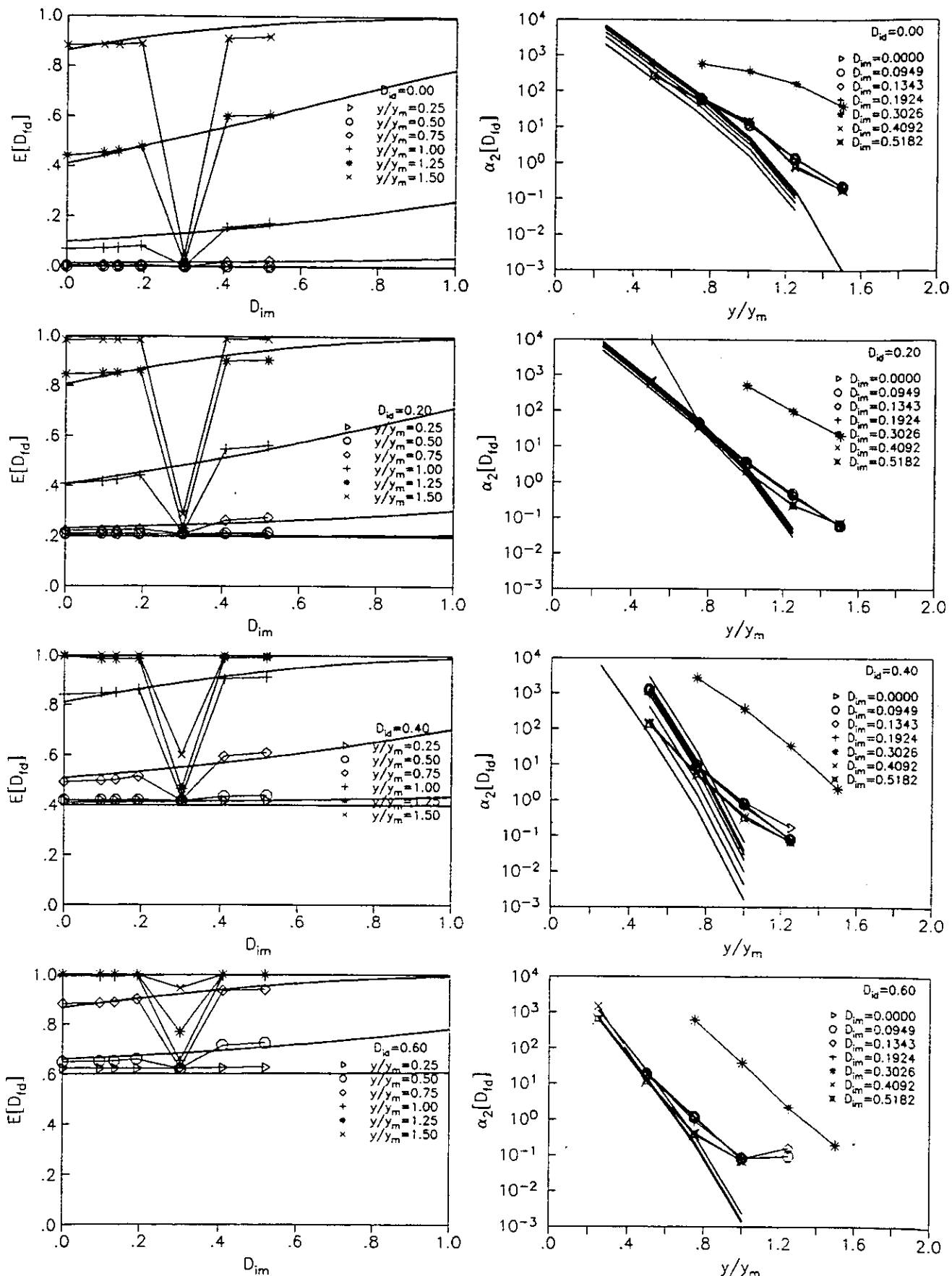


Fig. 6.44 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.0$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

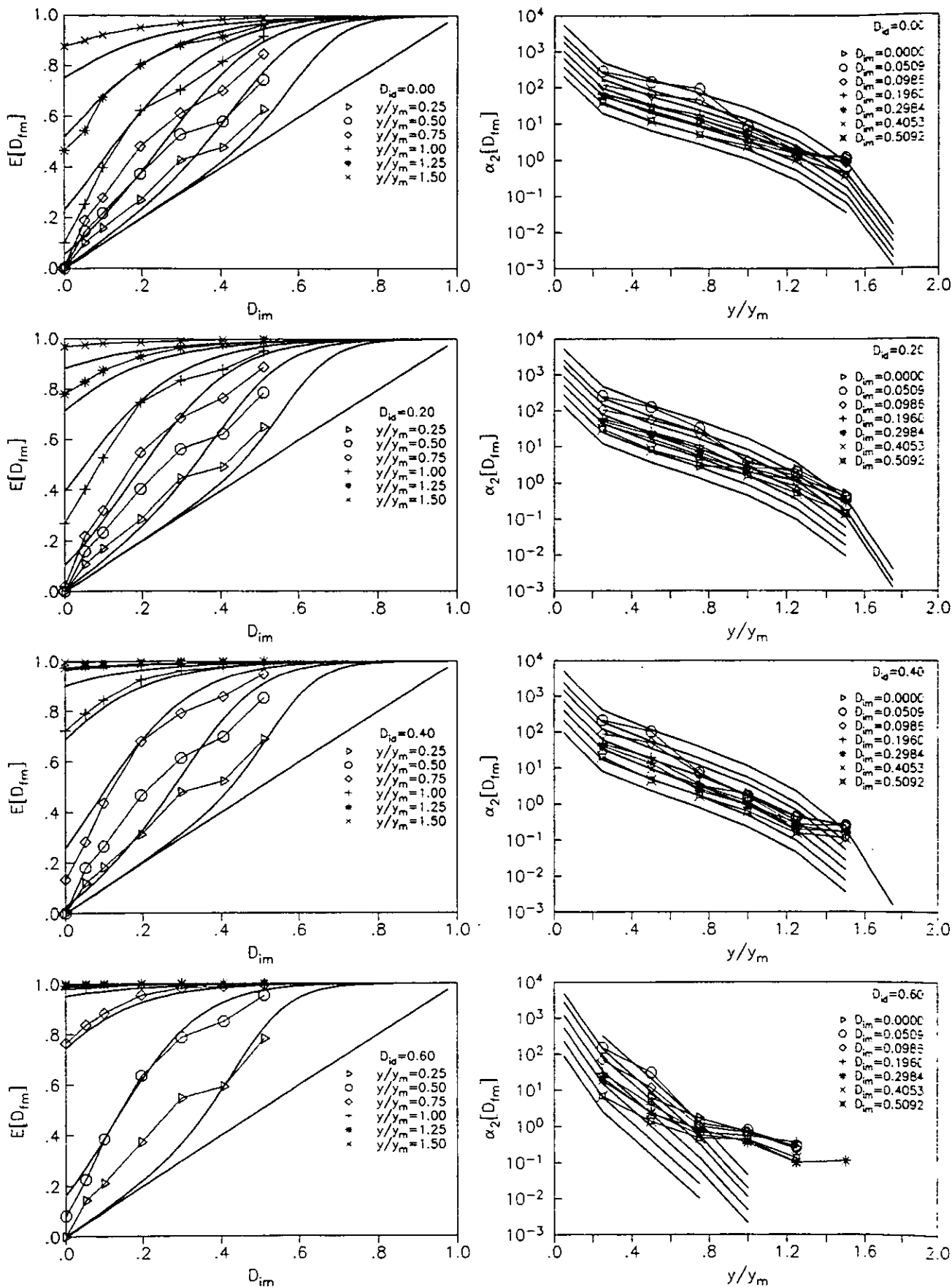


Fig. 6.45 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.0$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

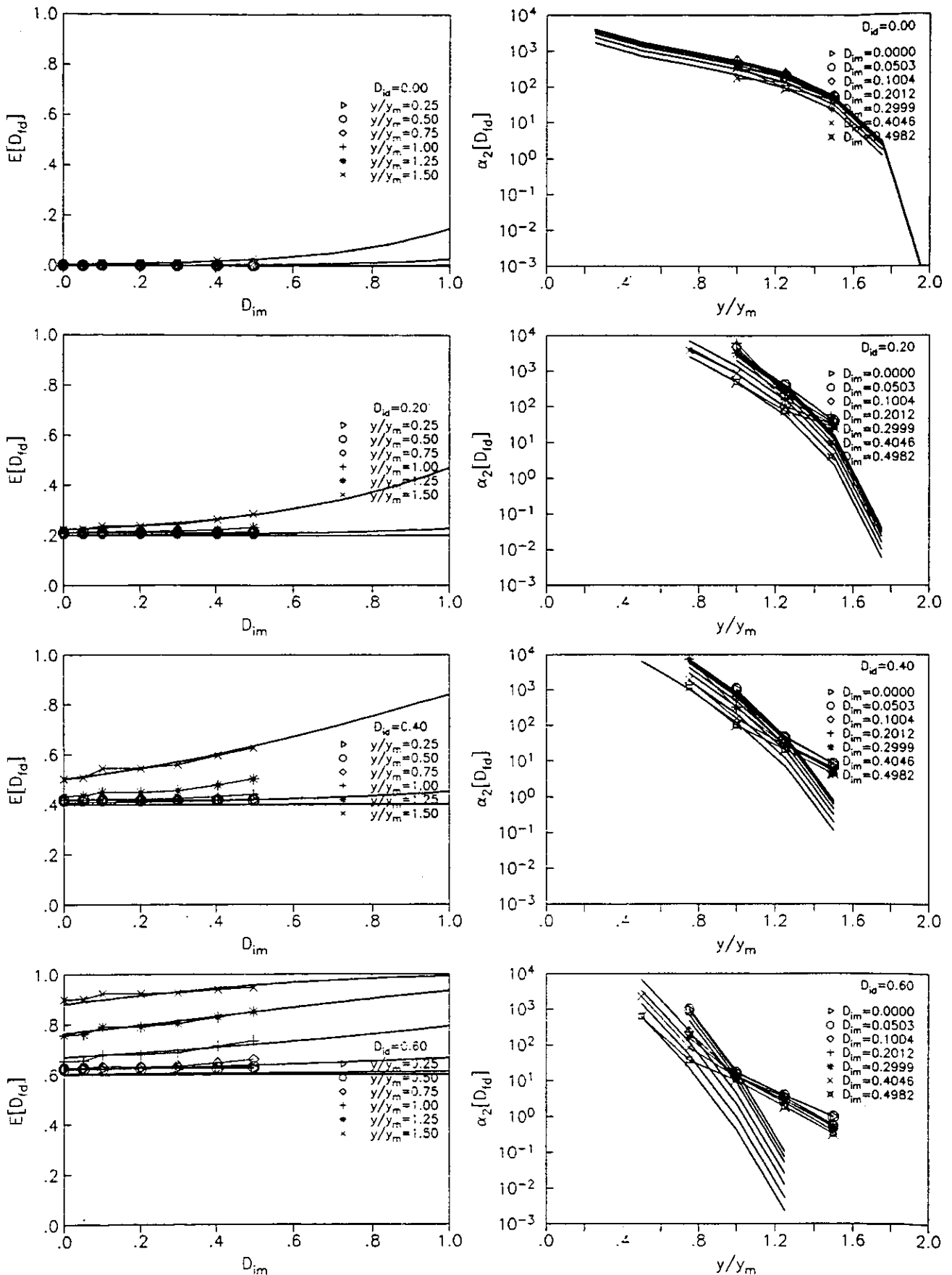


Fig. 6.46 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.0$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

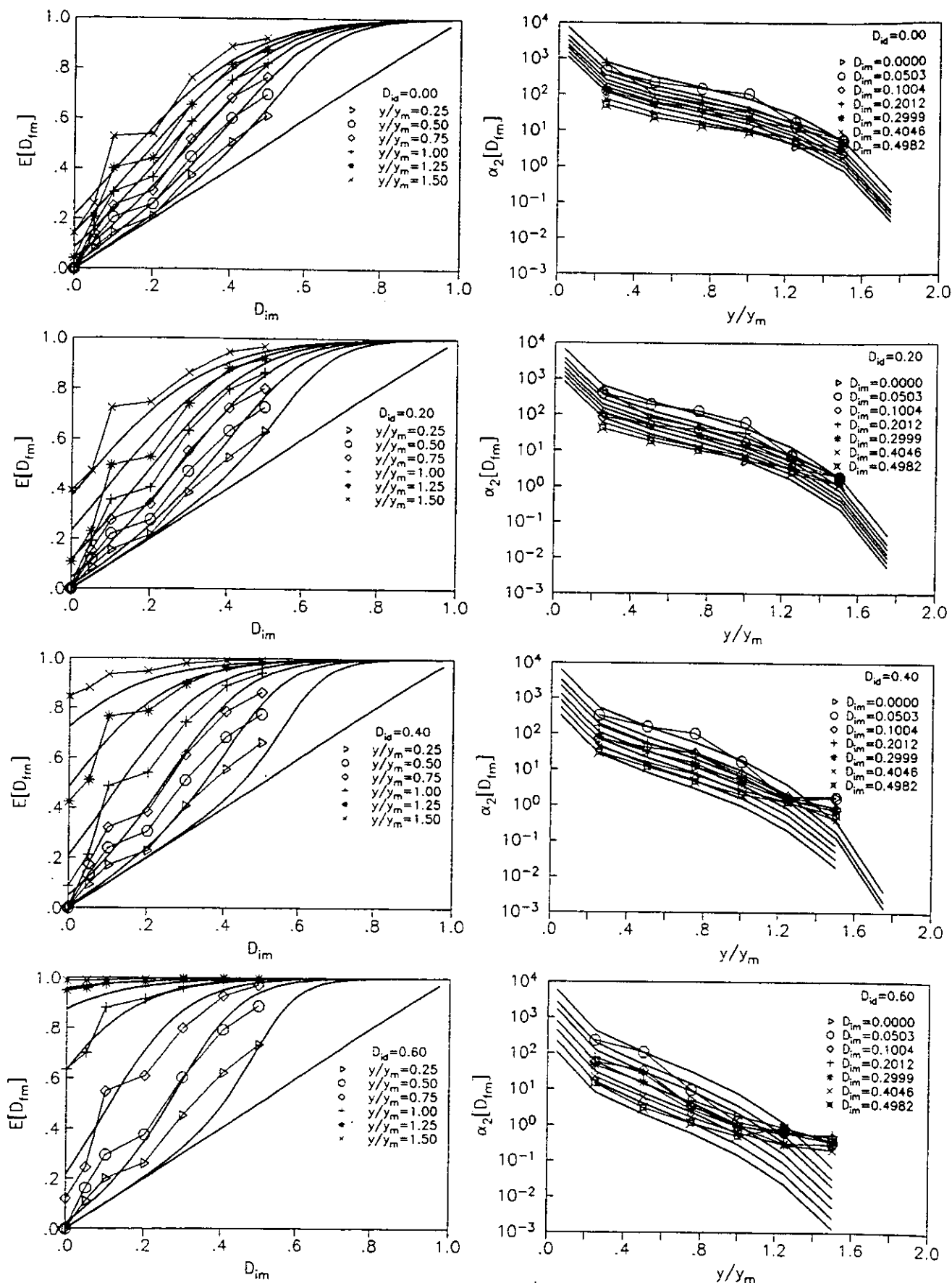


Fig. 6.47 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.0$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

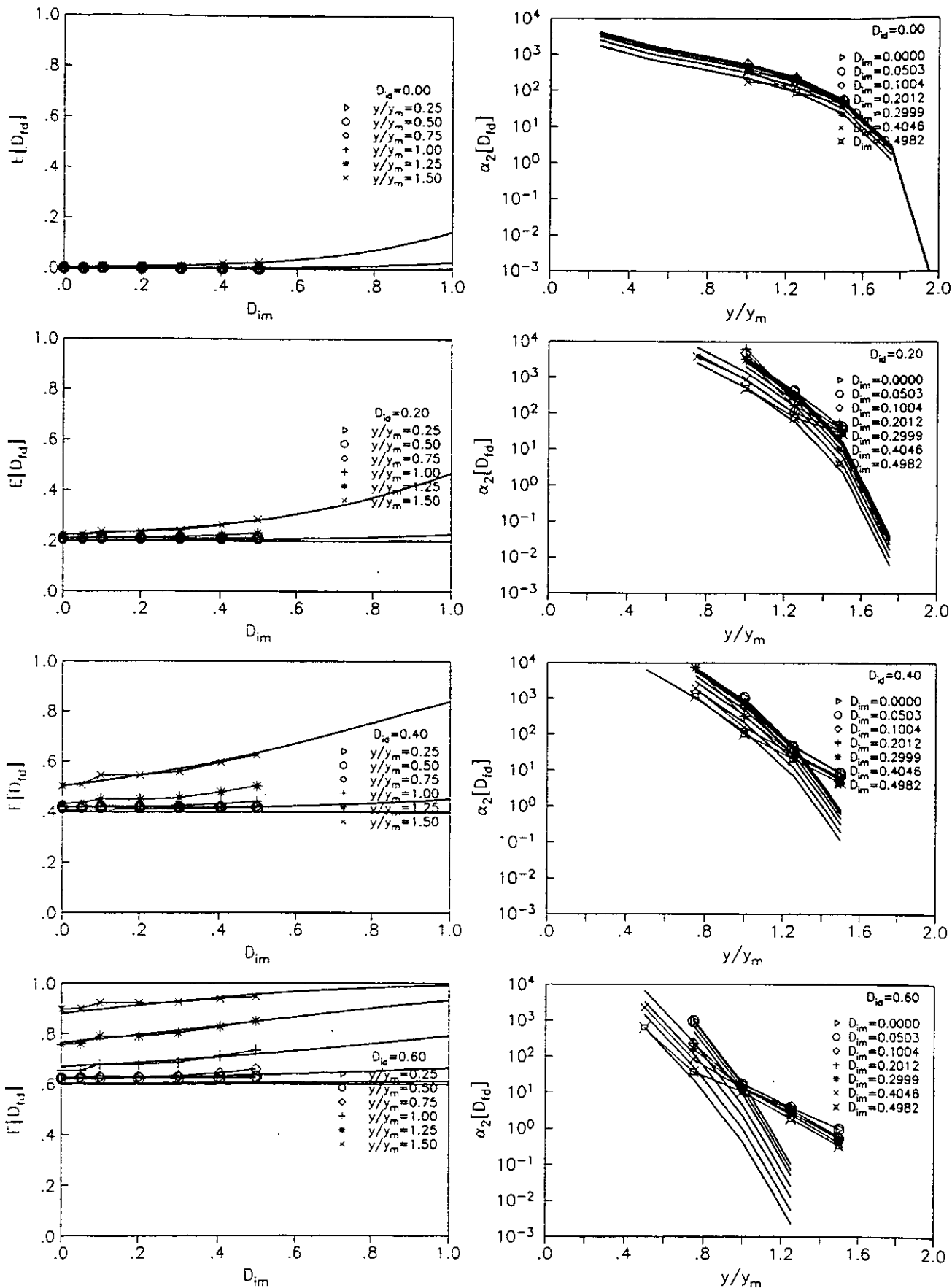


Fig. 6.48 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.0$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

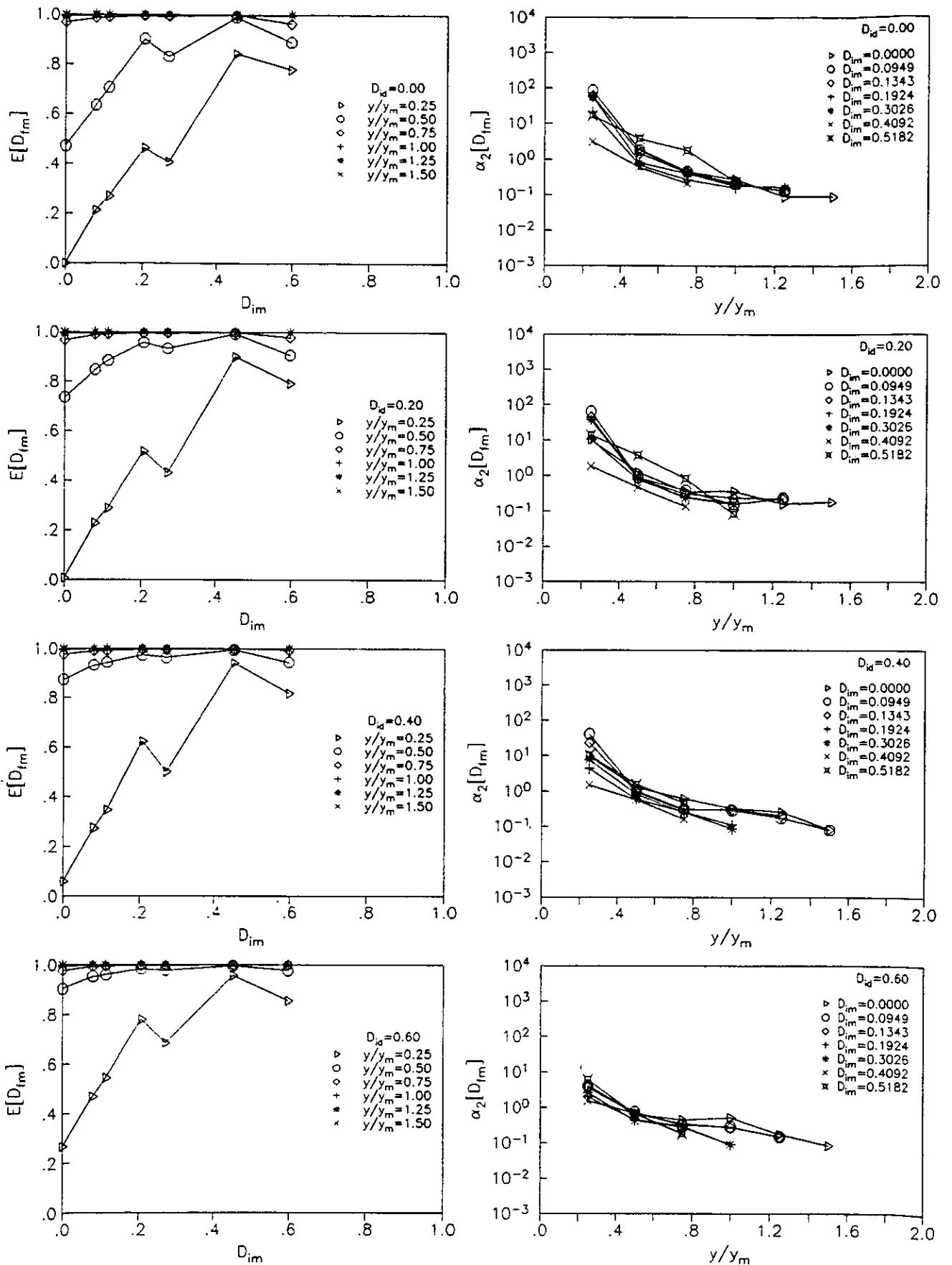


Fig. 6.49 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=1.5$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

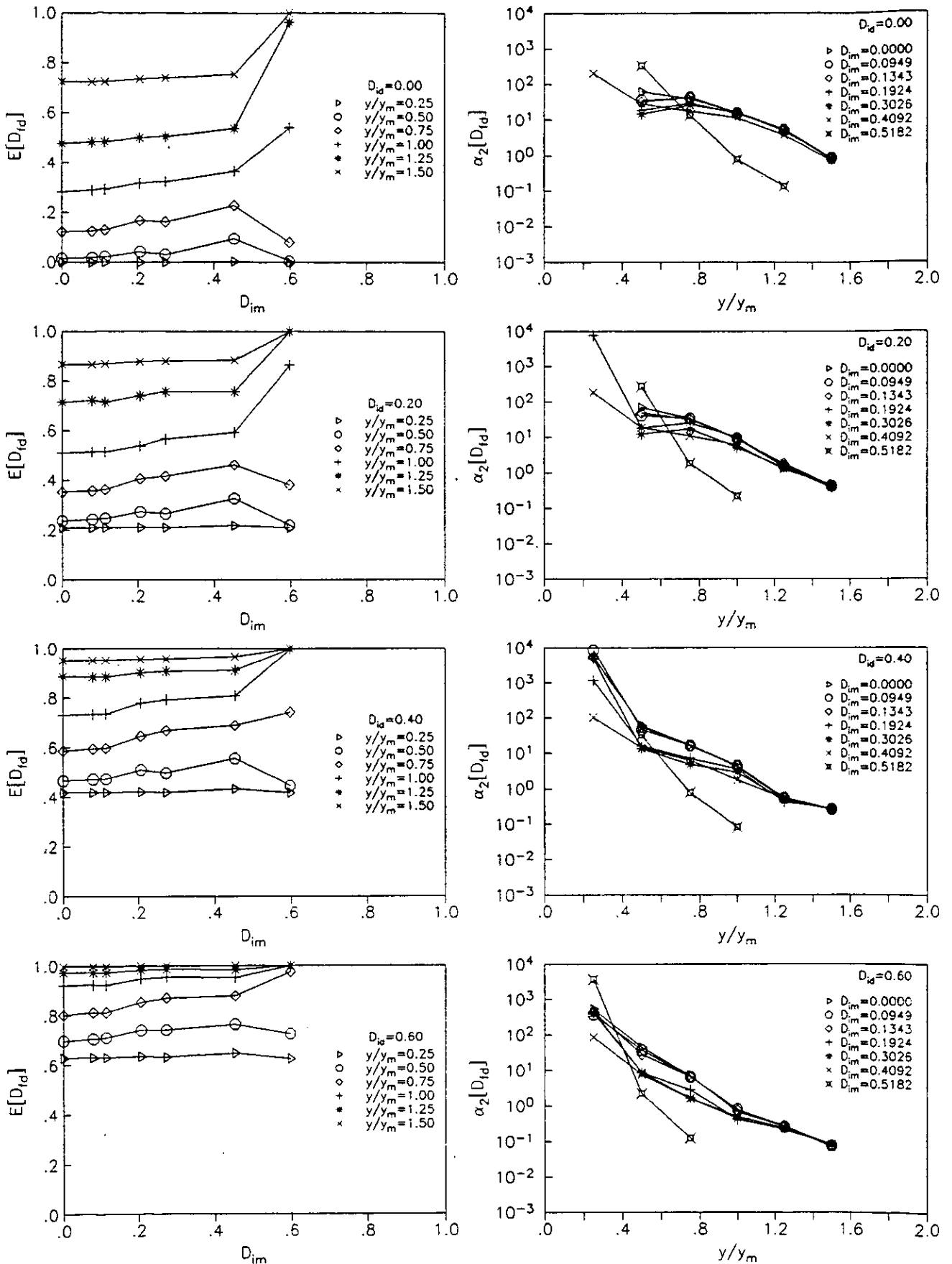


Fig. 6.50 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=1.5$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

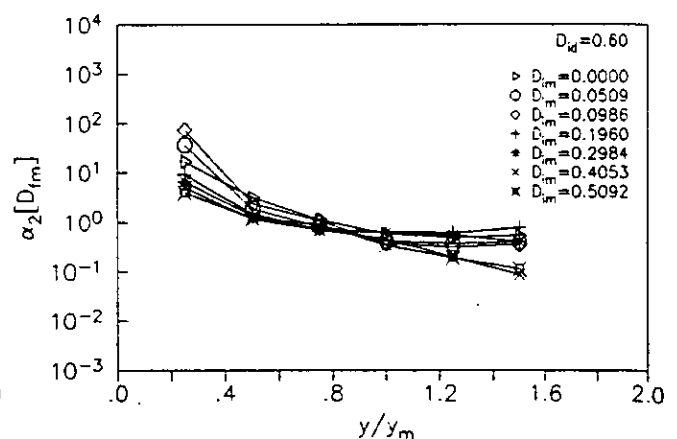
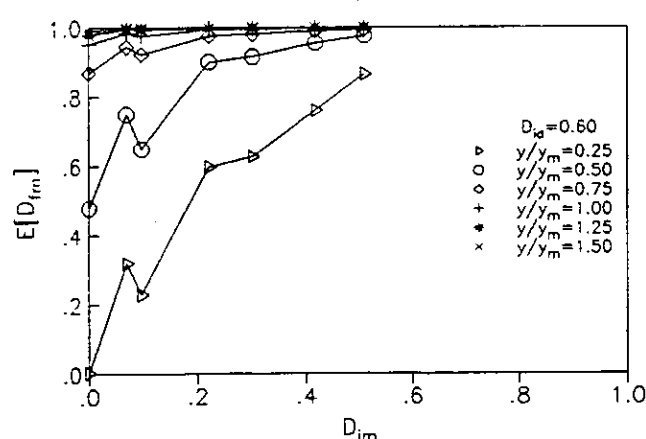
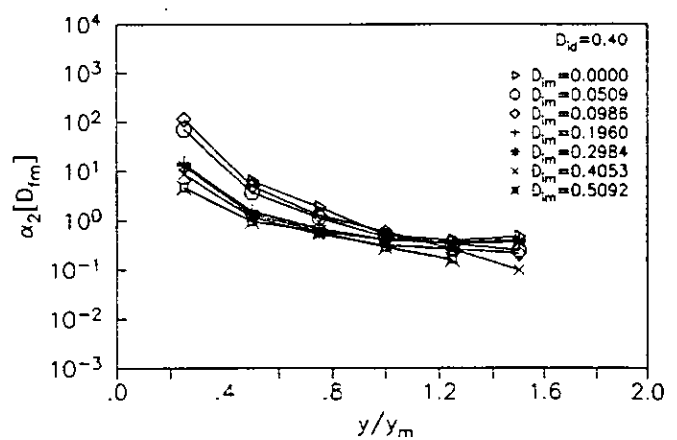
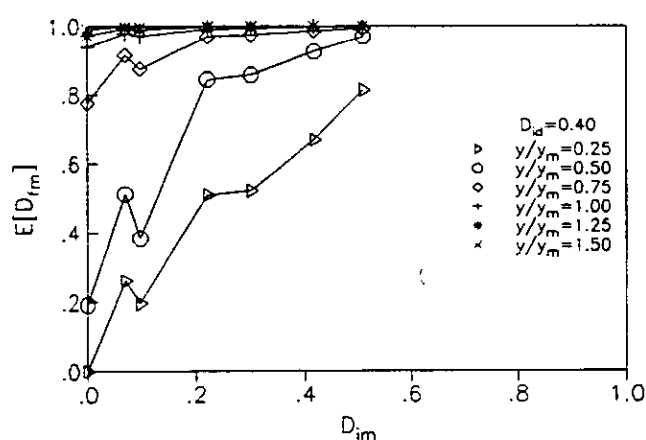
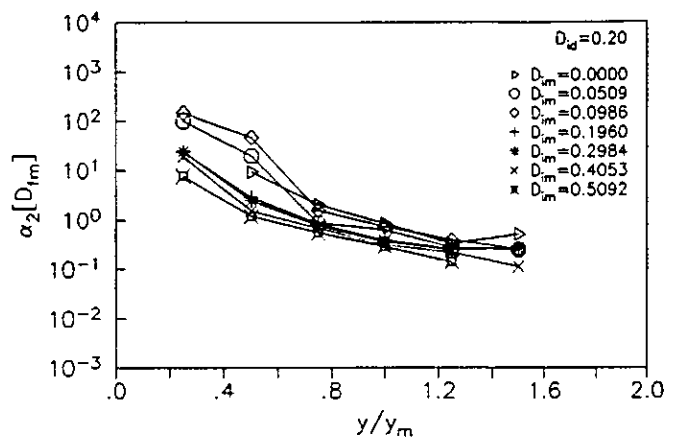
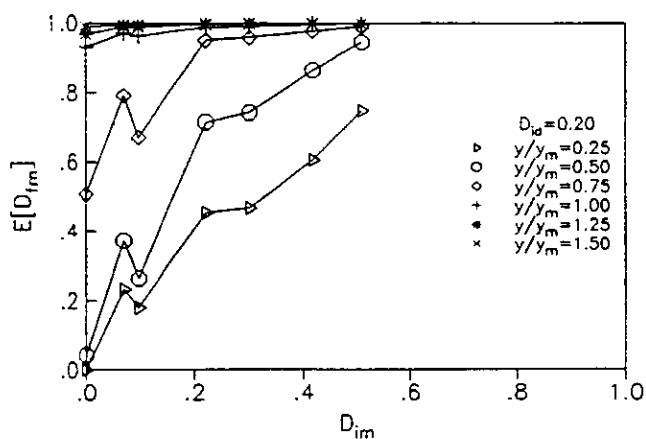
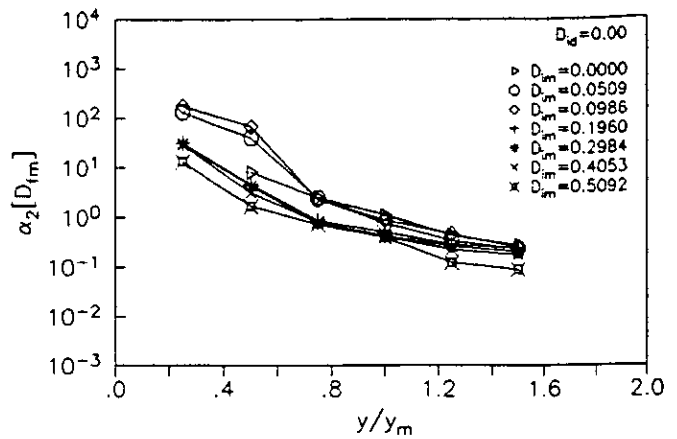
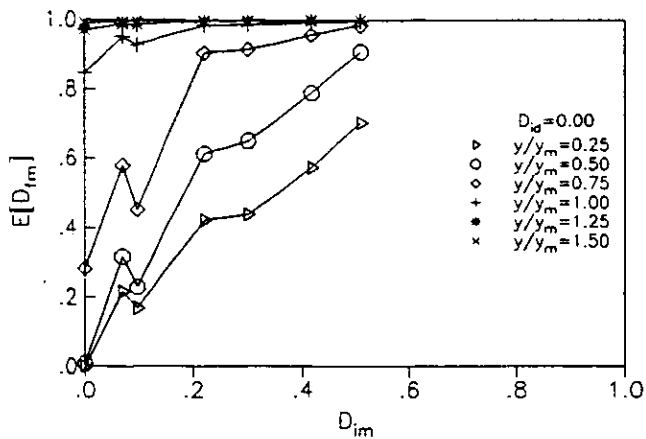


Fig. 6.51 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=1.5$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

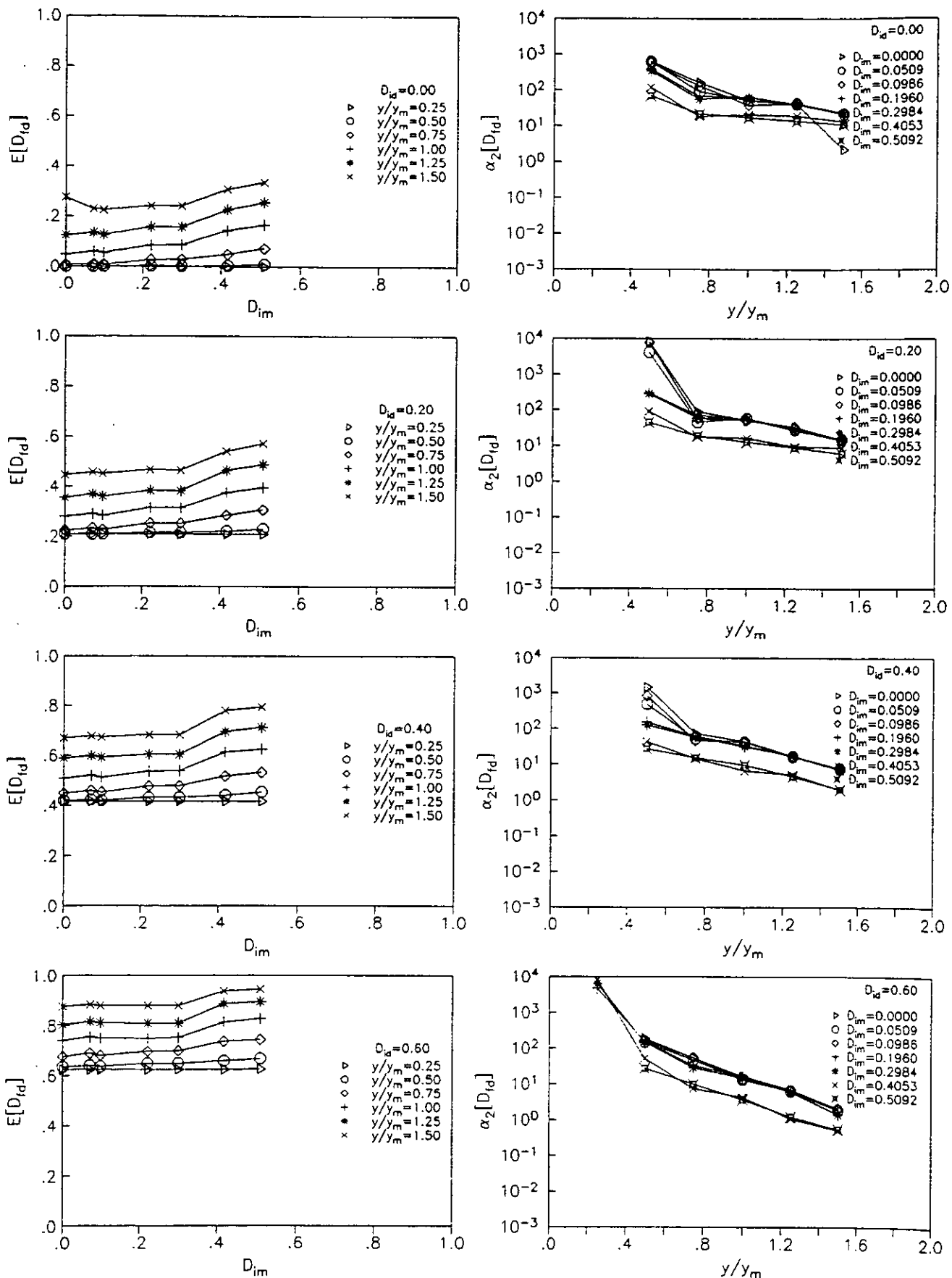


Fig. 6.52 Daño medio en dissipador de marco equivalente con $\eta_k=\tau_R=0.5$, $T=1.5$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

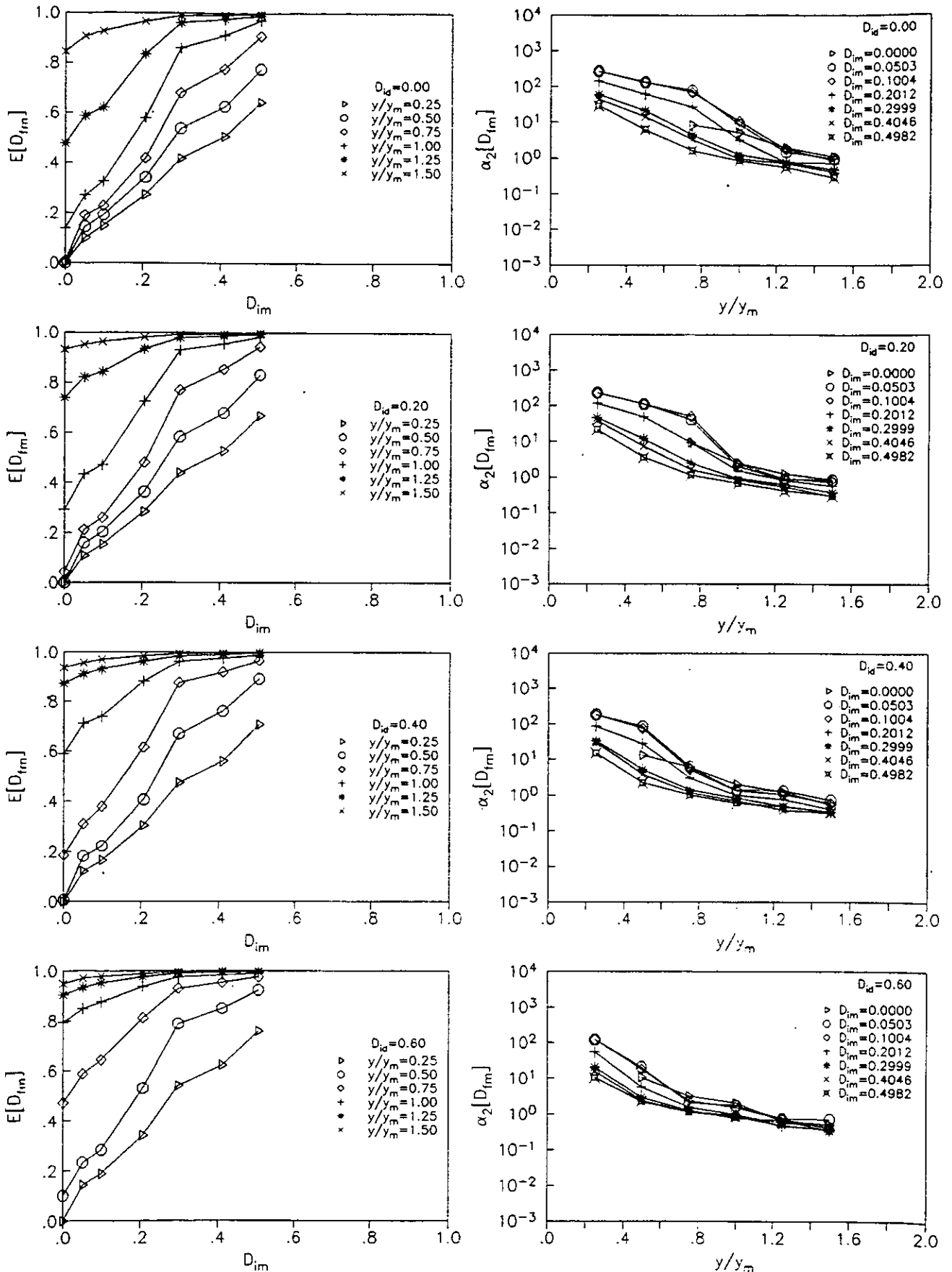


Fig. 6.53 Daño medio en marco equivalente con $\eta_k = \tau_R = 0.5$, $T = 1.5$ s, $c_s = 0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

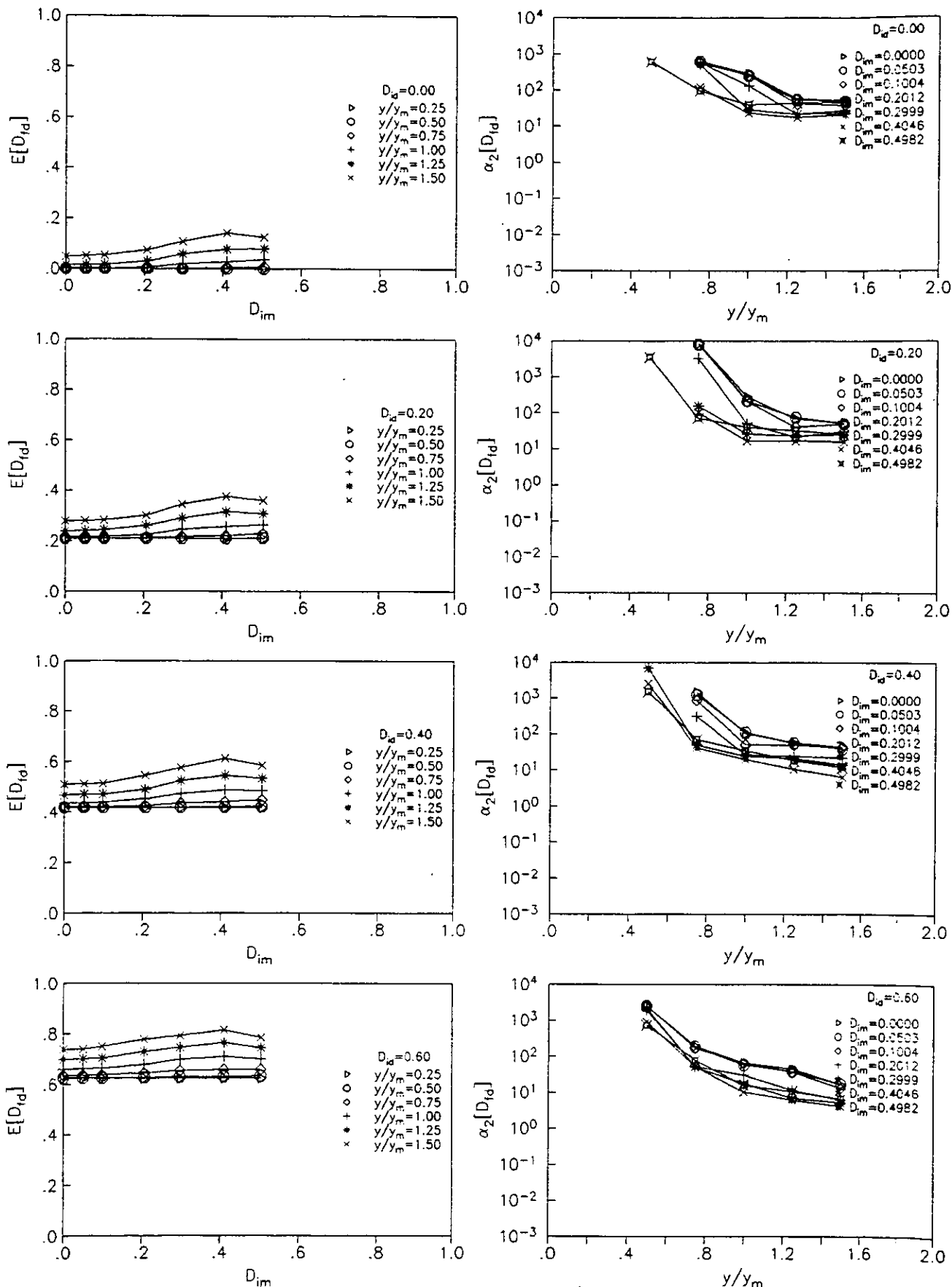


Fig. 6.54 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.5$, $T=1.5$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m).

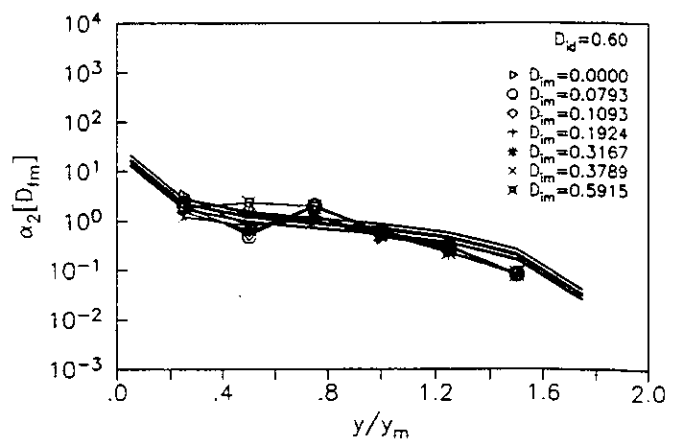
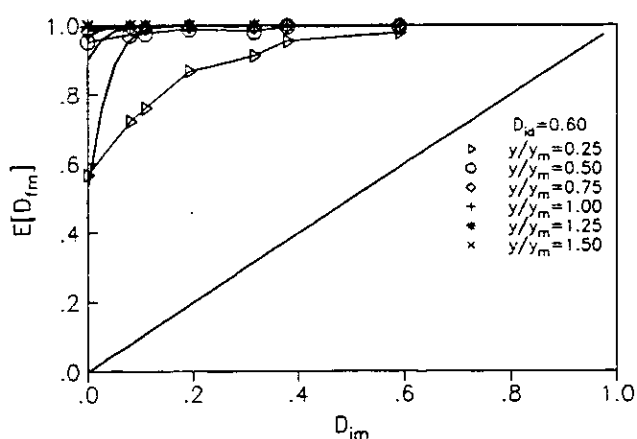
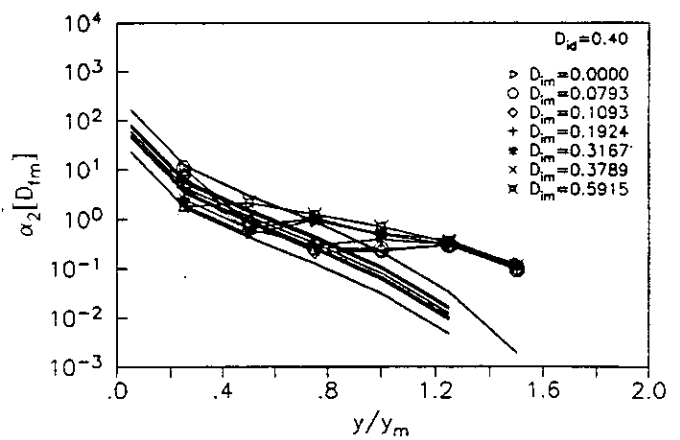
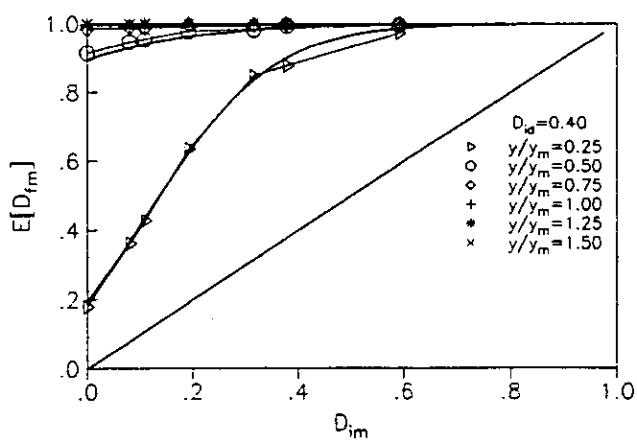
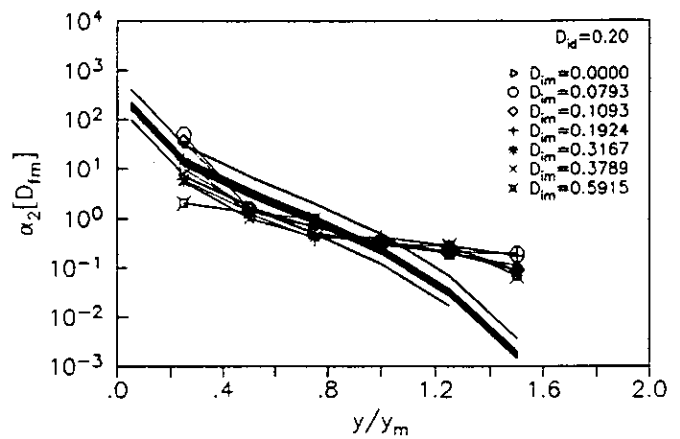
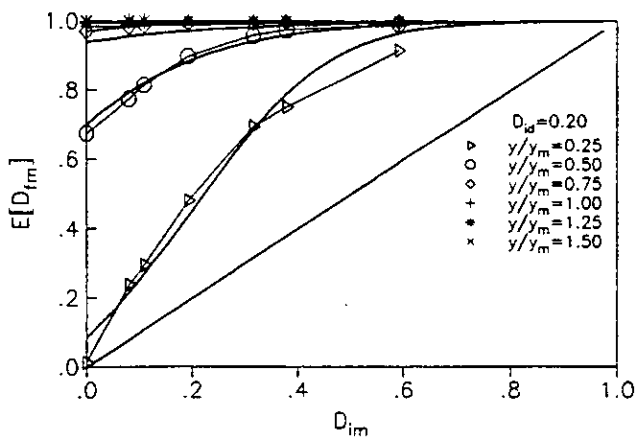
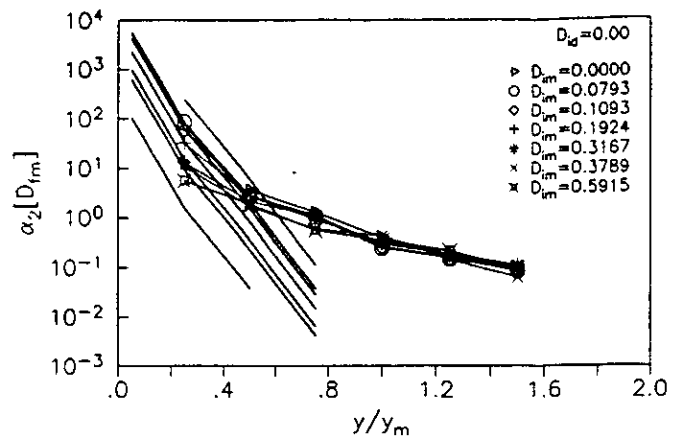
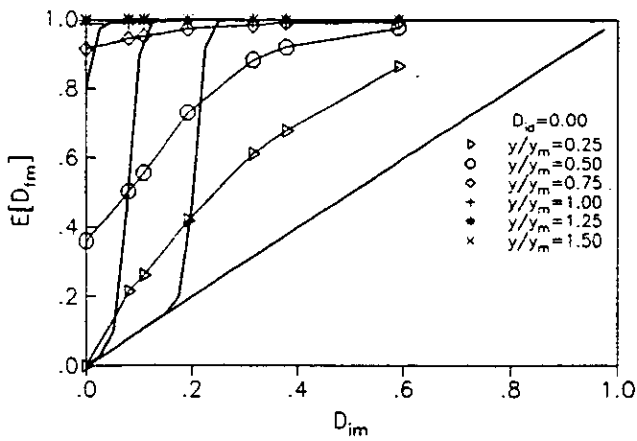


Fig. 6.55 Daño medio en marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.5$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

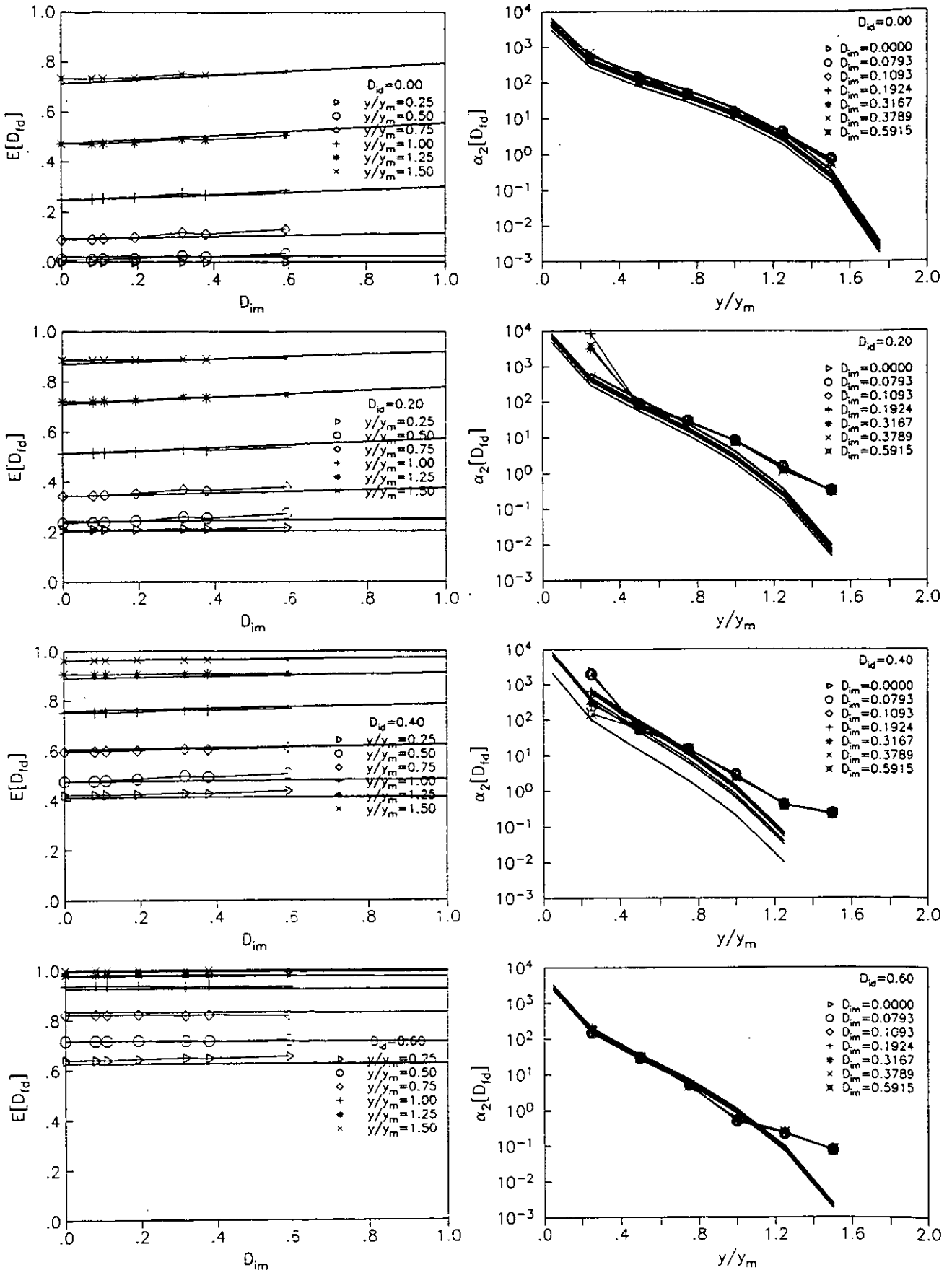


Fig. 6.56 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.5$ s, $c_s=0.2$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

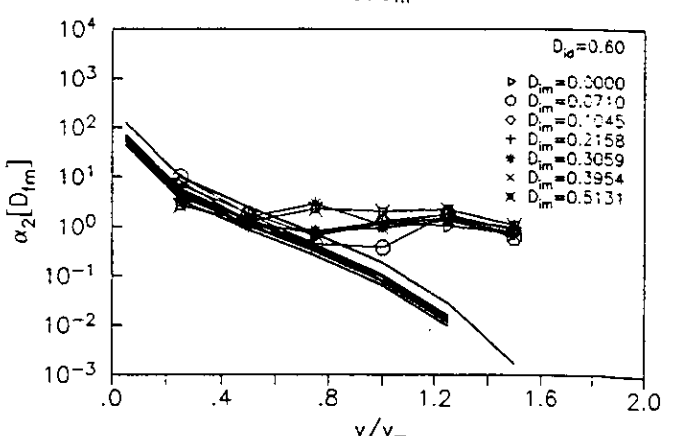
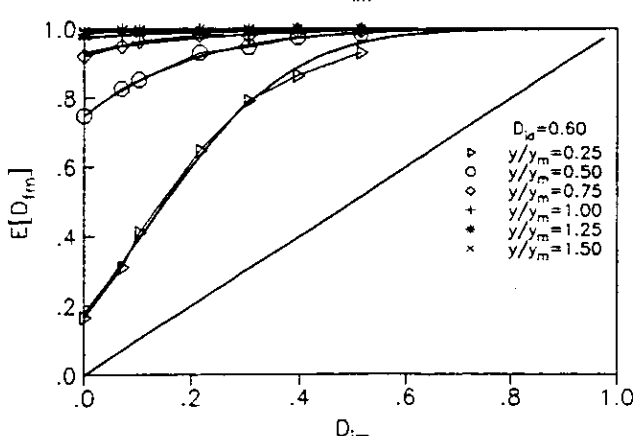
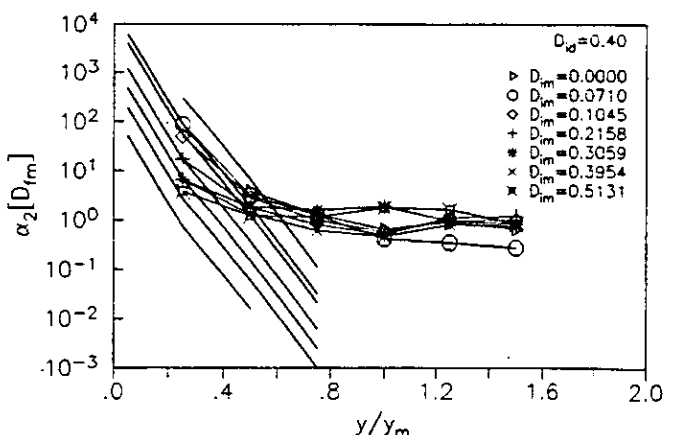
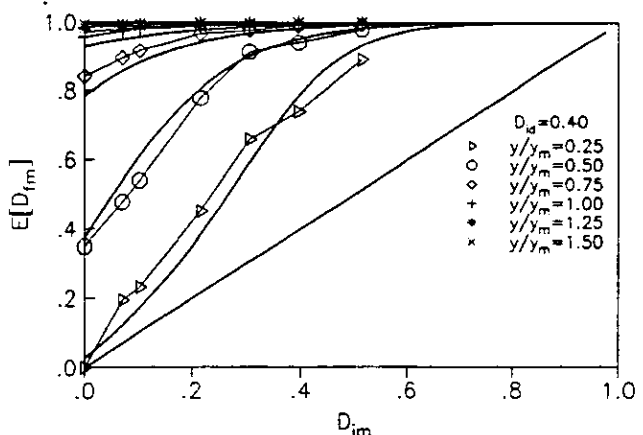
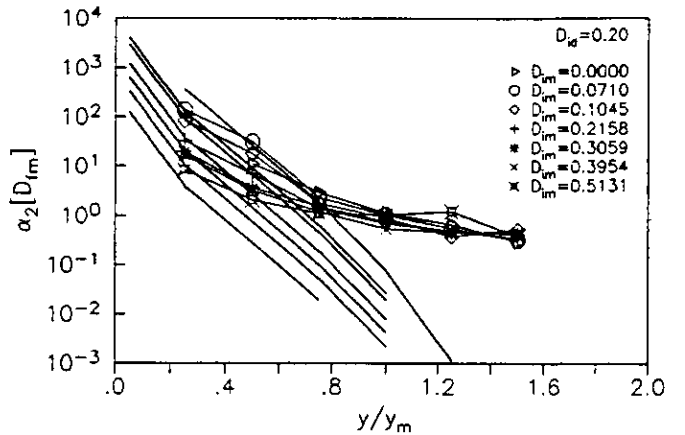
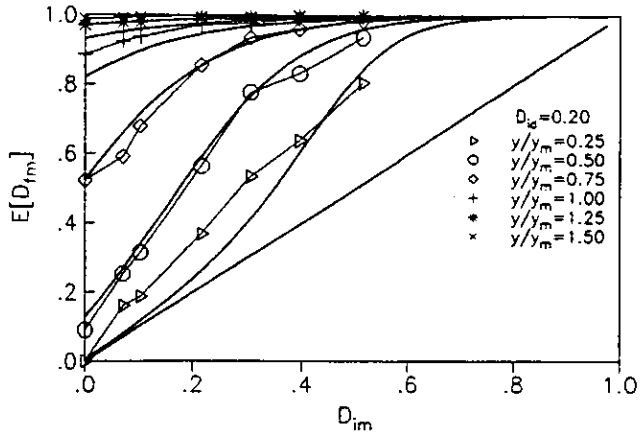
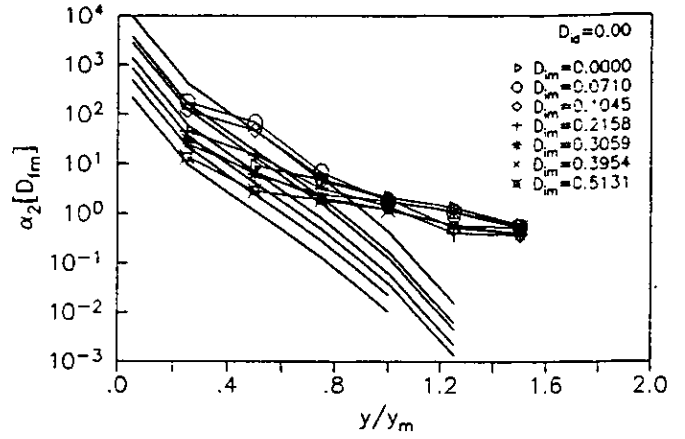
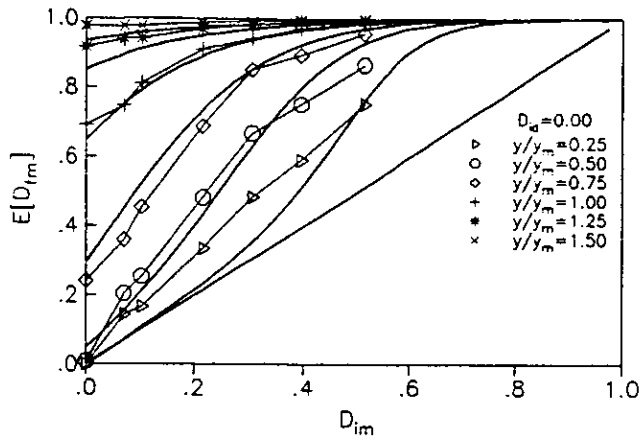


Fig. 6.57 Daño medio en marco equivalente con $\eta_k = \tau_R = 0.75$, $T = 1.5s$, $c_s = 0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

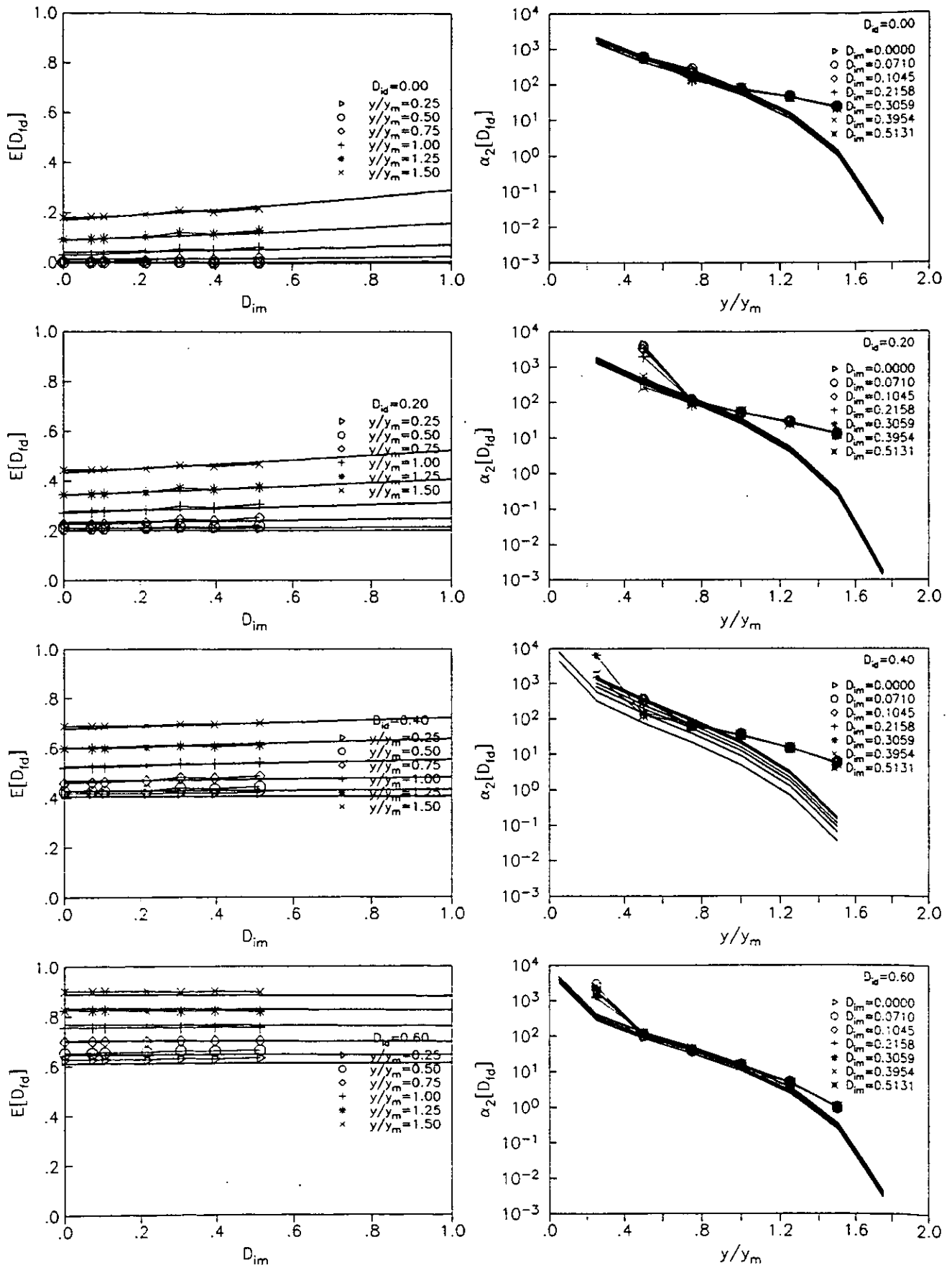


Fig. 6.58 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.5$ s, $c_s=0.4$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

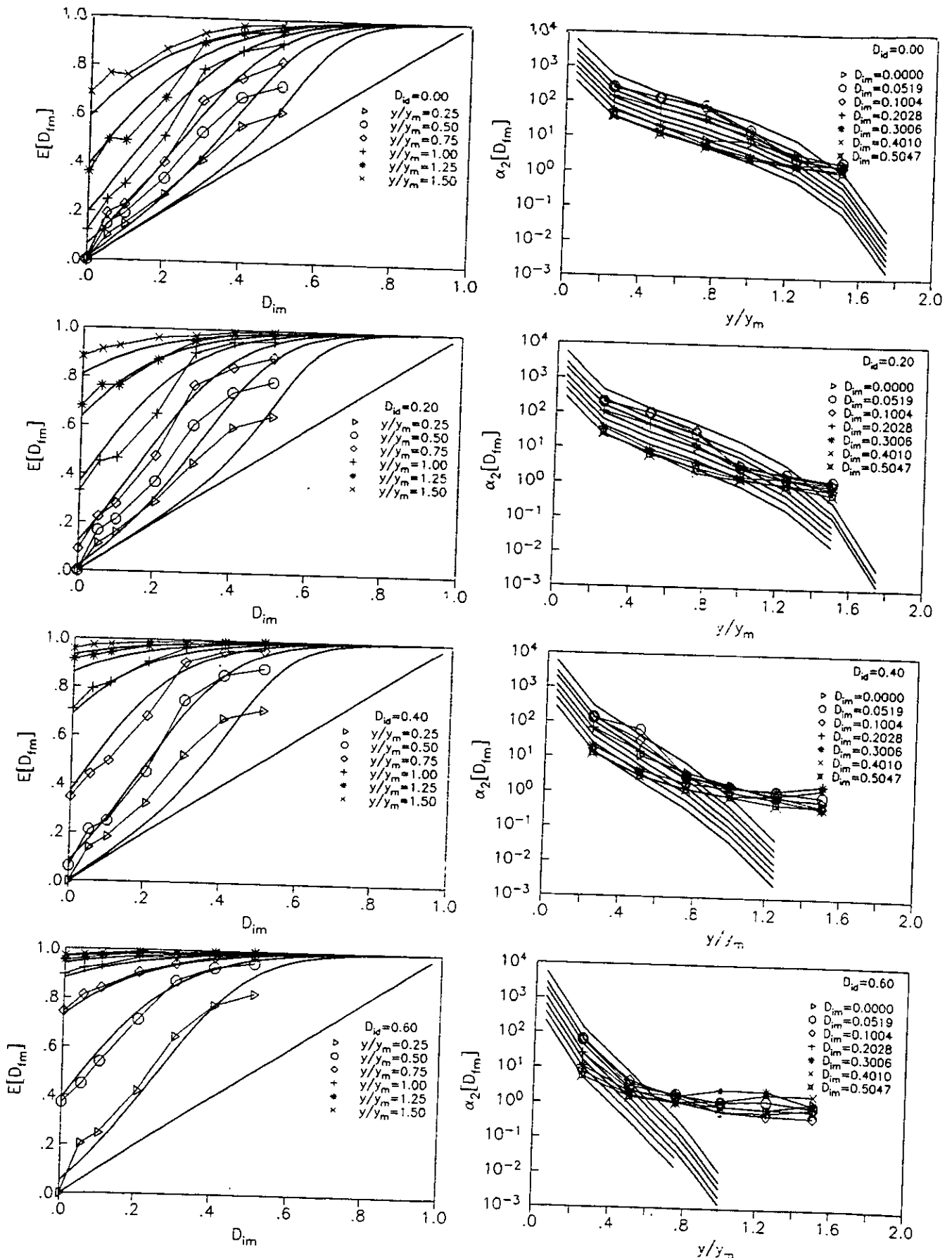


Fig. 6.59 Daño medio en marco equivalente con $\eta_k = \eta_R = 0.75$, $T = 1.5$ s, $c_s = 0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

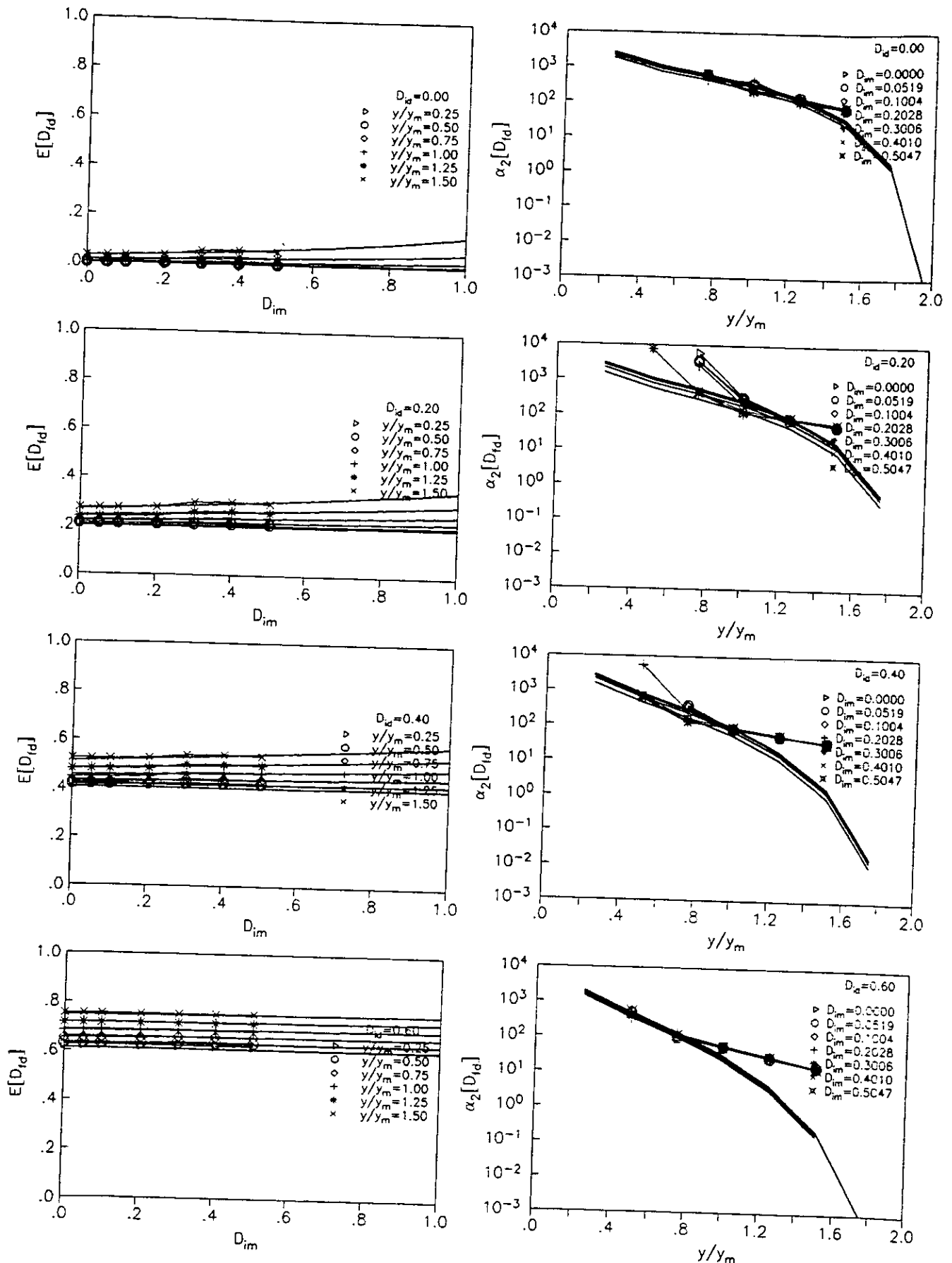


Fig. 6.60 Daño medio en disipador de marco equivalente con $r_k=r_R=0.75$, $T=1.5$ s, $c_s=0.6$ para diferentes intensidades normalizadas de los sismos (y/y_m) y sus curvas ajustadas.

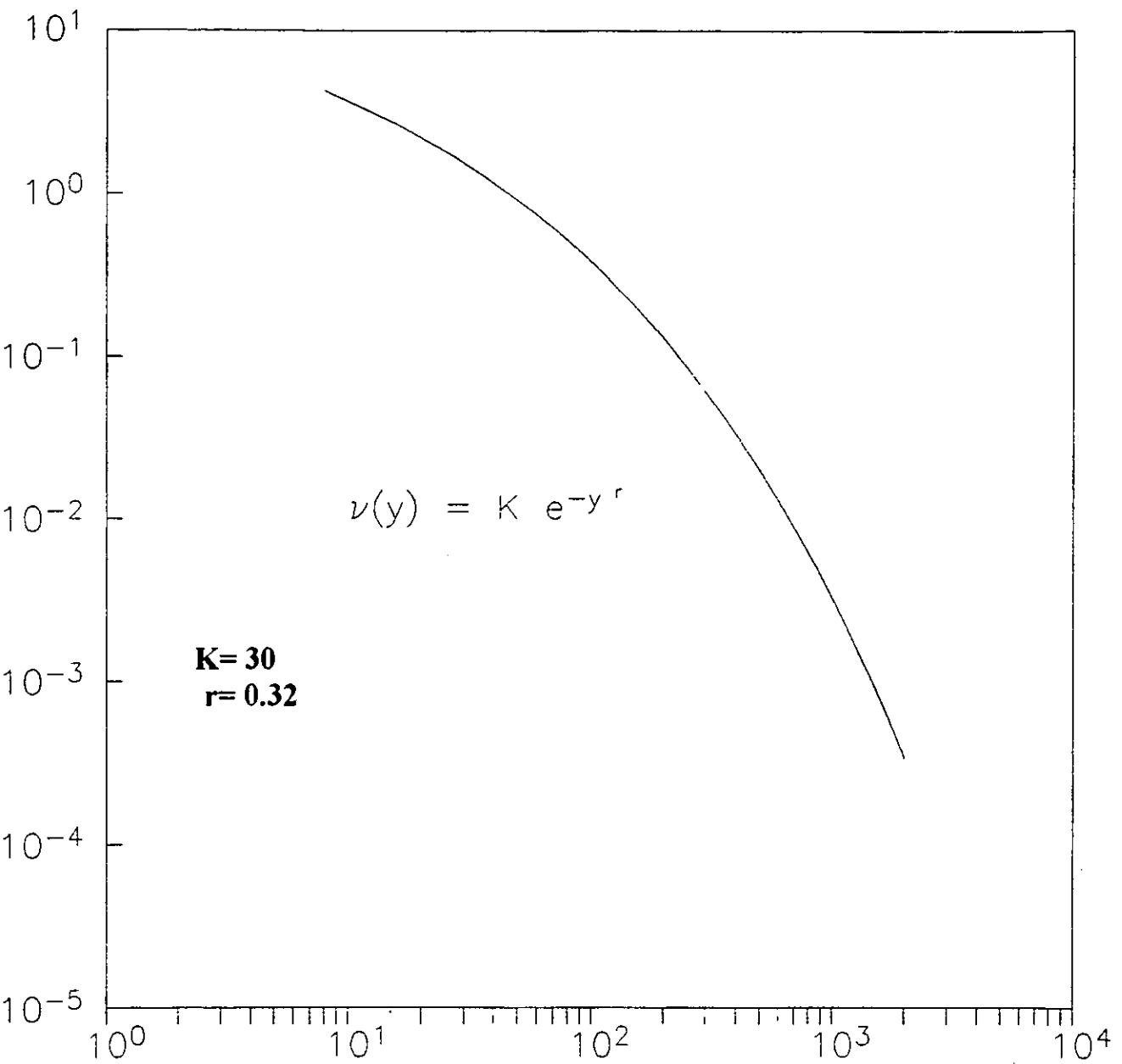


Fig. 7.1 Tasa de ocurrencias de intensidades

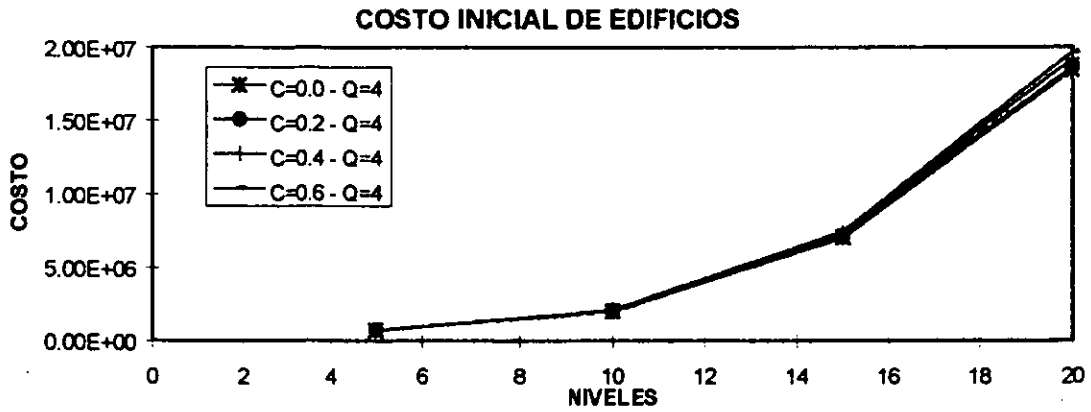


Fig. 7.2 Costos iniciales de edificios para diferentes coeficientes sísmicos de diseño

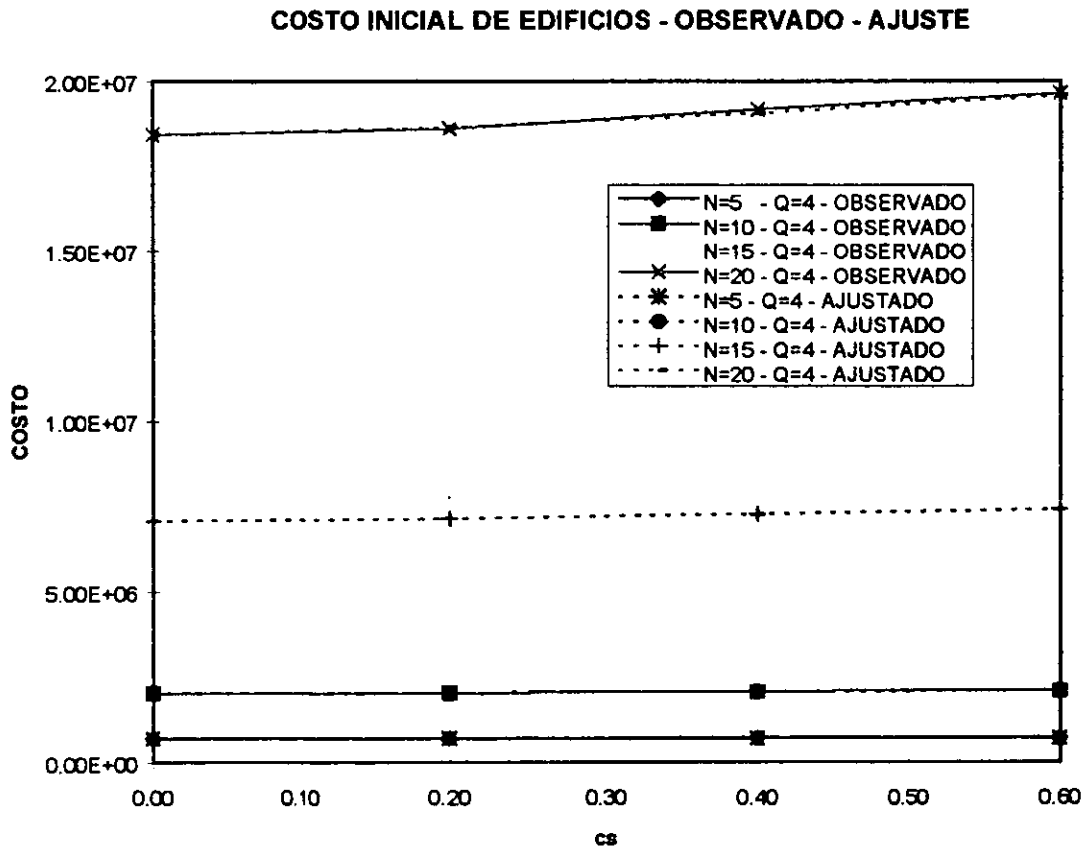


Fig. 7.3 Costos iniciales de edificios en función del coeficiente sísmico. Valores observados y curvas ajustada

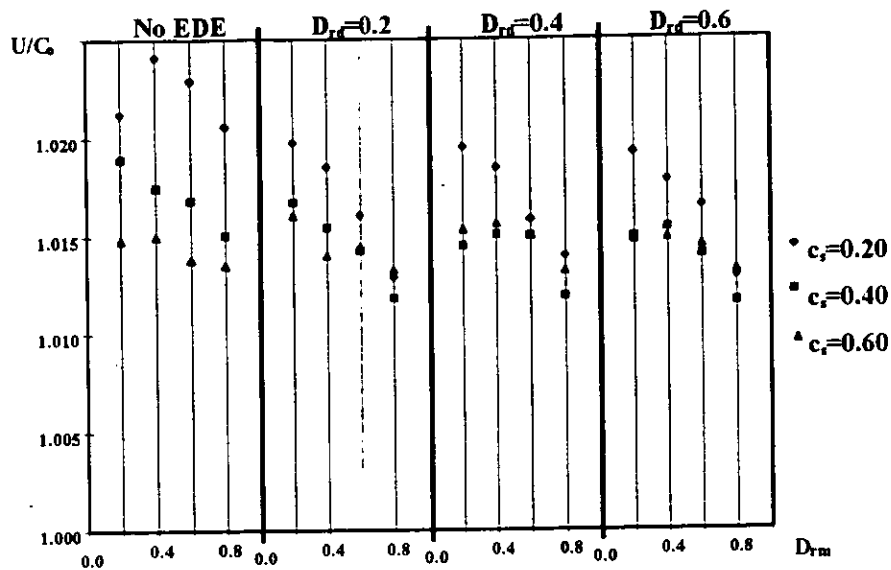


Fig. 7.4 Función de utilidad normalizada para el sistema de 5 niveles

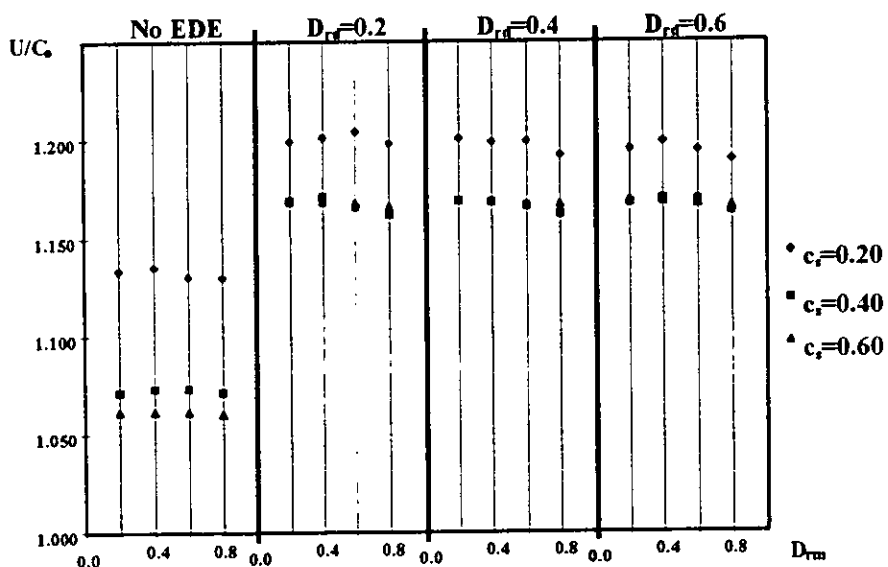


Fig. 7.5 Función de utilidad normalizada para el sistema de 10 niveles

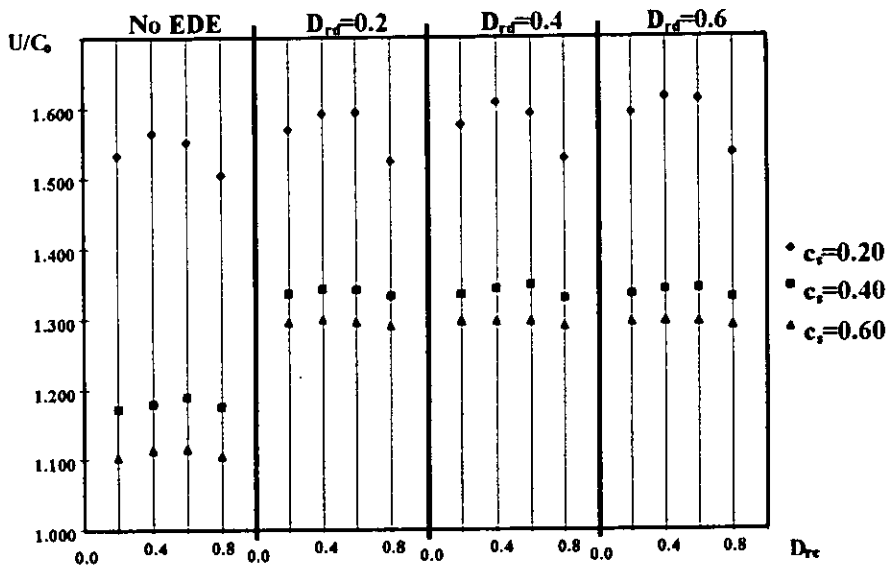


Fig. 7.6 Función de utilidad normalizada para el sistema de 15 niveles