

14 01149



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

"CARACTERISTICAS ENERGETICAS DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL CERCANA A LA INESTABILIDAD DINAMICA"

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERIA  
P R E S E N T A  
ING. IVAN FELIX GONZALEZ

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. EMILIO SORDO ZABAY

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D.F.

JUNIO, 2002





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.

## ***Agradecimientos***

*Agradezco la colaboración de todos aquellos que con sus comentarios y sugerencias me apoyaron en la realización de la tesis.*

*En particular, al Dr. Emilio Sordo Zabay quien fue mi director de Tesis.*

*Así mismo, a mis sinodales Dr. Amador Terán Gilmore; Dr. Gustavo Ayala Milian; Dra. Sonia Ruiz Gómez y M.enI. Octavio García quienes, gracias a su experiencia en investigación y docencia, permitieron mejorar y puntualizar este trabajo.*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# “Características Energéticas de la Respuesta Estructural Cercana a la Inestabilidad Dinámica”

## Índice

	Pagina
<b>- Capítulo 1</b>	
<b>Introducción</b>	1-1
1.1. <i>Sistemas de Un Grado de Libertad</i>	1-1
1.1.1. <i>Caracterización del SUGL</i>	1-2
1.2. <i>Sistemas Planos de Varios Grados de Libertad</i>	1-3
1.3. <i>Estructuras Tridimensionales</i>	1-5
1.4. <i>Ecuación de la Energía</i>	1-7
1.5. <i>Alcances del Trabajo</i>	1-8
1.5.1 <i>Limitaciones en el Estudio</i>	1-10
1.5.2 <i>Influencia del Endurecimiento por Deformación</i>	1-11
<b>- Capítulo 2</b>	
<b>Predictibilidad de la Demanda Energética Relativa Máxima en Marcos Planos cercanos al Colapso</b>	2-1
2.1. <i>Metodología</i>	2-1
2.1.1 <i>Sismos utilizados en el Estudio</i>	2-2
2.1.1.1 <i>Acelerogramas Generados</i>	2-2
2.1.1.2 <i>Registros Acelerográficos</i>	2-4
2.1.2. <i>Modelo de Referencia</i>	2-4
2.1.3. <i>Modelos de Mecanismo Predeterminado</i>	2-5
2.1.4. <i>Procedimiento</i>	2-6
2.2. <i>Resultados</i>	2-6
2.2.1. <i>Relación entre Energía Máxima en Respuesta Cercana al Colapso y Energía Máxima en Respuesta Estable lejana al Colapso</i>	2-6
2.2.2. <i>Influencia del Mecanismo en la disipación Energética</i>	2-9
2.2.3. <i>Relación entre Energía Absorbida y Total</i>	2-10
2.3. <i>Conclusiones</i>	2-12
<b>- Capítulo 3</b>	
<b>Efecto de la Orientación en la Disipación Energética de Estructuras Tridimensionales Cercanas al Colapso Dinámico</b>	3-1
3.1. <i>Metodología</i>	3-3
3.1.1. <i>Sismos utilizados en el Estudio</i>	3-3
3.1.2. <i>Modelo de Referencia</i>	3-4
3.1.3. <i>Modelos de Mecanismos Predeterminado</i>	3-5
3.2. <i>Resultados</i>	3-7
3.2.1. <i>Capacidad de Predicción de los Modelos de Mecanismos Predeterminados</i>	3-9

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3.2.2. <i>Características de Disipación de Energía Cerca de la Condición de Inestabilidad Dinámica</i>	3-11
3.3. <i>Conclusiones</i>	3-15
<b>- Capítulo 4</b>	
<b>Conclusiones Generales y Recomendaciones</b>	4-1
<b>- Referencias Bibliográficas</b>	R-1
<b>- Apéndice</b>	
<i>Indice de Tablas</i>	A-1
<i>Indice de Figuras</i>	A-2
<b>- Anexo A</b>	
<i>Resultados de Análisis</i>	AA-1

## **Resumen**

En este trabajo se valora la posibilidad de estimar las características energéticas de la respuesta cercana al colapso por inestabilidad a través de las energías obtenidas de la respuesta lejana a dicha condición, ya sea elástica o inelástica. Para ello, se realizó en un primer estudio una comparación entre las demandas de energía máxima absorbida y de energía relativa máxima total para diferentes valores del coeficiente basal de un marco plano de 5 niveles. Se sometió a la acción de sismos con características dinámicas diferentes y para distintos mecanismos predominantes de respuesta, los cuales se obtuvieron a partir de incrementar la resistencia de ciertos elementos, de tal forma que los elementos que se plastifiquen fueran solo los que contribuyan a la formación del mecanismo específico. Además, se compararon la energía máxima absorbida y la energía relativa máxima total desarrolladas para coeficientes basales asociados a la respuesta cercana a la Inestabilidad Dinámica con la energía máxima absorbida y la energía relativa máxima total, respectivamente, desarrolladas para coeficientes basales mayores a dicha condición.

En un segundo estudio, se analizaron las características de disipación de energía cerca del colapso de una estructura tridimensional de cinco niveles cuando es sometida a la acción de dos movimientos bidireccionales del terreno de diferentes características, y aplicados a diferentes ángulos de incidencia. A partir de un diseño estándar de referencia, se definieron varios modelos para los cuales se incrementó la resistencia de algunos elementos, de tal forma que se generen mecanismos específicos durante la respuesta. Es decir, que los elementos que no intervienen en la formación del mecanismo no puedan plastificarse. Todos los sistemas se sometieron a la acción de dos movimientos bidireccionales del terreno actuando a diferentes ángulos de incidencia, se obtuvieron los valores mínimos requeridos del coeficiente basal para prevenir la Inestabilidad Dinámica de la estructura (Coeficiente de Colapso Dinámico,  $C_C$ ) asociados a un mecanismo de colapso. Finalmente se ilustra y discute el efecto del ángulo de incidencia, del mecanismo de colapso y de las características del movimiento del terreno en la disipación de energía relativa de tres modelos de distintos mecanismos predeterminados (traslacional, rotacional, y combinado).

**Capítulo 1**  
***Introducción***

El efecto desestabilizante de las cargas gravitacionales en edificios sujetos a movimientos severos del terreno puede llevar a la estructura al colapso (*Inestabilidad Dinámica*), cuando ocurren incursiones inelásticas importantes durante la respuesta. Aunque prevenir el colapso es uno de los objetivos principales del diseño sísmico, existe todavía incertidumbre en los procedimientos actuales para proporcionar un margen de seguridad adecuado contra la Inestabilidad Dinámica. Así, estudios realizados sobre la Inestabilidad Dinámica de estructuras de varios niveles han señalado el papel crítico que el tipo de mecanismo de colapso juega en la seguridad de la estructura contra el colapso [Nakajima *et al* 1990, Bernal 1992], así mismo, reportan que los diseños sísmicos no permiten en todos los casos alcanzar un factor de seguridad adecuado contra la inestabilidad; dado que este factor de seguridad depende fundamentalmente de la sobrerresistencia global y del tipo de mecanismo de falla.

### ***1.1. Sistemas de un grado de libertad***

Los estudios existentes acerca del problema de la Inestabilidad Dinámica en Sistemas de Un Grado de Libertad (SUGL) suelen señalar que el efecto de las fuerzas verticales en su respuesta inelástica es pequeño, excepto en los casos en que su resistencia es cercana a la asociada al colapso total de la estructura (Husid 1967, Jennings y Husid 1968, Sun *et al* 1973, Takizawa y Jennings 1980).

En la figura 1.1 se ilustra el comportamiento de un sistema de un grado de libertad al ser sometido a la acción de un movimiento del terreno. Se presentan los valores máximos de desplazamiento para diferentes valores del Coeficiente de Diseño del SUGL, considerando o no el efecto de las cargas verticales (gravitacionales). Se puede identificar que, al disminuir el valor del coeficiente de diseño, los desplazamientos máximos van variando y, al tomar en cuenta el efecto de la carga vertical, existe un valor para el cual el desplazamiento máximo crece abruptamente al disminuir ligeramente el coeficiente de diseño. A este valor asintótico del coeficiente de diseño se le denomina, en este trabajo, Coeficiente de Colapso ( $C_C$ ).

El factor de seguridad de la estructura contra la Inestabilidad Dinámica está definido por el cociente entre el Coeficiente empleado en el Diseño y el Coeficiente de Colapso.

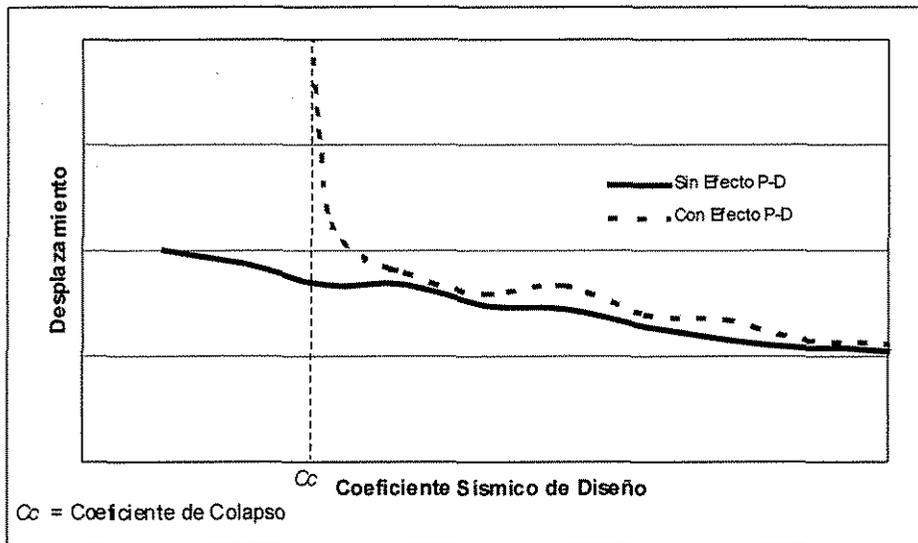


Figura 1.1. Ilustración del problema de la Inestabilidad Dinámica.

1.1.1. Caracterización del SUGL

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Consideremos un sistema de un grado de libertad elastoplástico, como el mostrado en la figura 1.2a, de masa  $m$ , sujeto a la acción de una carga vertical  $P$  y de una carga lateral  $V$ , cuya relación constitutiva se ilustra en la figura 1.2b.

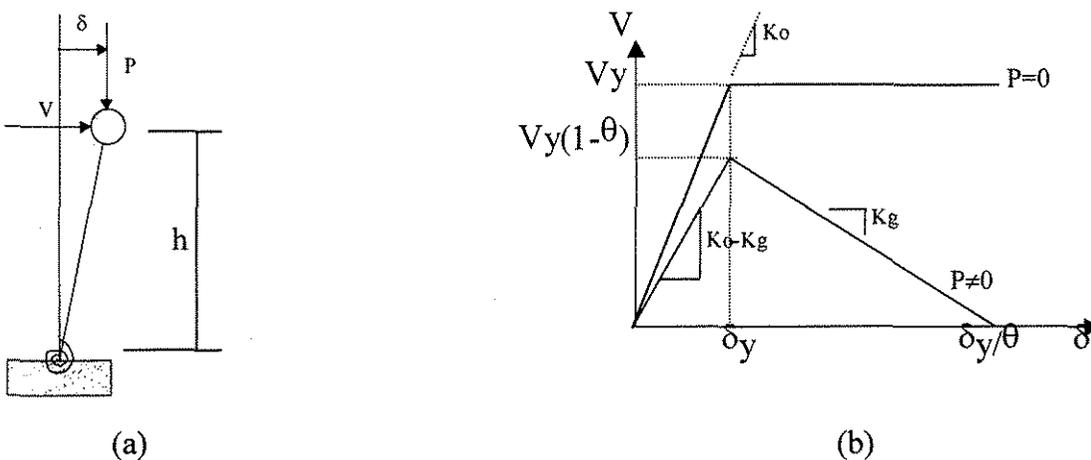
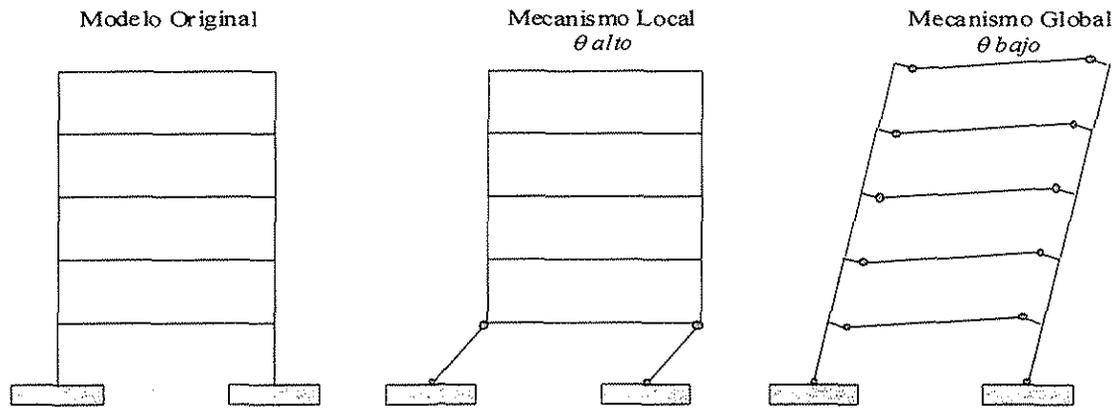


Figura 1.2. Caracterización de un Sistema de Un Grado de Libertad (SUGL).

Definiremos el Coeficiente de Estabilidad  $\theta$ , como la Rigidez Geométrica debida a la carga vertical (Kg) normalizada por la Rigidez Elástica sin efectos gravitacionales ( $K_0$ ). Este coeficiente, básicamente, depende de la magnitud de la carga vertical, de las características geométricas y de las propiedades elásticas del sistema; y es determinante, junto con el periodo de vibración del sistema y su amortiguamiento, en el valor del coeficiente de colapso asociado (Bernal, 1992).

### ***1.2. Sistemas Planos de Varios Grados de Libertad***

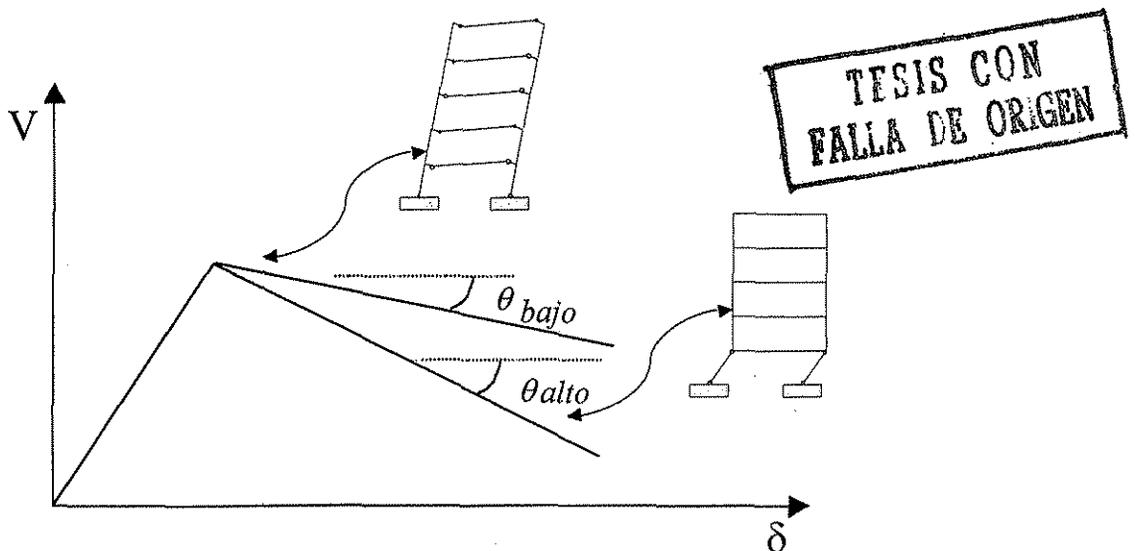
Una de las conclusiones más relevantes de los estudios de Inestabilidad Dinámica en sistemas planos de Varios Grados de Libertad, es el papel crítico del mecanismo de falla en la seguridad de la estructura contra el colapso (Nakajima *et al* 1990, Bernal 1990, 1992). En el caso de marcos planos sujetos a movimientos severos del terreno, existe la posibilidad de desarrollar diferentes mecanismos de colapso, los cuales se asocian a coeficientes de estabilidad  $\theta$  distintos, debido a que éstos dependen de la geometría del mecanismo que se forme. Para entender mejor este concepto, consideremos el marco plano de la figura 1.3a, el cual puede desarrollar diferentes mecanismos durante la respuesta, como los mostrados en la figura 1.3b y 1.3c, los cuales corresponden a un mecanismo local y uno global, respectivamente. En la figura 1.4 se compara la influencia del mecanismo en el coeficiente de estabilidad, a través de las curvas cortante en la base vs. desplazamiento de azotea obtenidas a través de un análisis de empujón (pushover) estándar.



**Figura 1.3a** Modelo de Marco Plano de 5 Niveles

**Figura 1.3b** Mecanismo de Planta Baja (Local)

**Figura 1.3c** Mecanismo de Vigas y Columnas (Global)

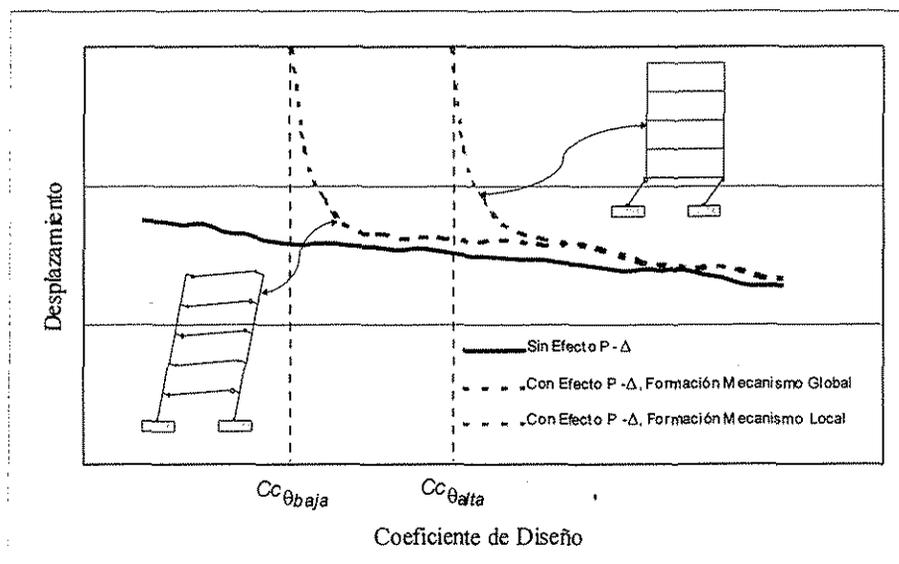


**Figura 1.4.** Comportamiento del marco plano en función del tipo de mecanismo desarrollado, considerando el efecto de las cargas verticales.

Se puede señalar que, en términos generales, mecanismos locales se asocian a coeficientes de estabilidad mayores que los globales, y que, a menor distancia de la base a el nivel del mecanismo local, mayor es el coeficiente de colapso (Bernal, 1990).

En la figura 1.5 se muestran esquemáticamente los coeficientes de colapso asociados a los dos mecanismos indicados, que ilustran que, para coeficientes de diseño similares,

mecanismos locales llevan a factores de seguridad contra colapso dinámico mucho menores que mecanismos globales.



**Figura 1.5.** Efecto P- $\delta$  y del mecanismo desarrollado durante la respuesta

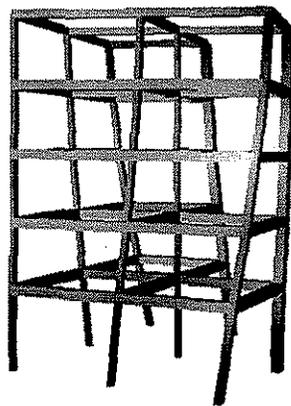
### 1.3. Estructuras Tridimensionales

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

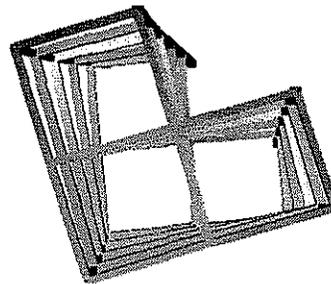
La geometría tridimensional de la mayoría de las estructuras reales introduce la posibilidad de desarrollar mecanismos de falla rotacionales, o combinación de mecanismos rotacionales y en elevación (fig. 1.6). De aquí la necesidad de que, para proporcionar un factor de seguridad adecuado contra la Inestabilidad Dinámica, se tomen en cuenta las características estructurales tridimensionales. A pesar del alto potencial de falla debido a la inestabilidad rotacional, existen relativamente pocos estudios al respecto. Una de las primeras investigaciones fue realizada por Shibata *et al* (1969), quien analizó sistemas simples de un nivel, bajo la acción de pulsos senoidales de aceleración. Sus resultados indican la gran influencia que la respuesta rotacional inelástica tiene en la reducción del factor de seguridad de estos sistemas contra la inestabilidad. También resalta la importancia de considerar simultáneamente las dos componentes del movimiento del terreno para estimar adecuadamente la Inestabilidad Dinámica, concluyendo además que el coeficiente

de colapso es influenciado por la distribución particular de resistencia entre los distintos elementos.

Rutenberg (1992) indicó la importancia de la resistencia rotacional en la sensibilidad de estructuras tridimensionales a colapsar en un modo de falla rotacional y, en un estudio similar realizado por Morino y Uchida (1980), se resaltó la importancia de considerar la multidireccionalidad del movimiento del terreno en los análisis de Inestabilidad Dinámica.



Mecanismo Rotacional  
Visto en Elevación



Mecanismo Rotacional  
Visto en Planta

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Figura 1.6.** Mecanismo rotacional en una estructura tridimensional.

Así, en un intento para identificar los parámetros fundamentales que afectan la interacción entre la respuesta torsional y la inestabilidad, Sordo y Bernal (1992) estudiaron estructuras de un nivel sujetas a un movimiento del terreno unidireccional sobre la base de reducciones a Sistemas de Un Grado de Libertad Equivalentes (SUGLE). Sus resultados indican que las excentricidades torsionales elásticas aparentemente no tienen una influencia importante en el factor de seguridad contra la Inestabilidad Dinámica; señalan que los mecanismos de falla rotacional se inducen cuando las sobrerresistencias locales proporcionan incrementos en la resistencia traslacional sin afectar significativamente la resistencia rotacional. Nuevamente, se puede inferir de estas observaciones la importancia de la resistencia rotacional de los sistemas en la Inestabilidad Dinámica. Más recientemente, De Stefano y Rutenberg (1999), estudiaron estructuras asimétricas de un nivel, en este estudio

concluyeron que el efecto de la carga gravitacional se amplifica debido a la torsión, así mismo resaltan que la bidireccionalidad de los movimientos de terreno tiende a reducir el factor de seguridad contra la Inestabilidad Dinámica.

Los estudios de Inestabilidad Dinámica de estructuras tridimensionales de varios niveles son muy escasos. Un estudio exploratorio en este sentido fue realizado por Sordo y Bernal (1992) en un trabajo que concluye que la forma tridimensional del mecanismo de falla tiene un papel fundamental en la seguridad contra la Inestabilidad Dinámica. En un estudio más reciente realizado por los mismos autores (Sordo y Bernal, 1993), se analiza una estructura de 5 niveles sujeta al efecto de diferentes movimientos del terreno unidireccionales y bidireccionales, y se discute la influencia de la formación de diferentes mecanismos plásticos distintos al de colapso, que se pueden desarrollar durante la respuesta inelástica. Específicamente, se señala que el mecanismo final de falla no necesariamente coincide con el mecanismo plástico que se desarrolla predominantemente durante la respuesta inelástica, lo cual indica que no necesariamente el mecanismo de menor resistencia es el crítico para evaluar la seguridad contra el colapso dinámico.

#### ***1.4. Ecuación de la Energía***

Es importante mencionar que existen dos formas de la ecuación de la energía de entrada para un sistema, que se han derivado y empleado en la literatura (Uang y Bertero, 1988); la primera consiste en la energía de entrada absoluta, que físicamente representa el trabajo realizado por el cortante basal total en la cimentación sobre el desplazamiento de ésta, y puede ser escrita como:

$$E_i = E_k + E_\xi + E_a = E_k + E_\xi + E_s + E_h \quad (1)$$

donde:

$E_i$  = Energía de Entrada Absoluta

$E_k$  = Energía Cinética Absoluta

$E_\xi$  = Energía de Amortiguamiento

$E_a = E_s + E_h$  = Energía Absorbida

$E_s$  = Energía Elástica Recuperable

$E_h$  = Energía Histerética Irrecuperable

La segunda, considera la energía de entrada relativa que físicamente representa el trabajo realizado por la fuerza lateral estática equivalente en el sistema empotrado en la base y desprecia el efecto de traslación de cuerpo rígido de la estructura. En este trabajo, se estudia la energía relativa como un parámetro que puede representar la relación entre la acción sísmica y su efecto sobre el comportamiento estructural. Puede escribirse como:

$$E'_i = E'_k + E_\xi + E_a = E'_k + E_\xi + E_s + E_h \quad (2)$$

donde:

$E'_i$  = Energía Relativa de Entrada

$E'_k$  = Energía Cinética Relativa

$E_\xi$  = Energía de Amortiguamiento

$E_a = E_s + E_h$  = Energía Absorbida

$E_s$  = Energía Elástica Recuperable

$E_h$  = Energía Histerética Irrecuperable

Es conveniente mencionar en este punto que la energía relativa máxima absorbida estudiada en este trabajo, también considera la energía desarrollada por las cargas verticales.

### ***1.5. Alcances del Trabajo***

El desarrollo de metodologías racionales simplificadas para la predicción analítica de la Inestabilidad Dinámica de estructuras tridimensionales es una necesidad fundamental para valorar la seguridad estructural de edificios existentes. Uno de los problemas más desafiantes acerca de la estimación o predicción de la inestabilidad de sistemas estructurales de varios niveles es la viabilidad de representar el comportamiento complejo de estos sistemas de una manera simple y racional. En este sentido, algunos esfuerzos se han hecho desarrollando Sistemas de Un Grado de Libertad Equivalentes (SUGLE) para sistemas estructurales planos [Bernal 1992, 1998], mediante la aplicación de un patrón de cargas incremental sobre la estructura. Sin embargo, un enfoque atractivo para estructuras

tridimensionales consiste en definir un SUGLE con propiedades de disipación de energía equivalentes a aquellos de la estructura en estudio (Sordo y Bernal; 1994, 1996). Los primeros conceptos energéticos fueron introducidos primero por Housner [1956], y recientemente han sido estudiados exhaustivamente como una alternativa prometedora a los procedimientos de diseño tradicionales de resistencia-ductilidad [Uang y Bertero 1988, Bertero *et al* 1996, Terán, 1996, entre otros]. La ventaja de métodos de este tipo consiste en reducir el problema a la evaluación de dos escalares, es decir, la capacidad energética y la demanda de energía, siendo ésta una ventaja potencialmente relevante en aplicaciones a estructuras tridimensionales.

En este trabajo se valora la posibilidad de estimar las características energéticas de la respuesta cercana al colapso por inestabilidad a través de las energías obtenidas de la respuesta lejana a dicha condición, ya sea elástica o inelástica. Para ello, se realizó en primera instancia un estudio comparativo entre las demandas energéticas relativas para diferentes valores del coeficiente basal de un marco plano de 5 niveles, sometido a la acción de sismos con características dinámicas distintas y para diferentes mecanismos predominantes de respuesta. Los mecanismo predominantes se obtuvieron a partir de incrementar la resistencia de ciertos elementos, de tal forma que los elementos que se plastifiquen sean solo los que contribuyen a la formación del mecanismo específico, y se comparan la energía máxima absorbida y la energía relativa máxima total desarrolladas para coeficientes basales asociados a la respuesta cercana a la Inestabilidad Dinámica con la energía máxima absorbida y la energía relativa máxima total, respectivamente, desarrolladas para coeficientes basales mayores.

En la segunda parte de este trabajo, se analizaron las características de disipación de energía cercana al colapso de una estructura tridimensional de 5 niveles con forma de "L" en planta cuando es sometida a la acción de dos movimientos bidireccionales del terreno de distintas características, aplicados a diferentes ángulos de incidencia. A partir de un diseño estándar de referencia, se definieron varios modelos para los cuales se incrementa la resistencia de algunos elementos, localizados de tal forma que se generen mecanismos específicos durante la respuesta; es decir, que los elementos que no intervienen en la formación del mecanismo no puedan plastificarse. Todos los sistemas se sometieron a la

acción de dos movimientos bidireccionales del terreno actuando a diferentes ángulos de incidencia, y se obtuvieron los valores mínimos requeridos del coeficiente sísmico para prevenir la Inestabilidad Dinámica de la estructura (Coeficiente de Colapso Dinámico,  $C_C$ ) asociados a un mecanismo de colapso. Finalmente, se ilustra y discute el efecto del ángulo de incidencia, del mecanismo de colapso y de las características del movimiento del terreno en la disipación de energía relativa de tres modelos de diferentes mecanismos predeterminados (traslacional, rotacional, y combinado)

### ***1.5.1. Limitaciones en el Estudio.***

En este estudio, como en cualquiera, es necesario realizar algunas consideraciones para simplificar el problema, siendo las más relevantes relacionadas con la estructura:

- a) Los elementos resistentes tienen características histeréticas elasto-plásticas perfectas.
- b) No se toma en cuenta la interacción carga axial-momento, ni interacción biaxial en la definición de las superficies de fluencia.
- c) No se considera la interacción suelo - estructura.
- d) Se considera que las fuerzas verticales que actúan durante el movimiento del terreno son la carga muerta más la carga viva. En los análisis dinámicos no se consideran variaciones en las fuerzas verticales durante la respuesta en los análisis dinámicos.
- e) Los efectos de segundo orden provocados por las fuerzas verticales son considerados a través de la matriz de rigidez geométrica.
- f) Las fuerzas verticales se transmiten uniformemente a través de los niveles hasta la cimentación.

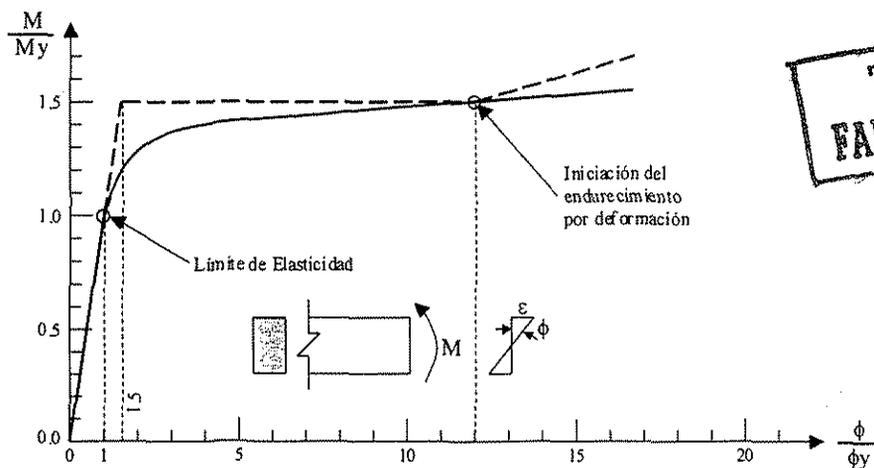
Las relativas a los movimientos del terreno son:

- a) Sólo se utilizan las componentes horizontales de la excitación del terreno. Las componentes verticales del movimiento del terreno no se consideran, dado que algunos estudios previos han señalado que esta componente tiene un efecto pequeño en el cálculo de la inestabilidad (Jennings y Husid 1968, Takizawa y Jennings 1980, Bernal 1990).

- b) Las componentes rotacionales del movimiento del terreno tampoco se emplean en este estudio, debido a la complejidad para considerarlas adecuadamente.

### 1.5.2. Influencia del Endurecimiento por Deformación

Algunos estudios teóricos, basados en la obtención por integración numérica de la configuración deformada de las vigas, han demostrado que si se parte de la suposición de que el material tiene un comportamiento momento curvatura elasto-plástico, sin endurecimiento por deformación, no puede alcanzar la carga última predicha por la teoría plástica, debido que al limitar los momentos máximos a  $M_p$  se reduce seriamente la longitud de las articulaciones plásticas, haciéndolas incapaces de admitir las grandes deformaciones correspondientes a las rotaciones necesarias para la formación del mecanismo de colapso sin que falle prematuramente por fractura de las fibras en tensión. Cuando se considera el endurecimiento por deformación del material, permite que los esfuerzos máximos sobrepasen a  $M_p$  y que se amplíen las zonas que fluyen plásticamente, proporcionando así la longitud suficiente para que se presenten las discontinuidades angulares correspondientes a las articulaciones plásticas, mientras que las deformaciones unitarias se mantienen dentro de magnitudes aceptables.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.7. Gráfica Momento - Curvatura de una sección rectangular sin esfuerzos residuales.

En la figura 1.7 se muestra en línea gruesa el comportamiento real de la sección, mientras que la línea punteada representa el comportamiento idealizado para análisis. El endurecimiento por deformación no sólo constituye un margen de seguridad adicional en estructuras diseñadas de acuerdo con la teoría plástica, al hacer que su capacidad de carga sea mayor que la predicha, sino que es un requisito indispensable para que un material pueda utilizarse en estructuras diseñadas por ese procedimiento, ya que al ocasionar una ampliación de las zonas plastificadas permite que se presenten en las articulaciones plásticas las rotaciones necesarias para la formación del mecanismo de colapso. Si el material es elasto-plástico, sin endurecimiento por deformación, el mecanismo no puede formarse; en cambio, si la zona horizontal de la curva esfuerzo-deformación es seguida por una de endurecimiento que tenga características adecuadas, como sucede en los aceros estructurales, las predicciones de la teoría plástica constituyen estimaciones correctas del comportamiento real de las estructuras. Además, el endurecimiento por deformación proporciona un factor de seguridad adicional de las estructuras contra el colapso.

**Capítulo 2**  
***Predictibilidad de la Demanda Energética Relativa***  
***Máxima en Marcos Planos cercanos al Colapso***

En este capítulo se realizó una comparación entre las demandas de energía máxima absorbida y energía relativa máxima total para diferentes valores del coeficiente basal de diseño de un marco plano de cinco niveles sometido a la acción de sismos con características dinámicas distintas y para mecanismos predeterminados diferentes que predominan durante la respuesta. Para ello, a partir de un sistema de referencia, un marco plano de 5 niveles y dos crujiás, diseñado de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (*Normas Técnicas Complementarias*, 1992), se definieron varios modelos en los cuales se obligó, mediante el aumento de resistencia de algunos miembros determinados, a que la respuesta quedara regida por un mecanismo en particular. Todos los sistemas se sometieron a la acción de 60 sismos generados artificialmente y a las dos componentes ortogonales de dos registros reales (El Centro, California, 1941 y SCT, Ciudad de México, 1985). Finalmente, se obtuvieron gráficas, para cada modelo de mecanismo predeterminado, que comparan las energías relativas máximas (absorbida y de entrada) desarrolladas para coeficientes basales asociados a la respuesta en colapso incipiente con las energías desarrolladas para coeficientes basales mayores.

## **2.1. Metodología**

Se realizó el diseño de un marco plano de cinco niveles y dos crujiás, de acuerdo a las recomendaciones de diseño previstas en las NTC del RCDF (*Normas Técnicas Complementarias*, 1992), el cual se tomó como modelo de referencia. A partir de este diseño básico, se definieron varios modelos de mecanismos predeterminados incrementando la resistencia de algunos elementos, localizados de tal forma que se asegure el predominio de dichos mecanismos específicos durante la respuesta. Todos los sistemas se sometieron a la acción de 60 acelerogramas artificiales y cuatro registros de sismos reales. Para cada sismo, el coeficiente de diseño de cortante basal se redujo, desde un valor inicial que corresponde al comportamiento elástico, hasta que el colapso fue inminente. El coeficiente de cortante basal asociado a este punto se llama en este trabajo Coeficiente de Colapso Dinámico ( $C_C$ ), y se define como el valor mínimo del coeficiente sísmico de

cortante basal requerido para prevenir la Inestabilidad Dinámica. Para llevar a cabo la reducción del cortante basal en forma simple, se incrementaron las aceleraciones del sismo, lo cual es aproximadamente equivalente a reducir el cortante basal cuando las demandas de resistencia ante carga horizontal son de una magnitud importante, comparada con las demandas de resistencia ante carga vertical.

Finalmente, se evaluó la influencia de las características dinámicas del registro en las características de disipación de energía relativa máxima total (de entrada) y energía relativa máxima absorbida de los diferentes mecanismos asociadas a la respuesta de los modelos, con resistencias en un intervalo de 1.1 a 3.5 veces la resistencia mínima necesaria para evitar el colapso dinámico. Para esto se tomaron en cuenta las energías máximas durante la respuesta, debido a que el fenómeno del colapso por cargas verticales tiene un límite máximo de capacidad disipadora de energía bajo cargas monotónicas incrementales.

### **2.1.1. Sismos Utilizados en el Estudio**

#### **2.1.1.1. Acelerogramas Generados**

Para la generación de los sismos artificiales utilizados, se aplicó el conocido filtro de Kanai-Tajimi sobre registros generados a través de una función normal gaussiana en el tiempo, discretizada a cada 0.02 segundos, de amplitud modulada posteriormente y finalmente filtrada para atenuar frecuencias bajas (Tung *et al*, 1992), tratando de ser consistentes con algunos estudios energéticos existentes en la literatura (Terán, 1996). Dicho proceso se detalla a continuación:

$$a_1(t) = \Psi(t) * x(t) \quad (1)$$

donde  $x(t)$  es una función discretizada en el tiempo con distribución normal gaussiana y duración  $t_d$ , y

$$\Psi(t) = Z * \left\{ \text{Sin} \left[ \pi \left( t/t_d \right)^\beta \right] \right\}^\alpha \quad (2)$$

Las frecuencias bajas de  $a(t)$  se atenúan en el dominio de la frecuencia con el siguiente filtro:

$$a_2(f) = a_1(f) * H_H(f) \tag{3}$$

donde  $H_H(f)$  es un filtro propuesto por Hodder (1983), de la siguiente forma:

$$H_H(f) = \begin{cases} 0 & \text{si } f < f_s \\ \text{Sin}^2[\pi(f - f_s)/0.3] & \text{si } f_s < f < f_s + 0.15 \\ 1 & \text{si } f > f_s + 0.15 \end{cases} \tag{4}$$

donde  $f_s$  es el valor mayor de 0.10 Hz y  $(3 / t_t)$ , siendo  $t_t$  la duración total del sismo. Finalmente, se aplica el conocido filtro de Kanai Tajimi:

$$a(i\omega) = a_2(\omega) * H_{KT}(i\omega) \tag{5}$$

donde:

$$H_{KT}(i\omega) = \frac{2i\xi_{KT} \omega / \omega_{KT} + 1}{(1 - \omega^2 / \omega_{KT}^2) + 2i\xi_{KT} \omega / \omega_{KT}} \tag{6}$$

Con este procedimiento, se generaron 12 grupos de 5 sismos de características similares entre sí. La nomenclatura y parámetros utilizados se detallan en la Tabla 2.1

**Tabla 2.1.** Características de los sismos artificiales utilizados en este estudio.

Clave	$\omega_{KT}$ (Periodo fundamental)	$\xi_{KT}$ (Banda)	Duración ( $t_d$ )	$\alpha$	$\beta$
S04R10	15.7 rad/seg (0.4 seg)	0.5 (ancha)	10 seg	1.14	0.3096
S04S10	15.7 rad/seg (0.4 seg)	0.05 (estrecha)	10 seg	0.84	0.2264
S04R30	15.7 rad/seg (0.4 seg)	0.5 (ancha)	30 seg	1.14	0.3096
S04S30	15.7 rad/seg (0.4 seg)	0.05 (estrecha)	30 seg	0.44	0.1424
S08R10	7.85 rad/seg (0.8 seg)	0.5 (ancha)	10 seg	1.14	0.3096
S08S10	7.85 rad/seg (0.8 seg)	0.05 (estrecha)	10 seg	0.84	0.2264
S08R30	7.85 rad/seg (0.8 seg)	0.5 (ancha)	30 seg	1.14	0.3096
S08S30	7.85 rad/seg (0.8 seg)	0.05 (estrecha)	30 seg	0.44	0.1424
S16R10	3.93 rad/seg (1.6 seg)	0.5 (ancha)	10 seg	1.14	0.3096
S16S10	3.93 rad/seg (1.6 seg)	0.05 (estrecha)	10 seg	0.84	0.2264
S16R30	3.93 rad/seg (1.6 seg)	0.5 (ancha)	30 seg	1.14	0.3096
S16S30	3.93 rad/seg (1.6 seg)	0.05 (estrecha)	30 seg	0.44	0.1424

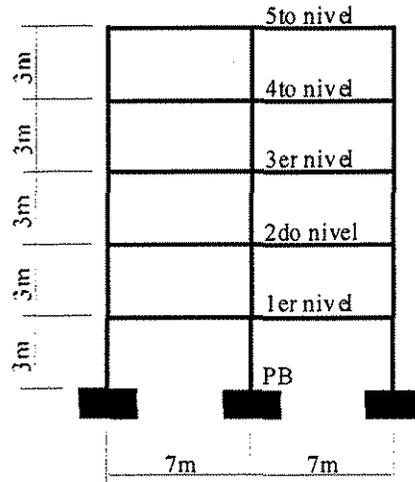
**TEESIS CON FALLA DE ORIGEN**

### 2.1.1.2. Registros Acelerográficos

Además de los registros generados sintéticamente se emplearon los acelerogramas de las componentes NS y EO de los registros obtenidos en El Centro, California, 1941 (CEN) y en la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, 1985 (SCT).

### 2.1.2. Modelo de Referencia

El edificio seleccionado para este estudio fue una estructura de cinco niveles (figura 2.1), diseñada conforme a las NTC-RCDF (*Normas Técnicas Complementarias*, 1992) En el análisis se consideró que el amortiguamiento de los dos primeros modos es de 5% del crítico y, por simplicidad, que los elementos tienen comportamiento elasto-plástico perfecto. En la Tabla 2.2 se detallan las propiedades geométricas y resistentes de las columnas y vigas del modelo de referencia, así como los periodos y factores de participación de los dos primeros modos.



**Figura 2.1.** Características generales del modelo de referencia considerado en este estudio.

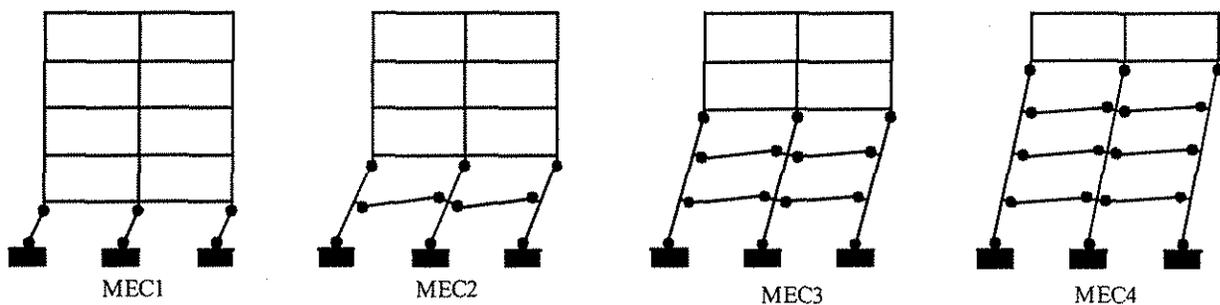
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla 2.2.** Propiedades del modelo de referencia.

Nivel	Columnas	Vigas	Modo	Periodo (seg.)	Factor de participación (Normalizado a la masa)
1	W305x342.9	W305x313.0	1	0.80	5.86
2	W305x342.9	W305x313.0	2	0.26	2.29
3	W305x282.6	W305x253.2	Masa por nivel (niveles 1 a 4): 9.4 ton-seg <sup>2</sup> / m		
4	W305x282.6	W305x253.2	Masa nivel 5 : 6.0 ton-seg <sup>2</sup> / m		
5	W305x202.1	W305x226.4			

### 2.1.3. Modelos de Mecanismo Predeterminado

A partir del diseño básico del *modelo de referencia*, se generaron una serie de sistemas aumentando la resistencia de algunos elementos para asegurar el desarrollo de diferentes mecanismos específicos. Estos modelos (figura 2.2) son denominados en este trabajo como modelos de *mecanismo predeterminado*, y se utilizan para estudiar la influencia de diferentes mecanismos específicos en las características de disipación de energía.



**Figura 2.2.** Modelos de mecanismo predeterminado utilizados en este estudio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### **2.1.4. Procedimiento**

Para los modelos de referencia y de mecanismos predeterminados se calculó, para cada uno de los registros, mediante un análisis dinámico paso a paso, el valor de la energía relativa máxima absorbida y total (de entrada) para un coeficiente de diseño ligeramente mayor al asociado al colapso ( $C_C$ ) con efectos P- $\delta$  y para incrementos del 10% de dicho coeficiente hasta llegar al valor de  $3.5C_C$ . Las energías así calculadas se normalizaron con el valor de las energías respectivas asociadas a la respuesta elástica. Para cada uno de los grupos de sismos generados (Tabla 2.1) se obtuvo el promedio de dichos valores.

#### **2.2. Resultados**

Los valores promedio de las raíces cuadradas de las Energías Máximas Absorbidas y Energías Relativas Máximas Totales normalizada con respecto a las Energías Máximas Absorbidas y Energías Relativas Máximas Totales, respectivamente, en comportamiento Elástico; estos valores se presentan para cada grupo de sismos en las tablas A.1 a la A.12 del anexo A, desde el coeficiente de diseño asociado al colapso inminente, hasta 3 veces dicho coeficiente, en incrementos de resistencia del 10%, para los cuatro mecanismos predeterminados y para el sistema de referencia. En las figuras A.1 y A.2 del anexo A se muestran las Energías Relativas Máximas normalizadas con respecto a las Energías Relativas Máximas asociadas al Colapso, para Energías Absorbida y Total. A continuación se detallan las observaciones más relevantes en torno a dichos resultados.

##### **2.2.1. Relación entre la Energía Máxima en Respuesta Cercana al Colapso y la Energía Máxima en Respuesta Estable lejana al Colapso.**

Para estudiar si la energía máxima en respuesta cercana al colapso puede ser determinada a partir de las energías calculadas en sistemas con resistencia tal que se hallan lejanas del colapso por inestabilidad dinámica, se presentan, en raíz cuadrada, en las tablas 2.3, 2.4 y 2.5, los valores de energía máxima absorbida y máxima relativa total cercanos al colapso

con relación a los valores de energía absorbida y máxima relativa total para sistemas con factor de seguridad contra colapso de 1.33, de 2 y para sistemas con resistencia tal que la respuesta es elástica, respectivamente. De estas tablas, se aprecia que las energías en respuesta cercana al colapso puede ser determinada a partir de respuesta inelástica estable, excepto en sismos correspondientes a suelo blando de larga duración, donde dicha estimación puede ser considerablemente insegura. La precisión de la estimación se va perdiendo conforme la resistencia del sistema aumenta, hasta el punto que las energías obtenidas a partir de la respuesta elástica no es confiable como parámetro predictivo para las energías en respuesta cercana al colapso.

**Tabla 2.3.** Cocientes de energías en el colapso entre energías para sistema más resistente en 33%.

REGISTRO SISMICO	MÁXIMA ABSORBIDA					MÁXIMA RELATIVA TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
S08, 10 segs, Suelo	0.89	0.91	0.90	0.89	0.90	0.91	0.93	0.91	0.91	0.92
S04, 10 segs, Roca	0.92	0.96	0.94	0.92	0.92	0.94	1.00	0.96	0.95	0.96
S08, 30 segs, Suelo	0.93	0.98	0.96	0.94	0.92	0.91	0.94	0.91	0.91	0.91
S04, 10 segs, Suelo	0.93	0.94	0.94	0.97	0.94	0.96	0.99	0.98	1.00	0.98
S08, 10 segs, Roca	0.96	0.95	0.96	0.95	0.94	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97
S08, 30 segs, Roca	0.97	1.04	1.00	0.96	0.96	0.97	1.01	0.99	0.96	0.96
CEN-NS	0.97	0.97	0.97	0.97	0.93	0.95	0.96	0.95	0.95	0.94
S16, 10 segs, Roca	0.99	0.99	0.97	0.98	0.97	1.02	1.03	1.00	1.00	1.01
S04, 30 segs, Roca	1.04	1.03	1.03	1.04	1.02	1.01	1.01	1.00	1.01	1.00
S16, 10 segs, Suelo	1.06	1.11	1.12	1.05	0.96	1.08	1.14	1.14	1.08	1.00
S16, 30 segs, Roca	1.08	1.16	1.18	1.09	1.04	1.08	1.12	1.14	1.09	1.06
CEN-EO	1.08	1.01	1.01	1.08	0.97	1.05	0.99	1.00	1.05	0.98
S04, 30 segs, Suelo	1.09	1.08	1.08	1.09	1.11	1.03	1.01	1.01	1.02	1.04
S16, 30 segs, Suelo	1.34	1.35	1.34	1.26	1.15	1.32	1.34	1.34	1.25	1.15
SCT-EO	1.56	1.50	1.56	1.41	1.29	1.52	1.47	1.52	1.42	1.30
SCT-NS	2.02	1.73	2.16	1.99	1.78	1.74	1.42	1.84	1.81	1.70

**Tabla 2.4.** Cocientes de energías en el colapso entre energías para sistema más resistente en 100%.

REGISTRO SISMICO	MÁXIMA ABSORBIDA					MÁXIMA RELATIVA TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
S08, 10 segs, Suelo	0.78	0.82	0.81	0.77	0.78	0.80	0.84	0.80	0.80	0.80
S04, 10 segs, Roca	0.83	0.92	0.87	0.83	0.83	0.87	0.98	0.91	0.88	0.88
S08, 30 segs, Suelo	0.85	0.98	0.95	0.88	0.83	0.79	0.86	0.82	0.80	0.79
S04, 10 segs, Suelo	0.87	0.89	0.88	0.94	0.88	0.91	0.96	0.93	0.99	0.95
S08, 10 segs, Roca	0.89	0.90	0.90	0.87	0.87	0.91	0.94	0.91	0.89	0.90
CEN-NS	0.94	0.96	0.95	0.93	0.90	0.89	0.91	0.89	0.88	0.89
S16, 10 segs, Roca	0.94	0.99	0.94	0.93	0.93	0.98	1.06	0.98	0.97	0.98
S08, 30 segs, Roca	0.98	1.17	1.06	0.95	0.94	0.95	1.03	1.00	0.94	0.92
S04, 30 segs, Roca	1.08	1.08	1.08	1.08	1.06	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99
CEN-EO	1.16	1.00	1.08	1.17	1.05	1.05	0.94	1.01	1.06	1.02
S16, 10 segs, Suelo	1.24	1.30	1.63	1.22	0.96	1.27	1.39	1.59	1.26	1.02
S16, 30 segs, Roca	1.30	1.43	1.46	1.32	1.14	1.24	1.25	1.28	1.25	1.14
S04, 30 segs, Suelo	1.36	1.24	1.23	1.26	1.36	1.10	1.01	1.00	1.02	1.10
S16, 30 segs, Suelo	2.90	2.46	2.63	2.16	1.88	2.53	2.23	2.45	2.02	1.80
SCT-EO	3.71	2.70	3.55	3.61	3.09	2.74	2.19	2.64	2.82	2.65
SCT-NS	4.20	2.75	4.41	4.62	4.19	2.41	1.73	2.53	2.80	2.92

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**Tabla 2.5.** Cocientes de energías en el colapso entre energías para sistema muy resistente (elástico).

REGISTRO SISMICO	MÁXIMA ABSORBIDA					MÁXIMA RELATIVA TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
S08, 10 segs, Suelo	0.70	0.94	0.87	0.68	0.70	0.45	0.65	0.55	0.45	0.46
S08, 10 segs, Roca	1.10	1.17	1.13	1.07	1.04	0.83	0.97	0.87	0.82	0.80
S04, 10 segs, Roca	1.22	1.36	1.28	1.17	1.17	0.84	1.02	0.92	0.84	0.84
CEN-NS	1.32	1.34	1.34	1.29	1.18	0.84	0.94	0.90	0.84	0.76
S08, 30 segs, Suelo	1.32	1.55	1.51	1.37	1.23	0.56	0.73	0.68	0.60	0.53
S04, 10 segs, Suelo	1.41	0.94	0.95	1.20	1.21	1.09	0.95	0.89	1.03	1.05
CEN-EO	1.46	1.25	1.35	1.45	1.41	0.94	0.91	0.92	0.96	0.92
S04, 30 segs, Roca	1.57	1.42	1.49	1.53	1.52	0.95	0.98	0.95	0.95	0.94
S16, 10 segs, Roca	1.64	1.56	1.62	1.57	1.53	1.41	1.49	1.42	1.36	1.35
S08, 30 segs, Roca	1.81	1.81	1.88	1.78	1.75	1.01	1.10	1.07	1.01	0.98
S16, 30 segs, Roca	2.43	2.06	2.31	2.47	2.42	1.58	1.43	1.51	1.60	1.58
S04, 30 segs, Suelo	2.53	1.60	1.73	1.97	2.38	1.23	1.02	1.02	1.07	1.20
S16, 10 segs, Suelo	3.24	2.82	3.18	3.23	3.01	3.02	2.85	2.95	3.06	2.97
SCT-NS	4.32	2.81	4.53	5.27	5.93	2.47	1.74	2.59	2.98	3.35
SCT-EO	4.36	3.50	4.17	4.75	5.04	2.95	2.47	2.85	3.25	3.44
S16, 30 segs, Suelo	5.51	4.36	5.41	5.54	5.81	4.06	3.40	4.02	4.11	4.30

**2.2.2. Influencia del Mecanismo en la Disipación Energética**

En la tabla 2.6, se presentan las raíces cuadradas de las energías máximas en respuesta cercana al colapso obtenidas para los diferentes mecanismos, incluido el sistema de referencia, para cada uno de los diferentes grupos de sismos. En dicha tabla, se presenta, para cada uno de los grupos de sismos, la relación entre el valor máximo y el mínimo de la raíz cuadrada de la energía para los diferentes mecanismos estudiados. Esta relación nos indica en forma aproximada el efecto de la variación del mecanismo en la energía demandada del sistema. De dicha tabla se observa que para suelos blandos, con un ancho de banda estrecho, la dependencia energética del tipo de mecanismo es más notable que cuando el terreno es firme o de banda ancha. En este último caso, los resultados indican que la demanda de energía no depende sustancialmente del mecanismo que se forme o, en otras

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

palabras, del valor del *Coficiente de Estabilidad* en cuestión. De esta forma, los resultados apuntan a que es factible la obtención de una energía de demanda independiente del valor del *Coficiente de Estabilidad*. Este resultado es fundamental para poder estimar una demanda de energía sin necesidad de conocer el mecanismo que se vaya a generar. Para sismos de periodo dominante similar al estructural, el mecanismo local tiene una demanda de energía mayor a la del mecanismo global dado que en otros casos existe una demanda mayor del mecanismo global que la del local.

**Tabla 2.6.** Raíz cuadrada de las energías máximas en respuesta cercana al colapso.

REGISTRO SISMICO	MÁXIMA ABSORBIDA						MÁXIMA RELATIVA TOTAL					
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	Máx/Mín	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	Máx/Mín
S08, 30 segs, Roca	1.807	1.807	1.876	1.779	1.754	1.07	1.008	1.096	1.067	1.006	0.982	1.12
S16, 10 segs, Roca	1.637	1.563	1.624	1.566	1.53	1.07	1.406	1.487	1.417	1.363	1.353	1.10
S04, 30 segs, Roca	1.567	1.423	1.486	1.526	1.523	1.10	0.954	0.975	0.951	0.952	0.938	1.04
S08, 10 segs, Roca	1.097	1.167	1.129	1.068	1.039	1.12	0.825	0.965	0.871	0.818	0.8	1.21
CEN-NS	1.318	1.337	1.338	1.286	1.182	1.13	0.84	0.944	0.895	0.837	0.761	1.24
S16, 10 segs, Suelo	3.237	2.815	3.18	3.226	3.009	1.15	3.02	2.851	2.952	3.056	2.965	1.07
S04, 10 segs, Roca	1.224	1.355	1.283	1.172	1.174	1.16	0.843	1.024	0.915	0.84	0.838	1.22
CEN-EO	1.461	1.246	1.348	1.452	1.412	1.17	0.941	0.914	0.917	0.956	0.922	1.05
S16, 30 segs, Roca	2.434	2.059	2.306	2.466	2.416	1.20	1.575	1.427	1.509	1.603	1.583	1.12
S08, 30 segs, Suelo	1.319	1.554	1.506	1.373	1.233	1.26	0.564	0.733	0.677	0.599	0.526	1.39
S16, 30 segs, Suelo	5.507	4.356	5.412	5.543	5.805	1.33	4.063	3.398	4.02	4.111	4.304	1.27
S08, 10 segs, Suelo	0.699	0.943	0.867	0.678	0.703	1.39	0.453	0.648	0.553	0.452	0.455	1.43
SCT-EO	4.359	3.504	4.166	4.748	5.036	1.44	2.951	2.471	2.845	3.245	3.442	1.39
S04, 10 segs, Suelo	1.412	0.939	0.954	1.197	1.21	1.50	1.087	0.949	0.893	1.028	1.053	1.22
S04, 30 segs, Suelo	2.533	1.6	1.731	1.972	2.381	1.58	1.232	1.021	1.015	1.065	1.197	1.21
SCT-NS	4.317	2.812	4.526	5.273	5.93	2.11	2.465	1.741	2.586	2.98	3.347	1.92

### 2.2.3. Relación entre Energía Absorbida y Total

En la tabla 2.7, se ilustran las energías totales máximas en respuesta cercana al colapso normalizadas por las respectivas en respuesta elástica, en función de las absorbidas

máximas normalizadas por las absorbidas máximas en respuesta elástica. Esta relación tiene sus valores mínimos para sismos de larga duración y periodo dominante igual que el del sistema, y sus valores máximos para sismos de corta duración de periodos diferentes al del sistema estructural.

**Tabla 2.7.** Cociente entre la energía relativa máxima total en el colapso normalizada a la relativa máxima total en comportamiento elástico y la energía máxima absorbida en el colapso normalizada a la máxima absorbida en comportamiento elástico.

REGISTRO SISMICO	TOTAL / ABSORBIDA				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
S08, 30 segs, Suelo	0.43	0.47	0.45	0.44	0.43
S08, 30 segs, Roca	0.56	0.61	0.57	0.57	0.56
SCT-NS	0.57	0.62	0.57	0.57	0.56
S04, 30 segs, Suelo	0.49	0.64	0.59	0.54	0.50
S04, 30 segs, Roca	0.61	0.69	0.64	0.62	0.62
S08, 10 segs, Suelo	0.65	0.69	0.64	0.67	0.65
S16, 30 segs, Roca	0.65	0.69	0.65	0.65	0.66
SCT-EO	0.68	0.71	0.68	0.68	0.68
CEN-NS	0.64	0.71	0.67	0.65	0.64
CEN-EO	0.64	0.73	0.68	0.66	0.65
S04, 10 segs, Roca	0.69	0.76	0.71	0.72	0.71
S16, 30 segs, Suelo	0.74	0.78	0.74	0.74	0.74
S08, 10 segs, Roca	0.75	0.83	0.77	0.77	0.77
S16, 10 segs, Roca	0.86	0.95	0.87	0.87	0.88
S04, 10 segs, Suelo	0.77	1.01	0.94	0.86	0.87
S16, 10 segs, Suelo	0.93	1.01	0.93	0.95	0.99

Es interesante observar de esta tabla que la relación indicada es siempre menor que uno, por lo que tenemos:

$$\left( \frac{E_{TOTAL} / E_{Total\ elástica}}{E_{ABS.} / E_{ABS.\ elástica}} \right) < 1.0 \quad (7)$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

o bien:

$$\left( \frac{E_{ABS.elástica}}{E_{Total elástica}} \right) < \left( \frac{E_{ABS.}}{E_{TOTAL}} \right) \quad (8)$$

Como las energías absorbidas deben siempre ser menores que las totales, la expresión anterior nos indica que el porcentaje de la energía total que es absorbida es mayor en respuesta cercana al colapso que en respuesta elástica. Esta observación es crucial para poder estimar las energías relativas totales a partir de demandas máximas de energía absorbida del sistema, las cuales son perfectamente determinables, al menos en forma monótonica.

### **2.3. Conclusiones**

En este capítulo se estudiaron las características de la demanda de energía de entrada y de energía máxima absorbida de un marco plano de cinco niveles obligado a desarrollar cuatro mecanismos diferentes y bajo diferentes coeficientes de diseño, desde el coeficiente asociado al colapso incipiente con efectos P- $\delta$  hasta valores del orden de 3.5 veces dicho coeficiente de colapso. Para ello, se utilizó un conjunto de 12 grupos de sismos artificiales de diferentes características y dos registros de sismos reales. Diferentes observaciones sobre las tendencias energéticas observadas se detallan en el cuerpo del presente capítulo, destacando las siguientes:

En todos los casos, la energía máxima absorbida es más cercana a la energía de entrada en la respuesta cercana al colapso que en la respuesta elástica.

Una conclusión general adicional a partir de las observaciones de este estudio es que las estimaciones de las características energéticas en la respuesta cercana al colapso debido al efecto desestabilizante de las cargas verticales basadas en las características energéticas de la respuesta inelástica lejana a dicha condición, son aproximadamente válidas para sismos

de banda ancha y corta duración, a diferencia de sismos de banda estrecha y gran duración, donde dichas estimaciones suelen encontrarse sustancialmente del lado de la inseguridad. Algo que es importante resaltar es el hecho de que la energía total en comportamiento elástico nos da idea y predice en algunos casos la energía total en el colapso, y ésta es similar a la energía máxima absorbida en el colapso, por lo que la energía total en comportamiento elástico puede ser útil a la hora de estimar demandas de energía máxima absorbida en las cercanías del colapso. También se observó que para sismos de periodo similar al estructural, el mecanismo local tiene una demanda energética mayor que la del mecanismo global dado que en otros casos existe una demanda mayor del mecanismo global que la del local.

**Capítulo 3**  
***Efecto de la Orientación en la Disipación***  
***Energética de Estructuras Tridimensionales***  
***Cercanas al Colapso Dinámico***

La geometría tridimensional de la mayoría de los edificios reales introduce la posibilidad de desarrollar mecanismos de falla rotacionales [Sordo y Bernal, 1992, 1994 y 1996], y el efecto de bidireccionalidad de los movimientos del terreno y el ángulo de incidencia de éste sobre la estructura agrega complejidad al problema. Aunque el potencial de falla de la inestabilidad rotacional ha sido reconocido por mucho tiempo, existen pocos estudios que directamente se enfoquen a este problema. La mayoría de estos estudios tratan sobre Inestabilidad Dinámica de sistemas de un solo nivel, como el trabajo pionero de Shibata *et al* (1969) o estudios más recientes [Morino y Uchida, 1980, Sordo y Bernal, 1992 y De Stefano y Rutenberg, 1999] que señalan una importante influencia de la respuesta inelástica rotacional en el umbral de estabilidad de tales sistemas, así como la importancia de considerar simultáneamente las componentes del movimiento del terreno para una valoración adecuada de la Inestabilidad Dinámica. Sin embargo, los sistemas tridimensionales de un solo nivel no representan la complejidad de sistemas tridimensionales reales donde se generan diferentes combinaciones de mecanismos en planta y elevación.

Los estudios de Inestabilidad Dinámica en estructuras de varios niveles son sumamente escasos. Un estudio exploratorio de la Inestabilidad Dinámica unidireccional de una estructura de varios niveles reportado por Sordo y Bernal (1992) concluyó que es probable que la forma tridimensional del mecanismo de falla juegue un papel fundamental en la seguridad contra la inestabilidad de estructuras de varios niveles. Sordo y Bernal [1993] estudiaron posteriormente el fenómeno de Inestabilidad Dinámica en un edificio de cinco niveles sujeto al efecto de movimientos del terreno unidireccionales y bidireccionales diferentes, y señalan la importancia de considerar el movimiento multidireccional del terreno en el análisis, particularmente cuando las fallas rotacionales tienden a desarrollarse. Ciertamente, el desarrollo de metodologías racionales simplificadas para la predicción analítica de la Inestabilidad Dinámica de estructuras tridimensionales es una necesidad fundamental para valorar la seguridad estructural de edificios reales. Uno de los problemas más desafiantes acerca de la estimación o predicción de sistemas estructurales de varios niveles es la viabilidad de representar el comportamiento complejo de estos sistemas de una manera simple y racional. Aunque se han propuesto Sistemas de un Grado de Libertad

Equivalentes (SUGLE) para sistemas estructurales planos [Bernal 1992, 1998], escasos estudios [Sordo y Bernal, 1994] se han llevado a cabo hasta ahora para implementar este concepto en una forma más genérica en la Inestabilidad Dinámica de sistemas tridimensionales de varios niveles. Un enfoque atractivo para lograr esta meta consiste en definir un SUGLE que tenga propiedades de disipación de energía equivalentes a aquéllas de la estructura tridimensional. Aunque los conceptos basados en energía fueron introducidos hace tiempo por Housner [1956], no es sino hasta fechas más recientes cuando han sido estudiados exhaustivamente como una alternativa prometedora a los procedimientos de diseño tradicionales de resistencia-ductilidad [Uang y Bertero 1988, Bertero *et al* 1996, entre otros] La ventaja principal de emplear conceptos de energía en el estudio de la Inestabilidad Dinámica de estructuras tridimensionales es la reducción del problema a la evaluación de dos escalares: la capacidad energética y la demanda de energía.

Este capítulo contribuye a la valoración de la Inestabilidad Dinámica en estructuras tridimensionales de varios niveles analizando los efectos de dos movimientos bidireccionales con diferentes características como son duración, contenido de frecuencias y direccionalidad, en un modelo de una estructura tridimensional de cinco niveles con diferentes orientaciones relativas a los movimientos del terreno. En la primera parte del estudio, se obtiene el coeficiente de diseño mínimo necesario para prevenir la Inestabilidad Dinámica (*Coficiente de Colapso Dinámico*), y los mecanismos asociados al colapso para cada una de las diferentes orientaciones. Posteriormente, se modifican las resistencias de algunos elementos para inducir mecanismos predefinidos a lo largo de la respuesta, y se discuten los efectos de la forma de estos mecanismos en el coeficiente de colapso dinámico para las diferentes orientaciones. En la segunda parte de este estudio, se obtienen los valores de disipación de energía cinética, de amortiguamiento, histerética y externa asociados a la respuesta cercana al colapso y se comparan a los valores de disipación de energía correspondientes al modelo elástico para los diferentes ángulos de incidencia del sismo respecto a la estructura.

### **3.1. Metodología**

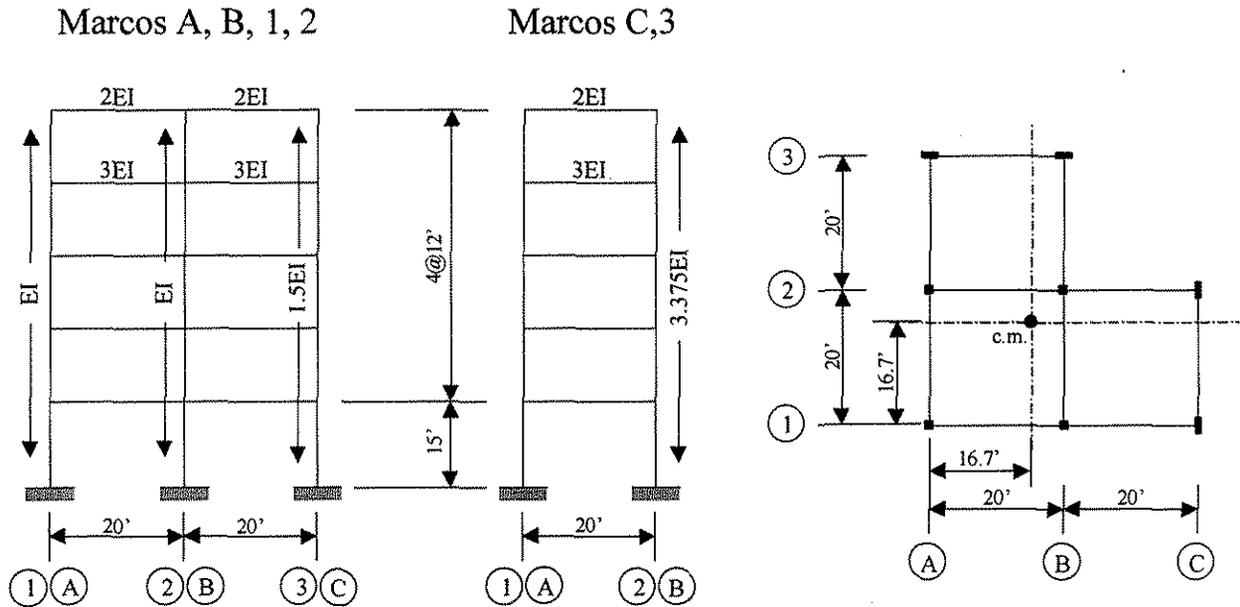
Para estudiar el fenómeno de Inestabilidad Dinámica y las características de disipación de energía cerca del colapso de estructuras tridimensionales cuando están sujetas a movimientos bidireccionales del terreno, se diseñó una estructura de cinco niveles en forma de L, de acuerdo a las recomendaciones de diseño previstas en el NEHRP de 1991, la cual se tomó como modelo de referencia. A partir de este diseño básico, se definieron varios modelos de mecanismo predeterminado incrementando la resistencia de algunos elementos de tal forma que se induzcan estos mecanismos específicos durante la respuesta. Entonces, todos los sistemas se sujetaron a la acción de dos registros bidireccionales; estos registros se aplicaron en un rango de diferentes ángulos de incidencia (de 0 a 180°, que representan todas las posibles orientaciones debido a las características particulares de la estructura), para cada ángulo de incidencia, se redujo el coeficiente de diseño, desde un valor que corresponde al comportamiento elástico, hasta que el colapso es inminente. El coeficiente de cortante basal asociado a este punto se llama en este trabajo *Coficiente de Colapso Dinámico* ( $C_C$ ), y se define como el valor mínimo del coeficiente sísmico de cortante basal requerido para prevenir la Inestabilidad Dinámica. Se evaluó la influencia del ángulo de incidencia y del mecanismo en este valor y en las características de disipación de energía cinética, de amortiguamiento, histerética y externa asociadas a la respuesta de los diferentes modelos cerca del colapso.

#### **3.1.1. Sismos Utilizados en el Estudio**

En este capítulo se emplearon los acelerogramas de las componentes NS y EO de los registros obtenidos en El Centro, California, 1941 (CEN) y en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, 1985 (SCT). Las características que diferencian al registro de SCT del de CEN son una direccionalidad más marcada, una mayor duración y que es más armónico (banda estrecha).

### **3.1.2. Modelo de Referencia**

El edificio seleccionado para este estudio es una estructura de cinco niveles con forma de “L “ en planta, con características idénticas en las dos direcciones perpendiculares de análisis, como se ve en la figura 3.1. Los momentos resistentes de los elementos estructurales corresponden a los momentos internos obtenidos de un análisis estático con las condiciones de carga para sismo proporcionadas por las recomendaciones de diseño NEHRP de 1991. Las vigas fueron diseñadas solamente para las cargas sísmicas, y no para las condiciones de carga viva y muerta. Las características de distribución de las cargas sobre las vigas se ignoran en el análisis dinámico no lineal, para tener consistencia con el diseño. Esta aproximación es para minimizar el efecto de la sobrerresistencia en los elementos, para maximizar la posibilidad de formación de diferentes mecanismos durante la respuesta dinámica. Nótese que, en un diseño común, se espera que un mecanismo dinámico predominante aparezca debido a la sobrerresistencia que algunos de los elementos tendrán. También, se consideró que los elementos tienen un comportamiento elasto-plástico perfecto sin efecto de interacción biaxial. En el análisis se considera un amortiguamiento del 5% del amortiguamiento crítico.



	Modo 1	Modo 2	Modo 3	<i>Nomenclatura:</i> $T_i$ y $\Gamma_i$ son el periodo y el factor de participación modal normalizado a la masa; E es el Módulo de Elasticidad; I es la Inercia; $m_i$ y $r_i$ son la masa y el radio de giro por piso (los mismos para todos); y $\tau$ es la carga vertical total para efectos P- $\Delta$ entre el peso total considerado en el análisis y diseño sísmico.
$T_i$ (s)	1.00	0.956	0.622	
$\theta_i$	.0249	.0212	.00959	
$\Gamma_i$	1.63	1.67	0.368	
EI=2712Kips-ft <sup>2</sup> $m_1=7.51$ Kips-s <sup>2</sup> /ft $r_i=15.6$ ft $\tau=1.2$				
$\theta_i$ es el coeficiente de estabilidad modal elástico, definido como $1.0 - (T_i / T_i^*)^2$ , donde $T_i^*$ y $T_i$ son los periodos elásticos considerando y sin considerar los efectos P- $\Delta$ , respectivamente.				

Figura 3.1. Características generales del modelo de referencia considerado en este estudio.

### 3.1.3. Modelos de Mecanismo Predeterminado

A partir del diseño básico, previamente mencionado como *modelo de referencia*, se generaron una serie de sistemas aumentando la resistencia de algunos elementos para asegurar que se desarrollen diferentes mecanismos específicos. Estos modelos son llamados en este trabajo como modelos de *mecanismo predeterminado*. Se utilizaron para estudiar la

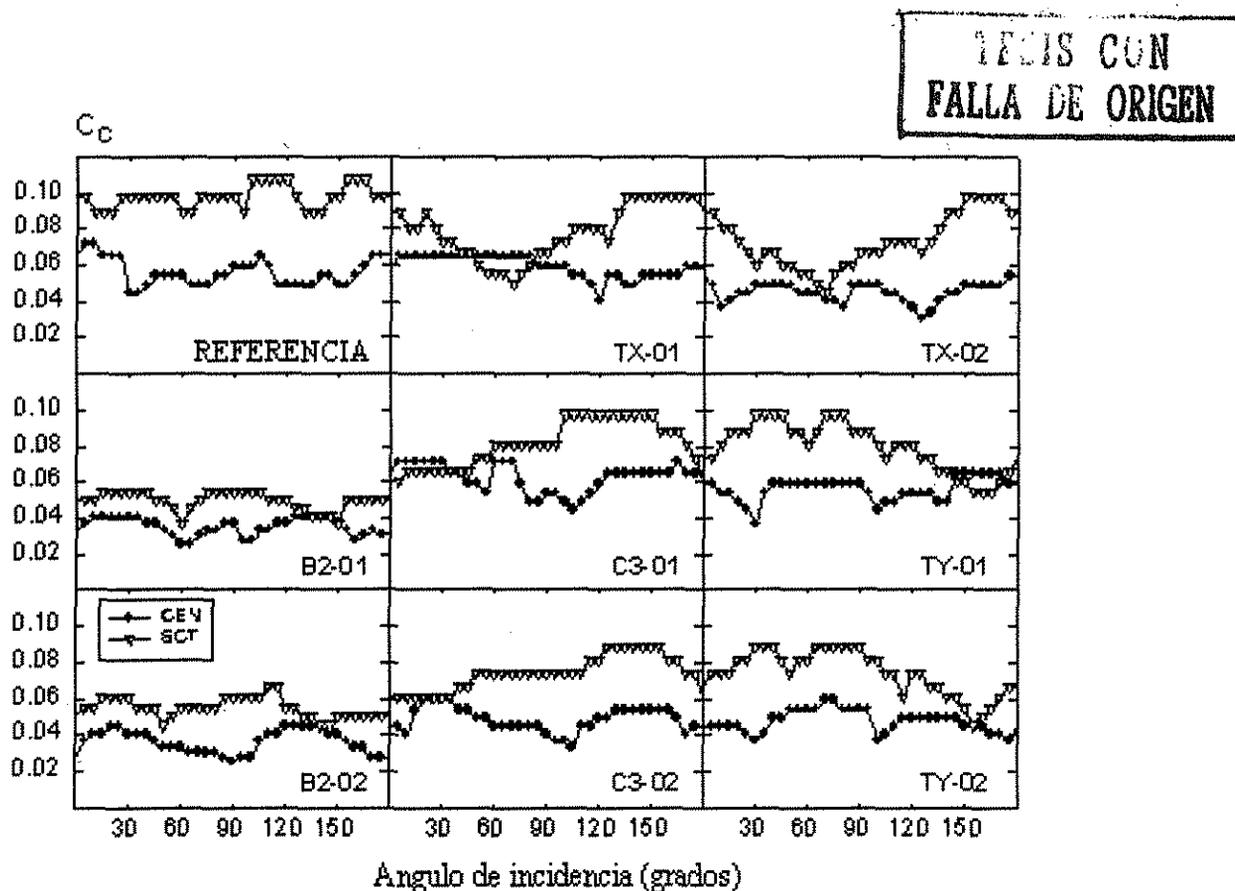
influencia de un mecanismo específico en las características de disipación de energía en el colapso inminente. La selección de los mecanismos predeterminados (mostrados en la Tabla 3.1) está basado en el criterio recomendado por Sordo y Bernal (1994), que consiste en seleccionar la menor de las máximas capacidades de disipación de energía monotónica (definida en la Tabla 3.1) que también satisface el mínimo cortante basal asociado a un patrón de cargas horizontales, constantes con la altura y a lo largo de la altura, que asegura, según los autores mencionados, que ocurra el mecanismo en elevación. Para efectos comparativos, se consideraron tres mecanismos predeterminados adicionales (C3-02, B2-01 y B2-02 en la Tabla 3.1) asociados a capacidades de disipación de energía relativamente altas. En la Tabla 3.1 se describen todos estos mecanismos y sus máximas capacidades de disipación de energía monotónica.

**Tabla 3.1.** Modelos de mecanismo predeterminado, y las capacidades de disipación de energía monotónica asociadas (1 Kips-in= 1.1545 ton-cm).

Mecanismo Predeterminado	Capacidad de disipación de energía monotónica
C3-01 = mecanismo de base a nivel 1 y rotando en la intersección de los ejes C y 3	620 kips-in
TX-01, TY-01 = mecanismo de base a nivel 1 y translacional en dirección X, Y	626 kips-in
TX-02, TY-02 = mecanismo de base a nivel 2 y translacional en dirección X, Y	906 kips-in
C3-02 = mecanismo de base a nivel 2 y rotando en la intersección de los ejes C y 3	1148 kips-in
B2-01 = mecanismo de base a nivel 1 y rotando en la intersección de los ejes B y 2	1573 kips-in
B2-02 = mecanismo de base a nivel 2 y rotando en la intersección de los ejes B y 2	2028 kips-in
<p>La capacidad de disipación de energía monotónica se define como la energía necesaria para llevar estáticamente a la estructura a una configuración de desplazamientos del mecanismo completamente desarrollado donde las fuerzas internas están en equilibrio con las cargas verticales en un análisis de segundo orden, y no depende del modelo de carga particular utilizado.</p>	

### **3.2. Resultados**

Para cada ángulo de incidencia y modelo estructural, se variaron los coeficientes de diseño de cortante basal desde un valor inicial alto hasta que se detecta un valor asociado a la respuesta de un colapso inminente. El coeficiente de diseño de cortante basal asociado a este punto se le llama *Coficiente de Colapso Dinámico* ( $C_C$ ), y al mecanismo plástico en el colapso inminente se le llama *mecanismo de colapso*, que se obtiene después de analizar el incremento de las distorsiones de entrepiso en el tiempo. El mecanismo de colapso esta predefinido para los modelos de mecanismos predeterminados, pero es arbitrario para el modelo de referencia. Los valores del  $C_C$  para diferentes ángulos de incidencia se indican en la figura 3.2. Aquí, puede observarse que la variación del  $C_C$  con el ángulo de incidencia es más notoria para mecanismos predeterminados traslacionales (TX-01, TX-02, TY-01 y TY-02) y para el movimiento del terreno más direccional (SCT). El mecanismo puramente rotacional (B2-01) no muestra influencia significativa al ángulo de incidencia para cualquier movimiento de terreno. La orientación no afecta significativamente el valor del  $C_C$  para el modelo de referencia, debido a las características de capacidad de energía similares (Tabla 3.1) de los diferentes mecanismos que pueden desarrollarse.



**Figura 3.2.** Coeficientes de colapso dinámico ( $C_C$ ) para los modelos de referencia y de mecanismo predeterminado.

Los valores de  $C_C$  para el modelo de referencia también están indicados en la Tabla 3.2, junto con sus mecanismos de colapso correspondientes. Esta tabla muestra que los mecanismos más críticos son C3-01 y TX-02, los cuales están asociados con los valores más grandes del  $C_C$  (resaltado en la Tabla 3.2). También, se ve que los mecanismos rotacionales son más probables de desarrollarse bajo la acción del CEN en comparación con un sismo más direccional como lo es SCT. Es importante señalar la relación entre los mecanismos de colapso observados en la Tabla 3.2 y aquellos mecanismos asociados con los valores mínimos de la máxima capacidad de disipación de energía monotónica mostrados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.2.** Coeficientes de colapso dinámico y mecanismos de colapso asociados, para el modelo de referencia.

CEN						SCT					
Angulo	C <sub>c</sub>	Mec	Angulo	C <sub>c</sub>	Mec	Angulo	C <sub>c</sub>	Mec	Angulo	C <sub>c</sub>	Mec
0°	0.065	C3-01	90°	0.059	TX-02	0°	0.098	TX-02	90°	0.098	TY-02
10°	<b>0.072</b>	<b>C3-01</b>	100°	0.059	TX-02	10°	0.089	TX-02	100°	<b>0.108</b>	<b>C3-01</b>
20°	0.065	C3-01	110°	0.059	TX-02	20°	0.089	TY-02	110°	<b>0.108</b>	<b>C3-01</b>
30°	0.045	TX-01	120°	0.049	TY-01	30°	0.098	TY-02	120°	<b>0.108</b>	<b>C3-01</b>
40°	0.049	C3-01	130°	0.049	TY-01	40°	0.098	TY-02	130°	0.089	C3-01
50°	0.054	C3-01	140°	0.054	TX-02	50°	0.098	TY-02	140°	0.089	TX-02
60°	0.054	TY-01	150°	0.049	TX-01	60°	0.089	TY-02	150°	0.098	TX-02
70°	0.049	TY-01	160°	0.054	TX-01	70°	0.098	TY-02	160°	<b>0.108</b>	<b>TX-02</b>
80°	0.054	TY-02	170°	0.065	C3-01	80°	0.098	TY-02	170°	0.098	TX-02

C3-01 = mecanismo del nivel 0 (base) al nivel 1 y rotando en la intersección de los ejes C y 3  
 TX-01=mec. del niv. 0 al niv. 1, traslacional en X      TX-02= mec. del niv. 0 al niv. 2, traslacional en X  
 TY-01=mec. del niv. 0 al niv. 1, traslacional en Y      TY-02= mec. del niv. 0 al niv. 2, traslacional en Y

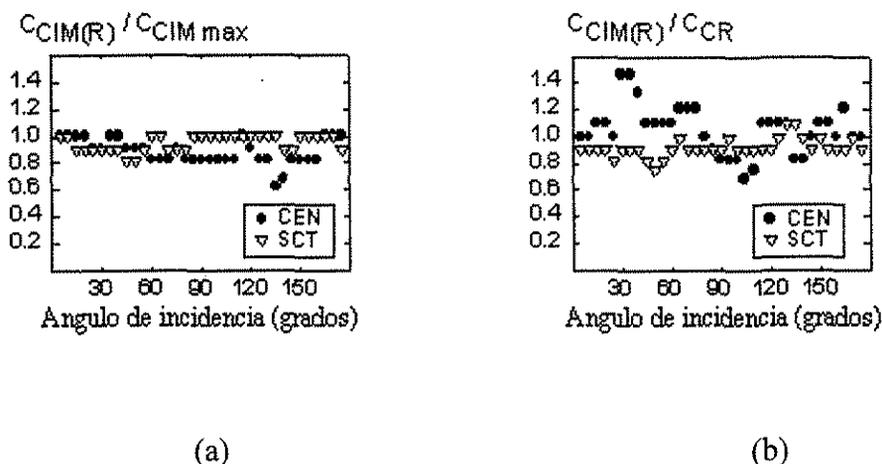
### 3.2.1. Capacidad de Predicción de los Modelos de Mecanismos Predeterminados

En el estudio de la Inestabilidad Dinámica de edificios tridimensionales de varios niveles, es importante explorar procedimientos simplificados que podrían predecir los valores de C<sub>c</sub> que aseguran la estabilidad estructural. La mayor dificultad para tales procedimientos es predecir con precisión la forma del mecanismo específico que llevará a la estructura al colapso dinámico durante la respuesta. Un primer paso se hizo en este sentido, comparando los valores de C<sub>c</sub> para los diferentes modelos de mecanismo predeterminado y los asociados con el modelo de referencia. Esta comparación evalúa el potencial para detectar el mecanismo de colapso que tiene el estudio de un grupo de modelos de mecanismo predeterminado. Estos modelos de mecanismo predeterminado podrían reducirse potencialmente a un conjunto de sistemas más simples, como sistemas de un grado de libertad.

ESTA TESIS NO SALI  
DE LA BIBLIOTECA

La figura 3.3a muestra, para cada ángulo de incidencia, el valor de  $C_C$  asociado al modelo con mecanismo predeterminado idéntico al observado en el modelo de referencia ( $C_{CIM(R)}$ ), normalizado al máximo  $C_C$  de todos los modelos de mecanismo predeterminado en el mismo ángulo de incidencia ( $C_{CIM \max}$ ). Se hace notar que esta proporción es, en términos generales, cercana a la unidad, por lo que el máximo valor de  $C_C$  de todos los modelos de mecanismo predeterminado parece predecir el valor del  $C_C$  asociado al mecanismo predeterminado que representa el mecanismo detectado en el modelo de referencia.

La figura 3.3b muestra los valores de  $C_{CIM(R)}$  normalizados al valor de  $C_C$  correspondiente al modelo de referencia ( $C_{CR}$ ) para el mismo ángulo de incidencia. Aquí puede verse que, especialmente para los ángulos de incidencia asociados a los valores críticos de  $C_C$  (alrededor de  $10^\circ$  para CEN y  $110^\circ$  para SCT, resaltados en la Tabla 3.1), el  $C_C$  del modelo de referencia puede ser predicho adecuadamente a partir del modelo de mecanismo predeterminado correspondiente. De estos resultados, parece razonable predecir el valor del  $C_C$  del modelo de referencia obteniendo el máximo valor del  $C_C$  de todos los mecanismos predeterminados, que son más fáciles de representar por sistemas más simples que el modelo de referencia.



**Figura 3.3 (a)**  $C_C$  para el modelo de mecanismo predeterminado correspondiente al observado en el modelo de referencia ( $C_{CIM(R)}$ ), normalizado al máximo valor de  $C_C$  para cualquier mecanismo predeterminado en el mismo ángulo de incidencia ( $C_{CIM max}$ )

**(b)**  $C_C$  para el modelo de mecanismo predeterminado correspondiente al observado en el modelo de referencia ( $C_{CIM(R)}$ ), normalizado al valor de  $C_C$  correspondiente al modelo de referencia ( $C_{CR}$ ) en el mismo ángulo de incidencia

### 3.2.2. Características de Disipación de Energía Cerca de la Condición de Inestabilidad Dinámica

Los valores máximos de energía cinética relativa, de amortiguamiento, histerética (incluyendo efectos P- $\delta$ ) y total en la respuesta cercana al colapso para los modelos de mecanismo predeterminado B2-01, C3-01 y TY-01 están graficados en las figuras 3.4 y 3.5 para los registros CEN y SCT, respectivamente. Estos mecanismos específicos son representativos de tres principales tipos de mecanismos en planta, que son; puramente rotacional (B2-01), rotacional y traslacional (C3-01) y puramente traslacional (TY-01). Las energías máximas obtenidas del modelo diseñado para permanecer elástico durante la respuesta también se incluyen en estas gráficas. Para la particular estructura en estudio, la energía demandada al modelo elástico no varía significativamente con el ángulo de incidencia cuando se somete a los registros de CEN o SCT, debido a las características dinámicas similares de los tres primeros modos de vibración (figura. 3.1). Esta situación fue escogida para remarcar el efecto de los diferentes modelos de mecanismos en la disipación

de energía como función del ángulo de incidencia. Algunas observaciones de las figuras 3.4 y 3.5 se discuten en los siguientes párrafos.

Las energías cinéticas y de amortiguamiento del sistema elástico parecen ser límites superiores para las energías correspondientes a la respuesta cercana al colapso para CEN, pero parece ser un límite inferior cuando los modelos son sujetos a SCT. Sin embargo, la energía histerética para el sistema elástico es un límite inferior de las energías correspondientes a la respuesta cercana al colapso para ambos registros.

La cantidad de energía relativa externa (total) no depende significativamente del ángulo de incidencia o del mecanismo para el registro del CEN. Sin embargo, se ve la tendencia opuesta cuando los modelos se someten a la acción del registro de SCT. Está es una consecuencia de la fuerte direccionalidad del registro de SCT

La cantidad de energía externa demandada de los modelos es similar a la demandada al modelo elástico cuando se somete al registro de CEN. Sin embargo, cuando se someten al registro de SCT, la energía externa demandada llega a ser mucho mayor. Esto se debe a que, como SCT es un movimiento de terreno muy largo y cíclico, la máxima disipación de energía es a través de respuesta plástica. Esto también explica las grandes diferencias en las relaciones de energía histerética vs. energía total para SCT en comparación con CEN.

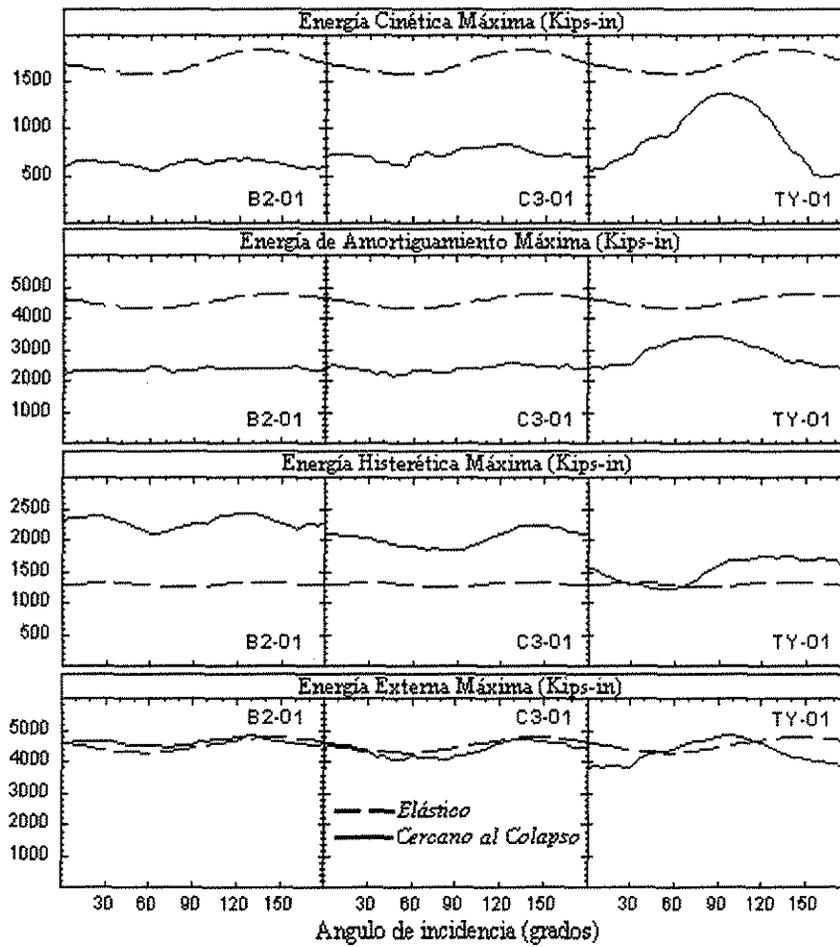


Figura 3.4. Parámetros de energía para los modelos B2-01, C3-01 y TY-01 sujetos al registro del CEN (1 Kips-in=1.1545 ton-cm).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

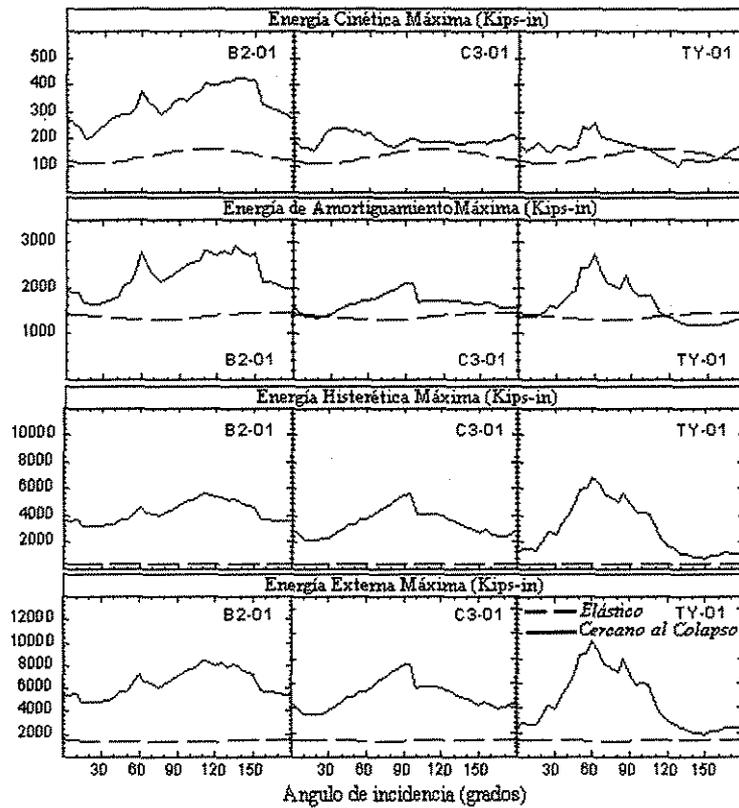


Figura 3.5. Parámetros de energía para los modelos B2-01, C3-01 y TY-01 sujetos al registro de SCT (1 Kips-in=1.1545 ton-cm).

Una observación interesante adicional es que, para el registro de SCT, la energía externa asociada al modelo traslacional TY-01 es similar a la energía elástica para ángulos de incidencia cercanos a  $150^\circ$ . Este es el ángulo de incidencia donde la componente fuerte del movimiento del terreno es perpendicular a la dirección del mecanismo predeterminado. En este caso, la mayor parte de la energía (asociada a la componente fuerte) es disipada elásticamente. Nótese que, para un ángulo de incidencia de  $60^\circ$  (componente fuerte en la dirección del mecanismo traslacional), la energía elástica demandada por la componente débil puede ser despreciada, y la energía demandada por la componente fuerte activa la disipación de energía plástica (acumulada).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### **3.3. Conclusiones**

Para analizar las características de disipación de energía de estructuras tridimensionales cercanas al colapso cuando se sujetan a movimientos del terreno bidireccionales, se diseñó una estructura tridimensional en forma de "L" de cinco niveles de acuerdo a las recomendaciones de diseño previstas en las NEHRP de 1991, como modelo de referencia. A partir de este diseño básico, se definió un grupo de sistemas (*modelos de mecanismo predeterminado*) incrementando la resistencia de algunos elementos del modelo de referencia localizados de tal forma que se produzcan los mecanismos específicos durante la respuesta. Todos los sistemas fueron sometidos a la acción de dos movimientos de terreno bidireccionales diferentes (El Centro, California, 1941 (*CEN*) y el de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, 1985 (*SCT*)), actuando a diferentes ángulos de incidencia sobre los modelos de la estructura. Para cada ángulo de incidencia, el coeficiente de diseño de cortante basal se fue reduciendo, desde un valor inicial asociado al comportamiento elástico, hasta que el colapso es inminente. El coeficiente de cortante basal asociado a este punto se le llamó *Coficiente de Colapso Dinámico* ( $C_C$ ), y se definió como el mínimo valor del coeficiente sísmico requerido para prevenir la Inestabilidad Dinámica. De este estudio, se pueden hacer las siguientes conclusiones:

Para el modelo de referencia,  $C_C$  y su mecanismo de colapso asociado son dependientes del ángulo de incidencia. Los mecanismos del modelo de referencia corresponden a aquellos asociados con los valores mínimos de la máxima capacidad de disipación de energía monotónica.

Es razonable predecir el coeficiente de colapso dinámico  $C_C$  para el modelo de referencia obteniendo el máximo  $C_C$  de todos los mecanismos predeterminados, que es más fácil de ser representado por sistemas simplificados. Esta observación muestra el potencial para predecir el coeficiente de colapso dinámico y el mecanismo que lleva a la Inestabilidad Dinámica a partir del estudio de un grupo de modelos de mecanismos predefinidos que tienen mayor potencial de ser reducidos a sistemas de un grado de libertad equivalentes.

Las energías cinética y de amortiguamiento son un límite inferior para las energías del sistema elástico correspondiente para CEN, pero son un límite superior para las energías del sistema elástico para SCT. Sin embargo, las energías histeréticas para el sistema elástico son un límite inferior de los valores de energías histeréticas asociadas a la respuesta cercana al colapso para ambos registros.

La energía total no depende significativamente de la orientación o del mecanismo para el registro CEN. Sin embargo, es fuertemente afectada por la orientación y por el mecanismo cuando los modelos se someten a la acción de SCT, que es fuertemente direccional, particularmente para mecanismos traslacionales

La energía total demandada a los modelos es similar a la demandada al modelo elástico para el registro del CEN. Sin embargo, cuando los modelos se someten a SCT, la energía demandada llega a ser mucho mayor que la elástica, debido a la gran cantidad de energía plástica disipada durante la respuesta.

**Capítulo 4**  
***Conclusiones Generales***  
***y Recomendaciones***

#### 4. Conclusiones generales y Recomendaciones

En el capítulo 2 se estudiaron *las características de la demanda de energía de entrada y de energía máxima absorbida de un marco plano de cinco niveles* obligado a desarrollar cuatro mecanismos diferentes y bajo diferentes coeficientes basales de diseño, desde el coeficiente asociado al colapso incipiente por cargas gravitacionales hasta valores del orden de 3.5 veces dicho coeficiente de colapso utilizando un conjunto de 12 grupos de sismos artificiales de diferentes características y dos registros de sismos reales.

Las conclusiones más importantes son que la energía en respuesta cercana al colapso puede ser determinada a partir de respuesta inelástica estable, excepto en sismos correspondientes a suelo blando de larga duración, donde dicha estimación puede ser considerablemente insegura. La precisión de esta estimación se va perdiendo conforme la resistencia del sistema aumenta, hasta el punto que la energía obtenida a partir de la respuesta elástica no es confiable como parámetro predictivo para la energía en respuesta cercana al colapso. Adicionalmente se pudo observar claramente que para suelos blandos, con un ancho de banda estrecho, la dependencia energética del tipo de mecanismo es más notable que cuando el terreno es firme, con un ancho de banda ancho. En este último caso, los resultados indican que la demanda energética no depende sustancialmente del mecanismo que se forme o, en otras palabras, del valor del coeficiente de estabilidad en cuestión. De esta forma, los resultados apuntan a que es factible la obtención de una energía de demanda independiente del valor del coeficiente de estabilidad. Este resultado es fundamental para poder definir una demanda energética sin necesidad de conocer el mecanismo que se vaya a generar.

Otro punto importante de análisis fue la relación entre la energía máxima en las cercanías del colapso y las energías máximas asociadas a respuesta inelástica alejadas de la condición de colapso. Los resultados enunciaron que son muy cercanas o ligeramente menor a la unidad en los casos de sismos de banda ancha y corta duración; para los sismos de banda ancha y mayor duración, también tienen una relación cercana o ligeramente mayor a la unidad. Es relevante hacer hincapié que en los sismos de periodo predominante mayor al del sistema la relación de energías es sustancialmente mayor a la unidad. Para sismos de

banda estrecha la relación fue notablemente mayor a la unidad, en específico para los sismos de periodo fundamental mayor al del sistema; nuevamente hay una excepción, en este caso para sismos de banda estrecha de corta duración y periodo fundamental menor que el del sistema, donde dicha relación es cercana o ligeramente menor a la unidad. En cuanto a las tendencias anteriores, se vio que son similares para la energía máxima absorbida y la energía relativa máxima total, no siendo así en sismos de larga duración y periodo menor o igual al del sistema. En términos generales, estas tendencias fueron similares para los diferentes mecanismos.

Fue de interés saber que para sismos de periodo similar al estructural, el mecanismo local tiene una demanda energética mayor que la del mecanismo global dado que en otros casos existe una demanda mayor del mecanismo global que la del local.

En cuanto a la relación energética colapso/elástica, siempre es menor para energías máximas totales que para energías máximas absorbidas, por lo que se puede afirmar que la energía absorbida es más cercana a la energía de entrada relativa en la respuesta cercana al colapso que en la respuesta elástica.

En general, y a partir de las observaciones, se puede decir que son aproximadamente válidas las estimaciones de las características energéticas en la respuesta cercana al colapso debido al efecto desestabilizante de las cargas verticales basadas en las características energéticas de la respuesta inelástica lejana a dicha condición, para sismos de banda ancha y corta duración. Lo que no podemos decir de los sismos de banda estrecha y gran duración dada la inseguridad de dichas estimaciones.

En el Capítulo 3, se analizaron las características de disipación de energía de estructuras tridimensionales cercanas al colapso cuando se sujetan a movimientos del terreno bidireccionales; para lo cual se diseñó una estructura tridimensional en forma de "L" de cinco niveles. Con éste, se definió un grupo de sistemas (*modelos de mecanismo predeterminado*) a los cuales se les incremento la resistencia de ciertos elementos del

modelo de referencia de tal forma que se produjeran estos mecanismos específicos durante la respuesta.

Los sistemas fueron sometidos a la acción de dos movimientos de terreno bidireccionales diferentes, que fueron El Centro, California, 1941 (*CEN*) y el de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, 1985 (*SCT*). Ambos se introdujeron a diferentes ángulos de incidencia sobre los modelos de la estructura; recordemos que para cada ángulo de incidencia, el coeficiente de diseño de cortante basal se fue reduciendo desde un valor inicial asociado al comportamiento elástico hasta que el colapso es inminente. El coeficiente de cortante basal asociado a este punto se le llamó *Coficiente de Colapso Dinámico* ( $C_C$ ), y se definió como el mínimo valor del coeficiente sísmico requerido para prevenir la Inestabilidad Dinámica.

Los resultados permiten concluir que, en primer lugar, en el modelo de referencia,  $C_C$  y su mecanismo de colapso asociado son dependientes del ángulo de incidencia. Se debe acotar que los mecanismos del modelo de referencia corresponden a aquellos asociados con los valores mínimos de la máxima capacidad de disipación de energía monotónica.

Es razonable predecir el coeficiente de colapso dinámico  $C_C$  para el modelo de referencia obteniendo el máximo  $C_C$  de todos los mecanismos predeterminados, que es más fácil de ser representado por sistemas simplificados. Esta observación muestra el potencial para predecir el coeficiente de colapso dinámico y el mecanismo que lleva a la Inestabilidad Dinámica a partir del estudio de un grupo de modelos de mecanismos predefinidos que tienen mayor potencial de ser reducidos a sistemas de un grado de libertad equivalentes.

Las energías cinética y de amortiguamiento son un límite inferior para las energías del sistema elástico correspondiente para *CEN*, pero son un límite superior para las energías del sistema elástico para *SCT*. Sin embargo, las energías histeréticas para el sistema elástico son un límite inferior de los valores de energías histeréticas asociadas a la respuesta cercana al colapso para ambos registros.

Se sabe que la energía total no tiene una relación estrecha de orientación o del mecanismo para el registro CEN; pero sí la afecta fuertemente dada la orientación y el tipo de mecanismo cuando los modelos se someten a la acción de SCT, que es significativamente direccional, en específico para mecanismos traslacionales.

Se pudo observar también que la energía total demandada a los modelos es muy parecida a la demandada al modelo elástico para el registro del CEN. Sin embargo, cuando los modelos se someten a SCT, la energía demandada, debido a la gran cantidad de energía plástica disipada durante la respuesta, llega a ser mucho mayor que la elástica.

**Referencias bibliográficas**

Bernal, D. (1992), "Instability of buildings subjected to earthquakes", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, v118, 8, pp. 2239-2260

Bernal, D. (1998), "Instability of buildings during seismic response", *Engineering Structures*, 20, 4-6, pp. 496-502

Bertero, R.D. Bertero, V.V. y Terán-Gilmore, A. (1996), "Performance-based earthquake-resistant design based on comprehensive design philosophy and energy concepts", *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, Disc 2, Paper No. 611

De Stefano, M. y Rutenberg, A. (1999), "Seismic stability and the force reduction factor of code-designed one-storey asymmetric structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, v28, 7, pp. 785-803

Hodder, S.B. (1983), "Computer processing of New Zealand strong-motion accelerograms", *Proceedings of the Third South Pacific Regional Conference on Earthquake Engineering*, Vol 1, Nueva Zelanda.

Housner, G.W. (1956), "Limit Design of Structures to Resist Earthquakes", *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley, California, pp. 5.1-5.13.

Morino, S. y Uchida, Y. (1980), "Dynamic Response of Steel Space Frames under Earthquake Excitation in Horizontal Arbitrary Direction", *Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey, v5, pp. 439-442.

Nakajima, A., Abe, H. y Kuranishi, S. (1990), "Effect of Multiple Collapse Modes on Dynamic Failure of Structures with Structural Instability", *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, No 416, pp. 13-23.

Departamento del Distrito Federal, *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*, (1992), Reglamento de Construcciones del DF, México.

Shibata, A., Onose, J. y Shiga, T. (1969), "Torsional Response of Buildings to Strong Earthquake Motions", *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago de Chile, Chile, A-4, pp. 123-138.

Sordo, E. y Bernal, D. (1992), "Effect of Torsional Coupling on the Stability of Structures", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, España, v7, pp. 3859-3864.

Sordo, E. y Bernal, D. (1993), "Influencia del Mecanismo de Falla en la Seguridad contra Colapso Dinámico", *Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Puerto Vallarta, México.

Sordo, E. y Bernal, D. (1994), "Dynamic instability in three dimensional structures", *Report No. CE-94-14*, Civil Engineering Department, Northeastern University, Boston, EUA.

Sordo, E. y Bernal, D. (1996), "Dynamic instability phenomenon in bidirectional systems", *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Disc 1, Paper No. 327, Acapulco, México.

Teran, A (1996), "Performance-based earthquake-resistant design of framed buildings using energy concepts", Ph. D Thesis, University of California at Berkeley, California, EUA.

Tung, A.T.Y., Kiremidjian, A.S., Wang, J.N. y Kavazanjian, E. (1992), "Statistical parameters of AM and PSD functions for the generation of site-specific strong ground motions", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 867-872

Uang, C.M. y Bertero, V.V. (1988), "Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design", *UCB/EERC-88/18*, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, California, EUA.

Prakash, V., Powell, G.H. y Campbell, S., "Drain 2-dx Base Program Description and User Guide", versión 1.10, noviembre, 1993.

## INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1. Características de los sismos artificiales utilizados en este estudio	2-3
Tabla 2.2. Propiedades del modelo de referencia	2-5
Tabla 2.3. Cocientes de energía en el colapso entre energía para sistema más resistente en 33%	2-7
Tabla 2.4. Cocientes de energía en el colapso entre energía para sistema más resistente en 100%	2-8
Tabla 2.5. Cocientes de energía en el colapso entre energía para sistema muy resistente (elástico)	2-9
Tabla 2.6. Raíz cuadrada de las energías máximas en respuesta cercana al colapso	2-10
Tabla 2.7. Cociente entre la energía máxima total normalizada a la máxima total en comportamiento elástico y la energía máxima absorbida normalizada a la máxima absorbida en comportamiento elástico	2-11
Tabla 3.1. Modelos de mecanismo predeterminado, y las capacidades de disipación de energía monotónica asociadas	3-6
Tabla 3.2. Coeficientes de colapso dinámico y mecanismos de colapso asociados, para el modelo de referencia	3-9

## INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Ilustración del problema de la Inestabilidad Dinámica	1-2
Figura 1.2 Caracterización de un Sistema de Un Grado de Libertad (SUGL)	1-2
Figura 1.3a Modelo de Marco Plano de 5 Niveles	1-4
Figura 1.3b Mecanismo de Planta Baja (Local)	1-4
Figura 1.3c Mecanismo de Vigas y Columnas (Global)	1-4
Figura 1.4. Comportamiento del marco plano en función del tipo de mecanismo desarrollado, considerando el efecto P- $\delta$	1-4
Figura 1.5. Efecto de la carga vertical y del mecanismo desarrollado durante la respuesta	1-5
Figura 1.6. Mecanismo rotacional en una estructura tridimensional	1-6
Figura 1.7. Gráfica Momento – Curvatura de una sección rectangular sin esfuerzos residuales	1-11
Figura 2.1. Características generales del modelo de referencia considerado en este estudio	2-4
Figura 2.2. Modelos de mecanismo predeterminado utilizados en este estudio	2-5
Figura 3.1. Características generales del modelo de referencia considerado en este estudio	3-5
Figura 3.2. Coeficientes de colapso dinámico ( $C_c$ ) para los modelos de referencia y de mecanismo predeterminado	3-8
Figura 3.3 (a) $C_c$ para el modelo de mecanismo predeterminado correspondiente al observado en el modelo de referencia ( $C_{CIM(R)}$ ), normalizado al máximo valor de $C_c$ para cualquier mecanismo predeterminado en el mismo ángulo de incidencia ( $C_{CIM\ max}$ )	3-11
Figura 3.3 (b) $C_c$ para el modelo de mecanismo predeterminado correspondiente al observado en el modelo de referencia ( $C_{CIM(R)}$ ), normalizado al valor de $C_c$ correspondiente al modelo de referencia ( $C_{CR}$ ) en el mismo ángulo de incidencia	3-11
Figura 3.4. Parámetros de energía para los modelos B2-01, C3-01 y TY-01 sujetos al registro del CEN	3-13
Figura 3.5. Parámetros de energía para los modelos B2-01, C3-01 y TY-01 sujetos al registro de SCT	3-14
Figura A.1. Energías máximas absorbidas promedio normalizadas a la energía máxima absorbida asociada al colapso, para sismos artificiales	AA-9

Figura A.2. Energías totales (de entrada) máximas promedio normalizadas a la energía máxima asociada al colapso, para sismos artificiales AA-10

Figura A.3. Energías máximas absorbidas y totales máximas promedio normalizadas a la energía máxima absorbidas y total máxima, respectivamente, asociada al colapso, para dos componentes ortogonales (NS y EO) de los registros CEN y SCT AA-11

**Tabla A.1. Grupo de Sismos S04, 10 segs, Suelo**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.412	0.939	0.954	1.197	1.210	1.087	0.949	0.893	1.028	1.053
1.10	1.444	0.957	0.966	1.207	1.233	1.098	0.951	0.898	1.024	1.056
1.21	1.483	0.977	0.988	1.221	1.259	1.117	0.956	0.906	1.025	1.063
1.33	1.520	0.995	1.010	1.232	1.286	1.136	0.960	0.915	1.024	1.072
1.46	1.551	1.011	1.031	1.245	1.311	1.154	0.967	0.926	1.025	1.082
1.61	1.579	1.028	1.051	1.257	1.333	1.170	0.975	0.938	1.029	1.091
1.77	1.601	1.042	1.068	1.268	1.353	1.186	0.982	0.948	1.033	1.100
1.95	1.619	1.055	1.082	1.277	1.371	1.198	0.990	0.959	1.037	1.109
2.14	1.630	1.067	1.092	1.283	1.388	1.207	0.997	0.967	1.042	1.115
2.36	1.632	1.076	1.100	1.286	1.400	1.212	1.003	0.975	1.046	1.120
2.59	1.622	1.083	1.106	1.283	1.409	1.212	1.008	0.980	1.048	1.124
2.85	1.597	1.086	1.114	1.278	1.415	1.204	1.013	0.985	1.050	1.127
3.14	1.563	1.087	1.119	1.272	1.421	1.192	1.017	0.991	1.052	1.131

**Tabla A.2. Grupo de Sismos S04, 10 segs, Roca**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.224	1.355	1.283	1.172	1.174	0.843	1.024	0.915	0.840	0.838
1.10	1.261	1.373	1.307	1.206	1.207	0.858	1.017	0.922	0.854	0.849
1.21	1.299	1.397	1.339	1.241	1.239	0.876	1.021	0.935	0.869	0.863
1.33	1.335	1.418	1.370	1.276	1.272	0.894	1.027	0.951	0.885	0.877
1.46	1.371	1.436	1.398	1.309	1.306	0.913	1.033	0.965	0.902	0.894
1.61	1.407	1.451	1.423	1.343	1.341	0.933	1.039	0.978	0.920	0.912
1.77	1.443	1.462	1.448	1.376	1.376	0.953	1.045	0.992	0.939	0.929
1.95	1.478	1.467	1.469	1.409	1.409	0.973	1.049	1.005	0.957	0.947
2.14	1.511	1.464	1.487	1.438	1.441	0.992	1.051	1.017	0.974	0.964
2.36	1.538	1.453	1.499	1.464	1.469	1.009	1.048	1.027	0.989	0.980
2.59	1.560	1.435	1.504	1.486	1.493	1.024	1.045	1.033	1.003	0.993
2.85	1.575	1.411	1.502	1.507	1.519	1.035	1.039	1.038	1.017	1.008
3.14	1.588	1.378	1.493	1.523	1.541	1.045	1.032	1.040	1.029	1.021

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla A.3. Grupo de Sismos S08, 10 segs, Suelo**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	0.699	0.943	0.867	0.678	0.703	0.453	0.648	0.553	0.452	0.455
1.10	0.725	0.974	0.898	0.706	0.728	0.466	0.663	0.571	0.465	0.467
1.21	0.753	1.004	0.928	0.734	0.754	0.482	0.680	0.591	0.481	0.482
1.33	0.782	1.034	0.959	0.763	0.782	0.498	0.699	0.609	0.497	0.497
1.46	0.812	1.064	0.988	0.791	0.811	0.516	0.717	0.628	0.514	0.514
1.61	0.841	1.093	1.017	0.820	0.839	0.533	0.735	0.647	0.530	0.530
1.77	0.871	1.120	1.046	0.849	0.869	0.550	0.753	0.668	0.548	0.548
1.95	0.901	1.144	1.075	0.879	0.899	0.568	0.771	0.689	0.566	0.566
2.14	0.932	1.167	1.103	0.909	0.930	0.587	0.789	0.711	0.584	0.585
2.36	0.962	1.189	1.130	0.939	0.960	0.607	0.806	0.734	0.603	0.604
2.59	0.993	1.209	1.156	0.969	0.991	0.628	0.823	0.758	0.623	0.624
2.85	1.025	1.226	1.180	0.998	1.022	0.649	0.840	0.781	0.643	0.646
3.14	1.056	1.239	1.202	1.028	1.053	0.671	0.855	0.806	0.665	0.667

**Tabla A.4. Grupo de Sismos S08, 10 segs, Roca**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.097	1.167	1.129	1.068	1.039	0.825	0.965	0.871	0.818	0.800
1.10	1.104	1.179	1.137	1.083	1.054	0.824	0.961	0.871	0.822	0.804
1.21	1.122	1.201	1.153	1.107	1.077	0.834	0.971	0.879	0.834	0.814
1.33	1.141	1.225	1.173	1.130	1.102	0.845	0.983	0.891	0.847	0.828
1.46	1.163	1.245	1.195	1.154	1.127	0.859	0.996	0.906	0.861	0.842
1.61	1.188	1.264	1.217	1.179	1.151	0.875	1.008	0.920	0.877	0.856
1.77	1.213	1.278	1.239	1.206	1.175	0.892	1.018	0.936	0.896	0.871
1.95	1.237	1.291	1.260	1.232	1.200	0.910	1.028	0.952	0.914	0.887
2.14	1.259	1.300	1.278	1.257	1.224	0.927	1.038	0.968	0.933	0.904
2.36	1.279	1.306	1.293	1.279	1.249	0.944	1.048	0.982	0.952	0.923
2.59	1.295	1.307	1.304	1.298	1.271	0.959	1.058	0.995	0.969	0.940
2.85	1.307	1.302	1.311	1.311	1.290	0.974	1.063	1.008	0.983	0.956
3.14	1.316	1.291	1.315	1.322	1.306	0.986	1.069	1.020	0.996	0.971

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla A.5. Grupo de Sismos S16, 10 segs, Suelo**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	3.237	2.815	3.180	3.226	3.009	3.020	2.851	2.952	3.056	2.965
1.10	3.177	2.705	3.049	3.204	3.071	2.930	2.702	2.802	2.989	2.959
1.21	3.112	2.643	2.951	3.152	3.116	2.853	2.616	2.696	2.914	2.963
1.33	3.053	2.541	2.837	3.070	3.148	2.788	2.491	2.587	2.820	2.969
1.46	2.980	2.444	2.669	2.989	3.162	2.714	2.377	2.441	2.737	2.967
1.61	2.871	2.354	2.435	2.896	3.162	2.613	2.271	2.245	2.649	2.960
1.77	2.736	2.265	2.172	2.787	3.148	2.490	2.164	2.029	2.550	2.945
1.95	2.614	2.160	1.956	2.652	3.124	2.377	2.049	1.858	2.427	2.909
2.14	2.495	2.040	1.822	2.511	3.073	2.271	1.932	1.751	2.300	2.846
2.36	2.357	1.904	1.734	2.349	3.013	2.150	1.809	1.673	2.163	2.779
2.59	2.166	1.742	1.660	2.155	2.942	1.983	1.668	1.614	2.004	2.709
2.85	1.921	1.609	1.596	1.930	2.836	1.786	1.551	1.552	1.819	2.606
3.14	1.696	1.492	1.523	1.731	2.664	1.611	1.440	1.483	1.669	2.451

**Tabla A.6. Grupo de Sismos S16, 10 segs, Roca**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.637	1.563	1.624	1.566	1.530	1.406	1.487	1.417	1.363	1.353
1.10	1.629	1.542	1.623	1.578	1.534	1.376	1.446	1.398	1.355	1.330
1.21	1.640	1.556	1.640	1.591	1.557	1.376	1.441	1.401	1.354	1.334
1.33	1.655	1.573	1.668	1.605	1.581	1.382	1.440	1.417	1.359	1.344
1.46	1.674	1.586	1.691	1.624	1.600	1.393	1.436	1.431	1.367	1.352
1.61	1.695	1.592	1.711	1.646	1.616	1.406	1.428	1.444	1.380	1.358
1.77	1.716	1.589	1.723	1.670	1.632	1.420	1.416	1.452	1.396	1.366
1.95	1.733	1.581	1.721	1.690	1.651	1.432	1.404	1.449	1.411	1.378
2.14	1.738	1.567	1.708	1.702	1.674	1.437	1.388	1.440	1.422	1.392
2.36	1.728	1.547	1.682	1.700	1.692	1.434	1.370	1.425	1.424	1.406
2.59	1.702	1.520	1.649	1.682	1.701	1.420	1.351	1.406	1.416	1.414
2.85	1.666	1.482	1.606	1.651	1.695	1.401	1.329	1.384	1.402	1.414
3.14	1.623	1.434	1.555	1.616	1.675	1.381	1.303	1.359	1.386	1.405

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla A.7. Grupo de Sismos S04, 30 segs, Suelo**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	2.533	1.600	1.731	1.972	2.381	1.232	1.021	1.015	1.065	1.197
1.10	2.470	1.545	1.675	1.912	2.303	1.220	1.009	1.007	1.056	1.180
1.21	2.401	1.511	1.638	1.866	2.229	1.207	1.008	1.005	1.052	1.165
1.33	2.326	1.475	1.605	1.815	2.150	1.193	1.009	1.008	1.047	1.150
1.46	2.234	1.433	1.564	1.756	2.064	1.176	1.009	1.011	1.044	1.136
1.61	2.123	1.387	1.517	1.699	1.968	1.156	1.010	1.014	1.042	1.121
1.77	2.002	1.341	1.464	1.636	1.861	1.136	1.011	1.016	1.040	1.106
1.95	1.869	1.288	1.402	1.570	1.748	1.116	1.012	1.017	1.040	1.093
2.14	1.732	1.234	1.335	1.495	1.632	1.099	1.011	1.018	1.040	1.082
2.36	1.603	1.187	1.268	1.414	1.515	1.086	1.010	1.018	1.037	1.072
2.59	1.480	1.141	1.200	1.332	1.409	1.075	1.008	1.017	1.034	1.063
2.85	1.373	1.099	1.138	1.255	1.315	1.065	1.006	1.014	1.030	1.055
3.14	1.283	1.065	1.090	1.186	1.231	1.056	1.002	1.010	1.026	1.046

**Tabla A.8. Grupo de Sismos S04, 30 segs, Roca**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.567	1.423	1.486	1.526	1.523	0.954	0.975	0.951	0.952	0.938
1.10	1.538	1.404	1.466	1.501	1.515	0.943	0.968	0.948	0.943	0.936
1.21	1.523	1.394	1.454	1.487	1.510	0.942	0.967	0.948	0.943	0.937
1.33	1.507	1.387	1.438	1.473	1.500	0.941	0.969	0.949	0.943	0.938
1.46	1.492	1.377	1.424	1.459	1.487	0.942	0.971	0.952	0.944	0.939
1.61	1.475	1.363	1.408	1.444	1.473	0.944	0.972	0.956	0.947	0.940
1.77	1.459	1.346	1.390	1.427	1.458	0.947	0.973	0.959	0.950	0.942
1.95	1.445	1.322	1.371	1.411	1.443	0.952	0.973	0.962	0.955	0.946
2.14	1.428	1.293	1.351	1.395	1.431	0.957	0.971	0.965	0.960	0.951
2.36	1.411	1.260	1.324	1.377	1.416	0.960	0.969	0.967	0.964	0.956
2.59	1.386	1.223	1.286	1.352	1.397	0.962	0.969	0.967	0.965	0.960
2.85	1.356	1.188	1.239	1.316	1.373	0.964	0.970	0.966	0.966	0.962
3.14	1.317	1.154	1.187	1.269	1.340	0.964	0.971	0.966	0.965	0.962

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla A.9. Grupo de Sismos S08, 30 segs, Suelo**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.319	1.554	1.506	1.373	1.233	0.564	0.733	0.677	0.599	0.526
1.10	1.354	1.565	1.527	1.405	1.269	0.582	0.746	0.697	0.619	0.544
1.21	1.389	1.581	1.549	1.435	1.306	0.602	0.764	0.718	0.640	0.562
1.33	1.424	1.592	1.568	1.465	1.343	0.622	0.780	0.740	0.661	0.581
1.46	1.459	1.600	1.583	1.492	1.380	0.643	0.799	0.763	0.683	0.602
1.61	1.491	1.603	1.593	1.516	1.416	0.666	0.817	0.785	0.705	0.622
1.77	1.522	1.599	1.596	1.536	1.451	0.688	0.836	0.807	0.728	0.643
1.95	1.549	1.588	1.592	1.552	1.484	0.711	0.855	0.830	0.752	0.665
2.14	1.572	1.570	1.577	1.563	1.515	0.734	0.874	0.851	0.775	0.687
2.36	1.591	1.545	1.554	1.567	1.544	0.758	0.893	0.873	0.798	0.710
2.59	1.602	1.509	1.523	1.563	1.568	0.782	0.911	0.894	0.821	0.732
2.85	1.607	1.466	1.483	1.553	1.588	0.806	0.928	0.913	0.843	0.756
3.14	1.602	1.411	1.434	1.535	1.601	0.829	0.945	0.932	0.865	0.778

**Tabla A.10. Grupo de Sismos S08, 30 segs, Roca**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.807	1.807	1.876	1.779	1.754	1.008	1.096	1.067	1.006	0.982
1.10	1.828	1.780	1.875	1.803	1.774	1.018	1.086	1.069	1.019	0.993
1.21	1.856	1.761	1.876	1.828	1.801	1.034	1.085	1.073	1.032	1.008
1.33	1.868	1.736	1.872	1.853	1.830	1.044	1.084	1.076	1.045	1.024
1.46	1.877	1.696	1.861	1.871	1.855	1.052	1.078	1.077	1.057	1.040
1.61	1.879	1.652	1.841	1.881	1.873	1.059	1.072	1.077	1.066	1.053
1.77	1.871	1.606	1.811	1.881	1.879	1.063	1.066	1.075	1.071	1.062
1.95	1.849	1.550	1.770	1.872	1.873	1.063	1.060	1.070	1.074	1.067
2.14	1.810	1.490	1.714	1.850	1.853	1.059	1.056	1.061	1.074	1.067
2.36	1.759	1.422	1.653	1.815	1.815	1.051	1.051	1.054	1.071	1.062
2.59	1.697	1.349	1.588	1.762	1.763	1.041	1.045	1.049	1.063	1.054
2.85	1.630	1.285	1.516	1.700	1.704	1.033	1.040	1.044	1.055	1.044
3.14	1.563	1.229	1.440	1.634	1.640	1.029	1.036	1.039	1.048	1.036

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla A.11.** Grupo de Sismos S16, 30 segs, Suelo  
( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	5.507	4.356	5.412	5.543	5.805	4.063	3.398	4.020	4.111	4.304
1.10	5.135	3.998	5.005	5.254	5.650	3.787	3.111	3.704	3.894	4.172
1.21	4.673	3.618	4.564	4.864	5.416	3.463	2.825	3.385	3.616	3.994
1.33	4.104	3.219	4.034	4.401	5.063	3.075	2.534	3.009	3.293	3.740
1.46	3.522	2.833	3.489	3.953	4.635	2.686	2.258	2.630	2.982	3.438
1.61	2.941	2.483	2.980	3.474	4.121	2.303	2.006	2.281	2.656	3.088
1.77	2.423	2.123	2.487	2.993	3.597	1.958	1.754	1.938	2.330	2.737
1.95	1.899	1.773	2.056	2.568	3.080	1.605	1.521	1.642	2.033	2.390
2.14	1.457	1.491	1.694	2.075	2.600	1.306	1.334	1.395	1.687	2.054
2.36	1.218	1.313	1.417	1.646	2.078	1.147	1.219	1.227	1.399	1.693
2.59	1.095	1.208	1.234	1.360	1.649	1.068	1.138	1.125	1.216	1.402
2.85	1.047	1.098	1.138	1.176	1.360	1.036	1.069	1.077	1.106	1.216
3.14	1.048	1.052	1.091	1.091	1.176	1.032	1.038	1.053	1.056	1.106

**Tabla A.12.** Grupo de Sismos S16, 30 segs, Roca  
( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	2.434	2.059	2.306	2.466	2.416	1.575	1.427	1.509	1.603	1.583
1.10	2.345	1.928	2.148	2.385	2.370	1.514	1.346	1.421	1.544	1.547
1.21	2.305	1.850	2.048	2.325	2.344	1.487	1.305	1.370	1.501	1.521
1.33	2.261	1.776	1.960	2.270	2.312	1.462	1.269	1.329	1.470	1.495
1.46	2.205	1.697	1.869	2.212	2.281	1.431	1.234	1.288	1.440	1.475
1.61	2.154	1.617	1.771	2.120	2.245	1.404	1.203	1.249	1.394	1.455
1.77	2.032	1.528	1.677	1.980	2.191	1.346	1.172	1.212	1.327	1.426
1.95	1.873	1.440	1.579	1.867	2.113	1.274	1.142	1.177	1.278	1.386
2.14	1.747	1.351	1.479	1.752	2.024	1.221	1.114	1.144	1.228	1.345
2.36	1.626	1.259	1.369	1.641	1.904	1.173	1.086	1.111	1.184	1.289
2.59	1.518	1.174	1.259	1.542	1.775	1.135	1.063	1.079	1.149	1.234
2.85	1.435	1.115	1.164	1.449	1.646	1.110	1.046	1.054	1.121	1.182
3.14	1.368	1.069	1.102	1.372	1.532	1.093	1.034	1.036	1.098	1.141

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla A.13. Registro de Sismo SCT-NS**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	4.317	2.812	4.526	5.273	5.930	2.465	1.741	2.586	2.980	3.347
1.10	3.461	2.281	3.438	4.241	5.096	2.028	1.500	2.023	2.426	2.884
1.21	2.653	1.942	2.620	3.427	4.188	1.647	1.349	1.633	2.012	2.398
1.33	2.140	1.621	2.097	2.644	3.330	1.420	1.225	1.402	1.643	1.965
1.46	1.754	1.329	1.721	2.122	2.598	1.262	1.124	1.251	1.412	1.621
1.61	1.420	1.097	1.402	1.743	2.120	1.146	1.056	1.142	1.259	1.411
1.77	1.141	1.027	1.129	1.416	1.742	1.065	1.021	1.063	1.145	1.259
1.95	1.027	1.021	1.027	1.141	1.416	1.021	1.008	1.021	1.065	1.145
2.14	1.021	1.024	1.021	1.027	1.141	1.008	1.007	1.008	1.021	1.065
2.36	1.024	1.000	1.024	1.021	1.027	1.007	1.000	1.007	1.008	1.021
2.59	1.000	1.000	1.000	1.024	1.021	1.000	1.000	1.000	1.007	1.008
2.85	1.000	1.000	1.000	1.000	1.024	1.000	1.000	1.000	1.000	1.007
3.14	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

**Tabla A.14. Registro de Sismo SCT-EO**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	4.359	3.504	4.166	4.748	5.036	2.951	2.471	2.845	3.245	3.442
1.10	3.926	3.148	3.761	4.285	4.658	2.653	2.212	2.561	2.910	3.162
1.21	3.442	2.729	3.249	3.851	4.293	2.333	1.924	2.223	2.609	2.905
1.33	2.802	2.335	2.679	3.365	3.905	1.939	1.678	1.876	2.288	2.638
1.46	2.139	1.991	2.066	2.728	3.428	1.559	1.477	1.519	1.897	2.324
1.61	1.646	1.694	1.609	2.111	2.786	1.305	1.326	1.290	1.545	1.931
1.77	1.316	1.459	1.310	1.637	2.105	1.148	1.205	1.148	1.302	1.539
1.95	1.176	1.297	1.173	1.314	1.632	1.077	1.128	1.077	1.151	1.298
2.14	1.075	1.169	1.072	1.175	1.315	1.030	1.075	1.030	1.077	1.148
2.36	1.018	1.072	1.018	1.074	1.176	1.005	1.030	1.005	1.030	1.077
2.59	1.010	1.018	1.010	1.018	1.075	1.001	1.005	1.001	1.005	1.030
2.85	1.013	1.010	1.013	1.010	1.018	1.002	1.001	1.002	1.001	1.005
3.14	1.000	1.013	1.000	1.013	1.010	1.000	1.002	1.000	1.002	1.001

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

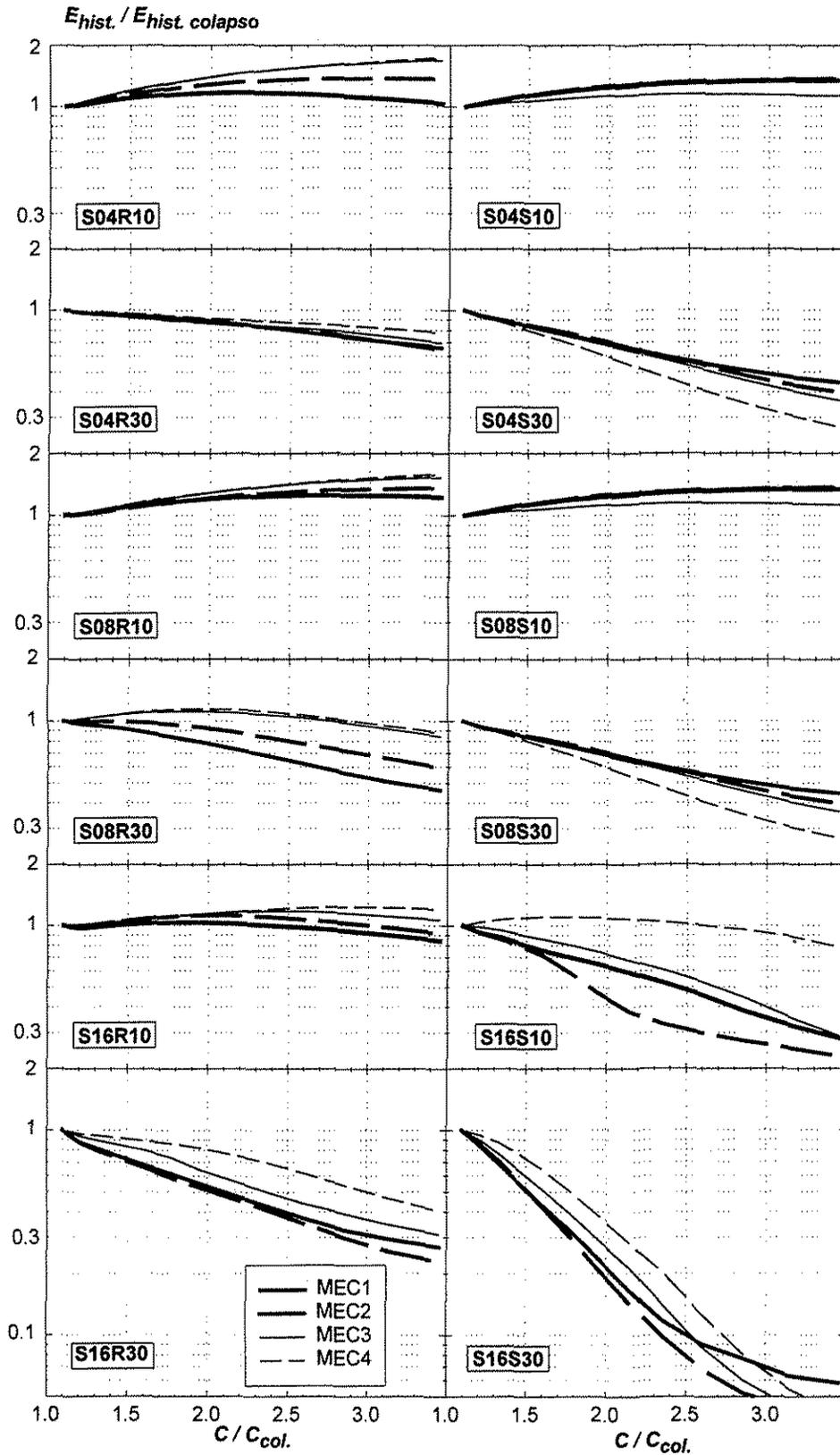
**Tabla A.15. Registro de Sismo CEN-NS**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.318	1.337	1.338	1.286	1.182	0.840	0.944	0.895	0.837	0.761
1.10	1.331	1.351	1.344	1.301	1.228	0.854	0.953	0.907	0.851	0.785
1.21	1.345	1.370	1.360	1.316	1.252	0.868	0.969	0.922	0.865	0.797
1.33	1.359	1.385	1.375	1.332	1.266	0.883	0.985	0.940	0.880	0.807
1.46	1.372	1.395	1.388	1.348	1.277	0.898	1.000	0.957	0.897	0.816
1.61	1.385	1.399	1.396	1.364	1.290	0.914	1.015	0.973	0.914	0.827
1.77	1.395	1.400	1.401	1.377	1.305	0.930	1.028	0.988	0.931	0.839
1.95	1.405	1.399	1.405	1.390	1.319	0.947	1.040	1.005	0.947	0.853
2.14	1.413	1.401	1.415	1.399	1.335	0.963	1.053	1.022	0.964	0.867
2.36	1.418	1.409	1.424	1.405	1.346	0.980	1.065	1.038	0.979	0.881
2.59	1.424	1.412	1.429	1.409	1.359	0.997	1.077	1.054	0.996	0.895
2.85	1.435	1.409	1.424	1.420	1.372	1.015	1.087	1.067	1.013	0.910
3.14	1.448	1.392	1.406	1.429	1.385	1.033	1.092	1.076	1.029	0.927

**Tabla A.16. Registro de Sismo CEN-EO**  
 ( ENERGÍA / ENERGÍA EN RESPUESTA ELÁSTICA ) ^ 0.5

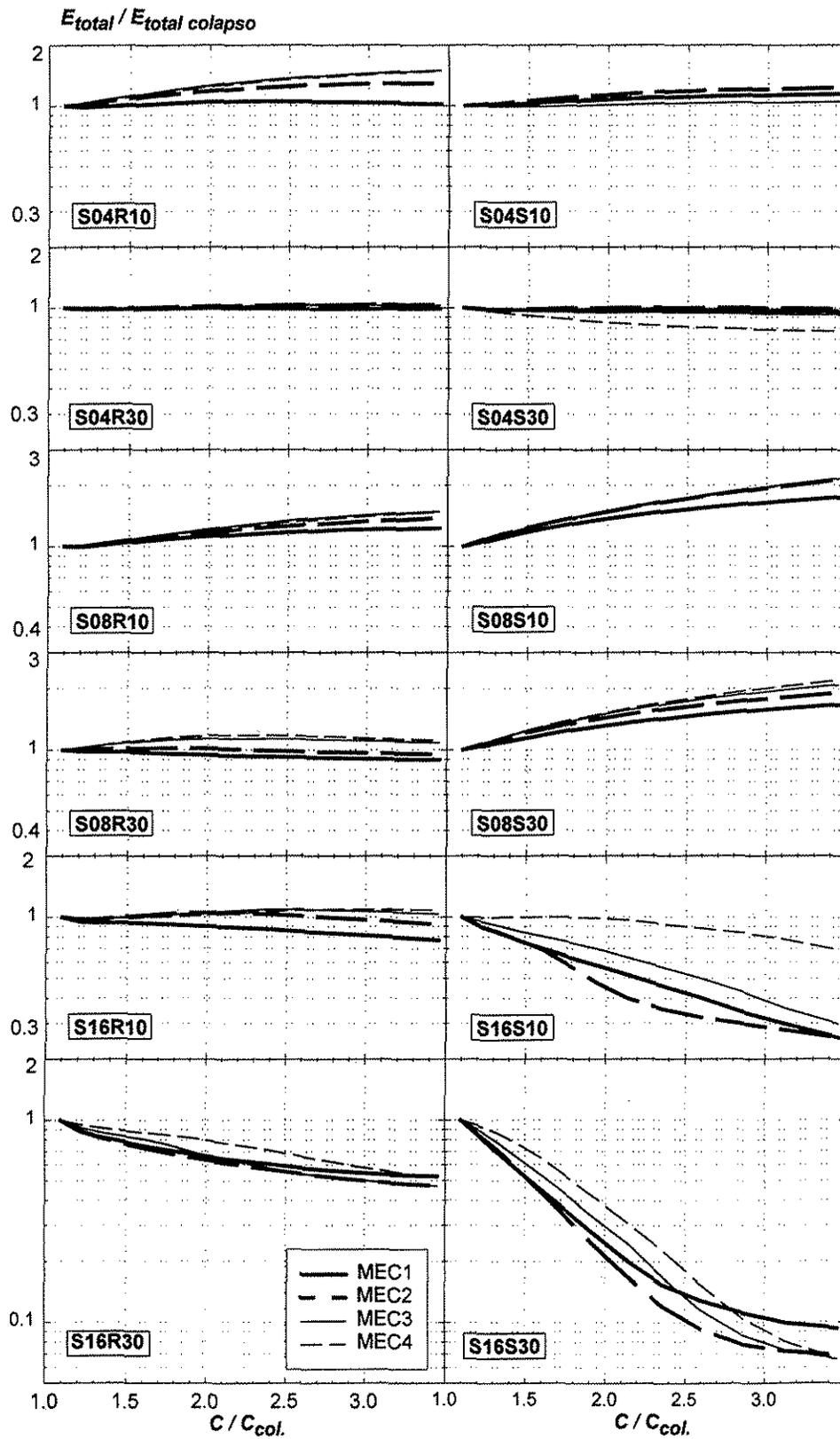
C/C <sub>col</sub>	MÁXIMA ABSORBIDA					TOTAL				
	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4	LIBRE	MEC1	MEC2	MEC3	MEC4
1.00	1.461	1.246	1.348	1.452	1.412	0.941	0.914	0.917	0.956	0.922
1.10	1.408	1.230	1.344	1.396	1.480	0.915	0.910	0.916	0.928	0.957
1.21	1.376	1.226	1.338	1.363	1.489	0.905	0.917	0.915	0.914	0.961
1.33	1.351	1.228	1.329	1.340	1.458	0.898	0.925	0.914	0.908	0.944
1.46	1.329	1.232	1.310	1.314	1.425	0.894	0.935	0.908	0.901	0.928
1.61	1.303	1.239	1.287	1.284	1.391	0.892	0.949	0.904	0.895	0.916
1.77	1.279	1.243	1.268	1.259	1.374	0.894	0.962	0.904	0.894	0.911
1.95	1.261	1.243	1.250	1.240	1.351	0.900	0.975	0.906	0.899	0.904
2.14	1.253	1.237	1.239	1.234	1.326	0.912	0.986	0.913	0.910	0.898
2.36	1.249	1.222	1.235	1.234	1.301	0.926	0.995	0.924	0.925	0.895
2.59	1.241	1.199	1.235	1.229	1.277	0.939	1.001	0.937	0.940	0.896
2.85	1.230	1.180	1.232	1.221	1.258	0.952	1.003	0.951	0.953	0.901
3.14	1.216	1.154	1.222	1.209	1.252	0.965	1.003	0.962	0.965	0.914

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



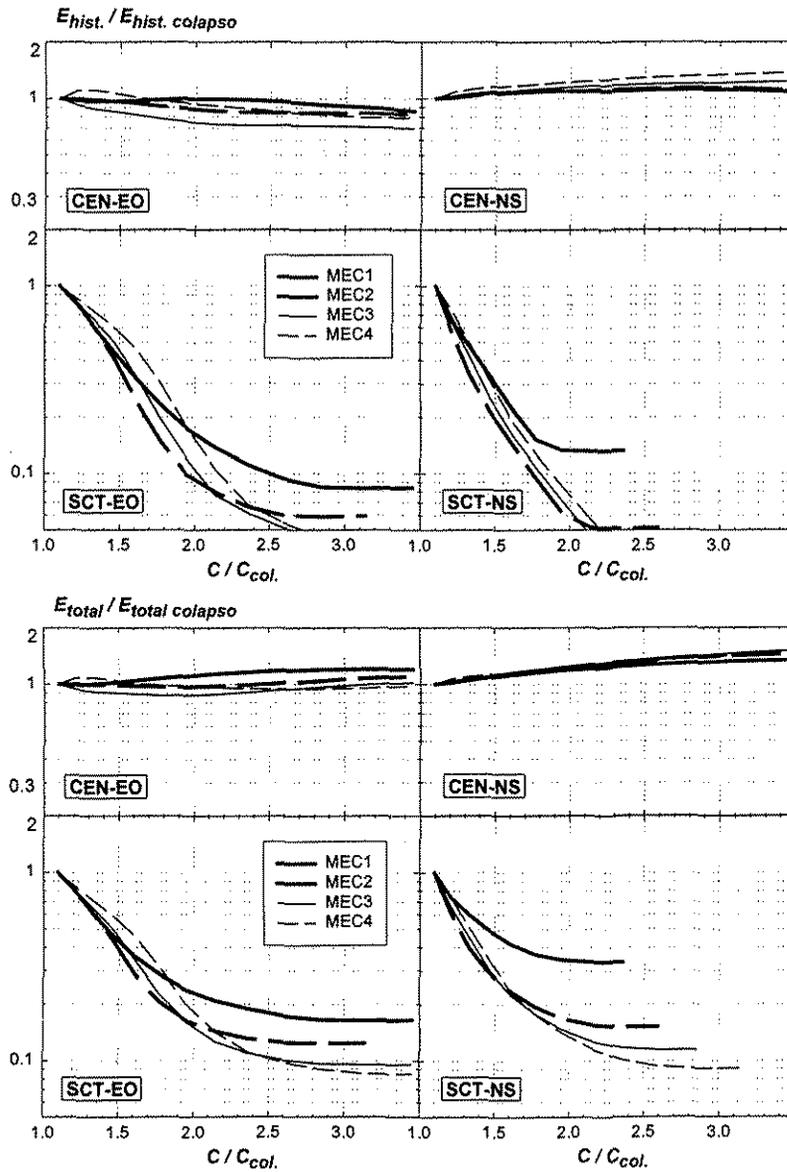
TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

**Figura A.1.** Energías máximas absorbidas promedio normalizadas a la energía máxima asociada al colapso, para sismos artificiales.



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura A.2. Energías totales (de entrada) máximas promedio normalizadas a la energía máxima asociada al colapso, para sismos artificiales.



**Figura A.3.** Energías máximas absorbidas y totales máximas promedio normalizadas a la energía máxima absorbida y total máxima, respectivamente, asociada al colapso, para dos componentes ortogonales (NS y EO) de los registros CEN y SCT.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En el Capítulo 3 se empleo adicionalmente al modelo de referencia tridimensional de 5 niveles en forma de "L", descrito en el mismo capítulo, 8 modelos de mecanismos predeterminados los cuales fueron:

**Tabla A.17.** Descripción de los Mecanismo Predeterminados  
Modelo Estructura Tridimensional

Mecanismo	Descripción del Mecanismo
Ty-02	Mecanismo de base a nivel 2 y traslacional en dirección Y
Ty-01	Mecanismo de base a nivel 1 y traslacional en dirección Y
Tx-02	Mecanismo de base a nivel 2 y traslacional en dirección X
Tx-01	Mecanismo de base a nivel 1 y traslacional en dirección X
C3-02	Mecanismo de base a nivel 2 y rotando en la intersección de los ejes C y 3
C3-01	Mecanismo de base a nivel 1 y rotando en la intersección de los ejes C y 3
B2-02	Mecanismo de base a nivel 2 y rotando en la intersección de los ejes B y 2
B2-01	Mecanismo de base a nivel 1 y rotando en la intersección de los ejes B y 2

En las tablas que se encuentran a continuación se muestran los valores de los Coeficientes de Colapso Dinámico para cada uno de los diferentes modelos empleados en el estudio, asociados a cada una de las direcciones de análisis para los dos registros utilizados ("El Centro" y "SCT").

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla A.18.** Coeficientes de Colapso Dinámico para cada una de las orientaciones del sismo y para cada uno de los modelos analizados.

SISMO DE "EL CENTRO"

Coeficientes de Colapso Dinámico Cc

ORIENTACION	MODELO REFERENCIA	MECANISMOS PREDETERMINADOS							
		Ty-02	Ty-01	Tx-02	Tx-01	C3-02	C3-01	B2-02	B2-01
0	0.065	0.044	0.059	0.054	0.059	0.044	0.065	0.028	0.033
5	0.071	0.044	0.059	0.049	0.065	0.044	0.071	0.037	0.037
10	0.071	0.044	0.054	0.037	0.065	0.040	0.071	0.040	0.040
15	0.065	0.044	0.054	0.040	0.065	0.054	0.071	0.040	0.040
20	0.065	0.044	0.049	0.044	0.065	0.059	0.071	0.044	0.040
25	0.065	0.040	0.044	0.044	0.065	0.059	0.071	0.044	0.040
30	0.044	0.037	0.037	0.049	0.065	0.059	0.071	0.040	0.040
35	0.044	0.040	0.054	0.049	0.065	0.059	0.065	0.040	0.040
40	0.049	0.049	0.059	0.049	0.065	0.054	0.065	0.040	0.037
45	0.054	0.049	0.059	0.049	0.065	0.054	0.059	0.037	0.037
50	0.054	0.054	0.059	0.049	0.065	0.049	0.059	0.033	0.033
55	0.054	0.054	0.059	0.044	0.065	0.049	0.054	0.033	0.030
60	0.054	0.054	0.059	0.044	0.065	0.044	0.071	0.033	0.025
65	0.049	0.054	0.059	0.044	0.065	0.044	0.071	0.030	0.025
70	0.049	0.059	0.059	0.040	0.065	0.044	0.071	0.030	0.030
75	0.049	0.059	0.059	0.040	0.065	0.044	0.059	0.030	0.033
80	0.054	0.054	0.059	0.037	0.065	0.044	0.049	0.030	0.033
85	0.054	0.054	0.059	0.049	0.059	0.044	0.049	0.028	0.037
90	0.059	0.054	0.059	0.049	0.059	0.040	0.054	0.025	0.037
95	0.059	0.054	0.054	0.049	0.059	0.037	0.054	0.028	0.028
100	0.059	0.037	0.044	0.049	0.059	0.037	0.049	0.028	0.028
105	0.065	0.040	0.049	0.044	0.054	0.033	0.044	0.037	0.033
110	0.059	0.044	0.049	0.044	0.054	0.044	0.049	0.040	0.033
115	0.049	0.049	0.054	0.040	0.049	0.044	0.054	0.040	0.037
120	0.049	0.049	0.054	0.037	0.040	0.049	0.059	0.044	0.037
125	0.049	0.049	0.054	0.030	0.054	0.049	0.065	0.044	0.040
130	0.049	0.049	0.054	0.033	0.054	0.054	0.065	0.044	0.040
135	0.049	0.049	0.049	0.040	0.049	0.054	0.065	0.044	0.040
140	0.054	0.049	0.049	0.044	0.049	0.054	0.065	0.044	0.040
145	0.054	0.049	0.065	0.044	0.054	0.054	0.065	0.040	0.040
150	0.049	0.044	0.065	0.049	0.054	0.054	0.065	0.040	0.037
155	0.049	0.044	0.065	0.049	0.054	0.054	0.065	0.037	0.033
160	0.054	0.044	0.065	0.049	0.054	0.054	0.065	0.033	0.028
165	0.059	0.040	0.065	0.049	0.054	0.049	0.071	0.033	0.030
170	0.065	0.040	0.065	0.049	0.059	0.040	0.065	0.028	0.033
175	0.065	0.037	0.059	0.054	0.059	0.044	0.065	0.028	0.030
180	0.065	0.044	0.059	0.054	0.059	0.044	0.065	0.028	0.033

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla A.19.** Coeficientes de Colapso Dinámico para cada una de las orientaciones del sismo y para cada uno de los modelos analizados.

SISMO DE "SCT"

Coeficientes de Colapso Dinámico Cc

ORIENTACION	MODELO REFERENCIA	MECANISMOS PREDETERMINADOS							
		Ty-02	Ty-01	Tx-02	Tx-01	C3-02	C3-01	B2-02	B2-01
0	0.098	0.067	0.074	0.089	0.089	0.061	0.061	0.050	0.050
5	0.098	0.074	0.074	0.089	0.089	0.061	0.061	0.055	0.050
10	0.089	0.074	0.081	0.081	0.081	0.061	0.067	0.055	0.050
15	0.089	0.074	0.089	0.081	0.081	0.061	0.067	0.061	0.055
20	0.089	0.081	0.089	0.074	0.089	0.061	0.067	0.061	0.055
25	0.098	0.081	0.089	0.067	0.081	0.061	0.067	0.061	0.055
30	0.098	0.089	0.098	0.061	0.074	0.061	0.067	0.061	0.055
35	0.098	0.089	0.098	0.067	0.074	0.061	0.067	0.055	0.055
40	0.098	0.089	0.098	0.067	0.067	0.067	0.067	0.055	0.055
45	0.098	0.081	0.098	0.061	0.067	0.067	0.067	0.055	0.050
50	0.098	0.074	0.089	0.061	0.061	0.074	0.074	0.046	0.050
55	0.098	0.081	0.089	0.055	0.055	0.074	0.074	0.050	0.046
60	0.089	0.081	0.081	0.055	0.055	0.074	0.081	0.055	0.038
65	0.089	0.089	0.089	0.050	0.055	0.074	0.081	0.055	0.046
70	0.098	0.089	0.098	0.046	0.050	0.074	0.081	0.055	0.050
75	0.098	0.089	0.098	0.055	0.055	0.074	0.081	0.055	0.055
80	0.098	0.089	0.098	0.061	0.061	0.074	0.081	0.055	0.055
85	0.098	0.089	0.089	0.061	0.067	0.074	0.081	0.061	0.055
90	0.098	0.089	0.089	0.067	0.067	0.074	0.081	0.061	0.055
95	0.089	0.081	0.089	0.067	0.074	0.074	0.081	0.061	0.055
100	0.108	0.081	0.081	0.067	0.074	0.074	0.098	0.061	0.055
105	0.108	0.074	0.074	0.074	0.081	0.074	0.098	0.061	0.055
110	0.108	0.074	0.081	0.074	0.081	0.074	0.098	0.067	0.050
115	0.108	0.061	0.081	0.074	0.081	0.081	0.098	0.067	0.050
120	0.108	0.074	0.081	0.074	0.081	0.081	0.098	0.055	0.050
125	0.098	0.074	0.074	0.067	0.074	0.089	0.098	0.055	0.046
130	0.089	0.067	0.074	0.074	0.089	0.089	0.098	0.050	0.046
135	0.089	0.067	0.067	0.081	0.098	0.089	0.098	0.050	0.042
140	0.089	0.061	0.067	0.089	0.098	0.089	0.098	0.046	0.042
145	0.098	0.061	0.061	0.089	0.098	0.089	0.098	0.046	0.042
150	0.098	0.055	0.061	0.098	0.098	0.089	0.098	0.050	0.038
155	0.108	0.046	0.055	0.098	0.098	0.089	0.089	0.050	0.050
160	0.108	0.050	0.055	0.098	0.098	0.081	0.089	0.050	0.050
165	0.108	0.055	0.055	0.098	0.098	0.081	0.089	0.050	0.050
170	0.098	0.061	0.061	0.098	0.098	0.074	0.081	0.050	0.050
175	0.098	0.067	0.067	0.089	0.098	0.074	0.074	0.050	0.050
180	0.098	0.067	0.074	0.089	0.089	0.061	0.061	0.050	0.050

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN