CAPÍTULO 7

INFLUENCIA DE LOS DISPOSITIVOS EN EDIFICIOS DE PERIODO LARGO

En este capítulo se trata el segundo caso teórico de estudio, el cual consiste en un edificio de veinte niveles. En este edificio, en particular, sólo se ensaya la proporción de rigidez lateral, tal que los marcos contribuyen con el 25 por ciento y los dispositivos disipadores con el 75 por ciento restante. Ahora el objetivo es evaluar la influencia que estos mecanismos tienen en un edificio de periodo relativamente largo, ante la influencia de la componente Este-Oeste del acelerograma del sismo de Michoacán, ocurrido en 1985 y registrado en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT `85).

7.1 Descripción del edificio

Este edificio consta de veinte niveles con una altura de entrepiso de 3 m, las dimensiones en planta son: 19 m, en la dirección "X" y 16 m, en la dirección "Y"; lo que da un área de 304 m^2. La estructura está formada por cuatro marcos, cada uno de tres claros, conectados a momento, de perfiles de acero estructural A-36 en la dirección del análisis y cuatro marcos, de tres claros también, en la dirección perpendicular, estos marcos al igual que los principales, están formados por acero A-36, pero conectados únicamente a cortante. Todos los marcos están constituidos por vigas y columnas del tipo IPR.

En la dirección del análisis, la dirección "X", se colocan los dispositivos disipadores en cada uno de los tres claros de los marcos exteriores. Los ADAS se localizan montados sobre contravientos del tipo chevrón, para garantizar su mejor funcionamiento. En la dirección perpendicular a la dirección del análisis, la dirección "Y", también en el claro central que corresponde al claro de mayor longitud (6 m), se colocan contravientos sin disipadores; en este caso del tipo cruz, cuyo fin es darle rigidez lateral al edificio en esa dirección. Ya se ha explicado antes que en este trabajo, y con el único fin de controlar las variables se colocan disipadores en una sola dirección.

El sistema de piso lo constituye una losa de concreto de 20 cm; pues se considera que este espesor da a la losa suficiente rigidez en su plano, como para aplicar la hipótesis del diafragma rígido. Una vista tridimensional del edificio se muestra en la figura 7.1.

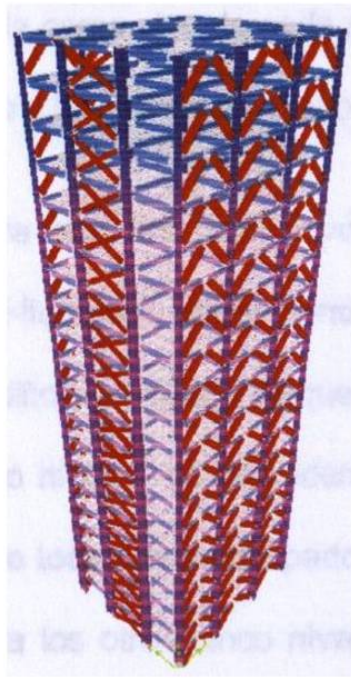


Fig. 7.1 Edificio de veinte niveles.

Un detalle de la conexión entre las diagonales y el ADAS se muestra en la figura 7.2.

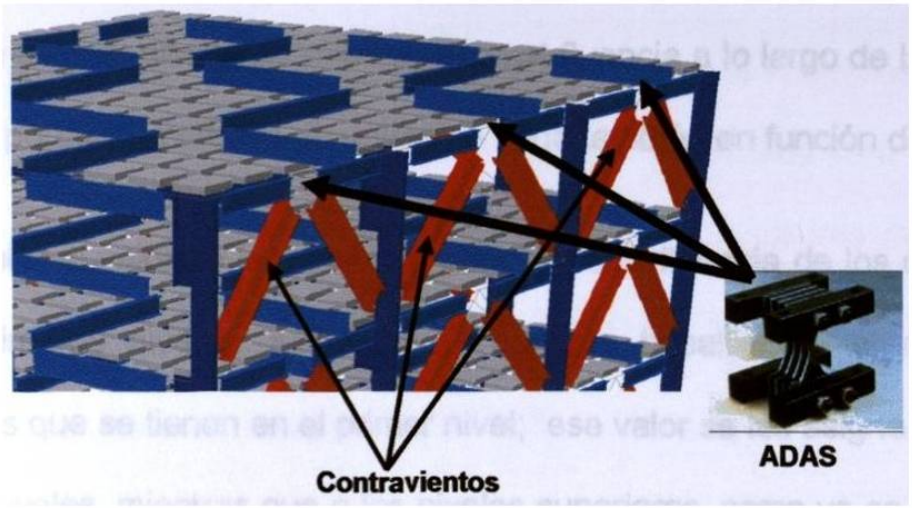


Fig. 7.2 Detalle de localización de los ADAS.

En este edificio, como ya se mencionó con anterioridad, se estudia únicamente la proporción de rigidez lateral tal que los dispositivos ADAS toman el 75 % de esta y los marcos toman el otro 25 por ciento. En este caso, el periodo natural del edificio en la dirección de análisis es 2 segundos. La carta total, es decir, incluyendo el peso propio y la carga viva de cada nivel es W = 900 Kg/m^2. Con esta carga se calcula el peso y las masas correspondientes a cada nivel.

En este caso, se considera que los dispositivos disipadores tienen cuatro diferentes pendientes post-fluencia, dependiendo del nivel en el que se encuentren. Se dividió al edificio en cuatro bloques, cada uno de cinco niveles; así, para los primeros cinco niveles, se consideró una pendiente igual al 100 por ciento del cortante que le toca a cada disipador, referido como una fracción del coeficiente sísmico; para los otros cinco niveles, un 75 por ciento y así, hasta los últimos cinco niveles, en los cuales los disipadores tiene una

pendiente después de la fluencia del 25 por ciento de los ADAS de los primeros cinco niveles.

La idea de asignar diferentes pendientes post-fluencia a lo largo de la altura del edificio es porque el cortante de entrepiso varía también en función de la altura.

Para calcular el valor de la pendiente posterior a la fluencia de los dispositivos de los primeros niveles, se divide el cortante basal entre el número de disipadores que se tienen en el primer nivel; ese valor se les asigna a los cinco primeros niveles, mientras que a los niveles superiores, como ya se dijo, se les asigna un porcentaje de la rigidez de los del primer nivel, dependiendo de la altura a la que se encuentren. Es importante aclarar que la rigidez inicial de todos los disipadores es la misma para el rango elástico, la única pendiente que se varía es la pendiente post-fluencia.

7.2 Acelerogramas de análisis

Esta estructura se somete a la componente E-W del acelerograma de SCT, del sismo del 19 de Septiembre de 1985. Este acelerograma se registró en una zona de terreno blando y tiene un periodo dominante de dos segundos, así que, como el edificio tiene también un periodo inicial de dos segundos; se busca estudiar la influencia de los disipadores cuando el periodo de excitación es cercano al periodo natural de vibración, fenómeno conocido como *resonancia*.

7.2.1 Acelerograma de SCT `85

El registro de aceleraciones que tiene la componente E-W del sismo de SCT, tiene una duración aproximada de 180 segundos, con una aceleración máxima registrada de 0.16 g. El acelerograma presenta una marcada fase intensa de alrededor de 40 segundos, en donde se presentan los valores máximos de aceleración. El acelerograma de este sismo se puede ver en la figura 7.3.

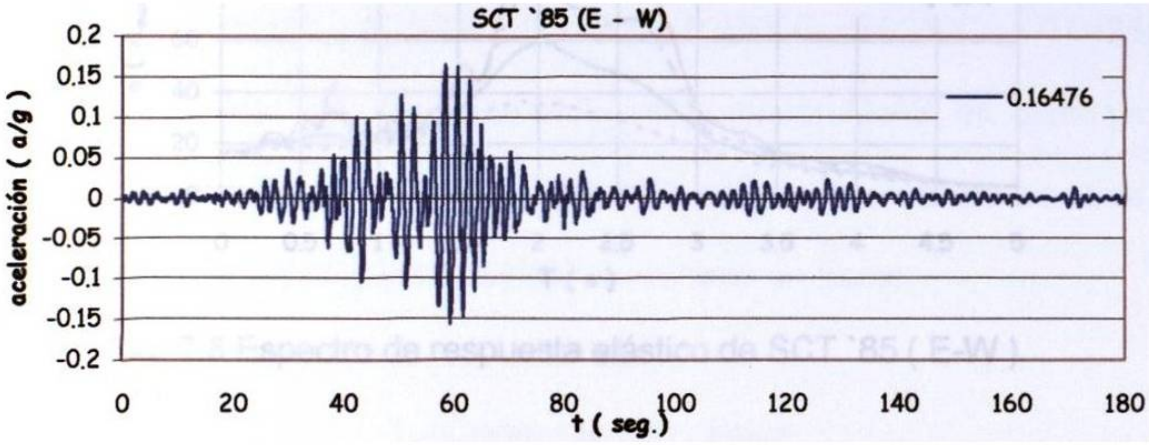


Fig. 7.3 Acelerograma del sismo de SCT `85 (E-W).

En el espectro de Fourier se observa que el contenido de frecuencias es amplio; no obstante, las aceleraciones máximas se localizan cerca de los 0.5Hz. (figura 7.4)

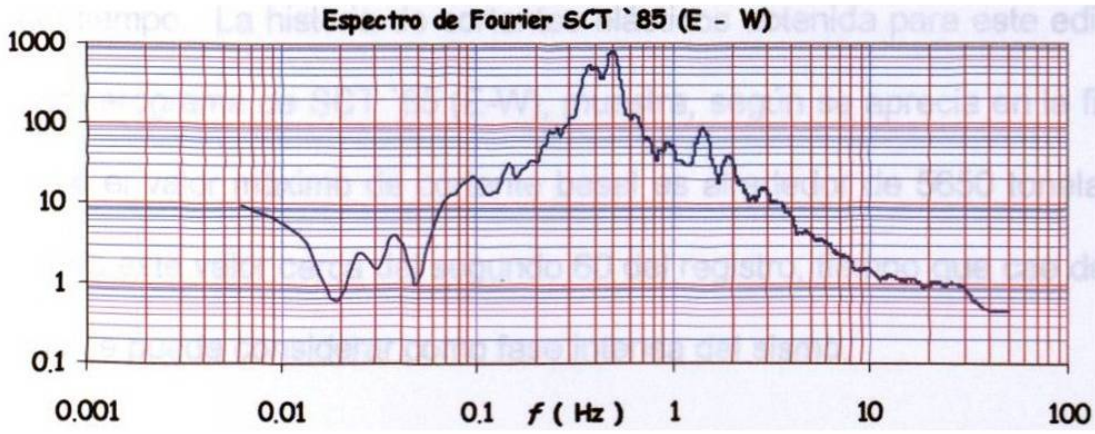


Fig. 7.4 Espectro de Fourier de SCT `85 (E-W).

El espectro de respuesta elástico de este sismo pone en evidencia que existe un pico perfectamente localizado, cercano a los dos segundos. En la figura 7.5 se aprecia el espectro de respuesta para diferentes porcentajes de amortiguamiento.

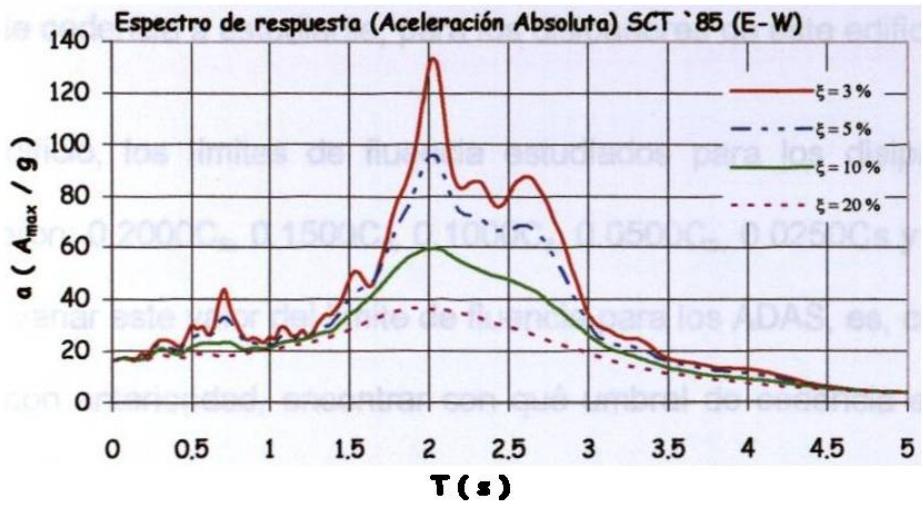


Fig. 7.5 Espectro de respuesta elástico de SCT `85 (E-W).

7.3 Coeficiente sísmico (C_s)

Los cortantes en la base se asocian comúnmente al daño de los edificios, ya que este cortante es la suma de las fuerzas de inercia que actúan en cada nivel; de ahí la importancia de conocer la variación que este parámetro tiene, a lo largo del tiempo. La historia de cortantes elásticos obtenida para este edificio, con el acelerograma de SCT `85 (E-W), muestra, según se aprecia en la figura 7.6 a, que el valor máximo de cortante basal es alrededor de 5650 toneladas, alcanzando este valor cerca del segundo 60 del registro, tiempo que cae dentro de lo que se puede considerar como fase intensa del sismo.

La historia de coeficientes sísmicos, que corresponden con la historia de cortantes elásticos de la figura 7.6 a, muestra que el valor máximo que éste alcanza está cercano a 0.74. Esto se aprecia en la figura 7.6 b.

Es a partir de este valor del coeficiente sísmico que se eligen los diferentes umbrales de cedencia a estudiarse, para los disipadores de este edificio.

En este edificio, los límites de fluencia estudiados para los disipadores de energía fueron: $0.2000C_s$, $0.1500C_s$, $0.1000C_s$, $0.0500C_s$, 0.0250Cs y $0.0125C_s$. La idea de variar este valor del límite de fluencia para los ADAS, es, como ya se mencionó con anterioridad, encontrar con qué umbral de cedencia es que se obtiene el mejor comportamiento del edificio durante un sismo.

7.4 Cortantes en la base

Para evaluar la influencia que tienen los dispositivos histeréticos en el edificio, una vez hecho el análisis para cada uno de los umbrales de cedencia escogidos, se grafica la historia de cortante en la base para cada uno de ellos, comparando la repuesta obtenida en cada caso inelástico con el caso lineal. A partir de esta comparación de historias, según se aprecia en la figura 7.7, es que se obtienen los valores máximos, pico a pico, y en rms.

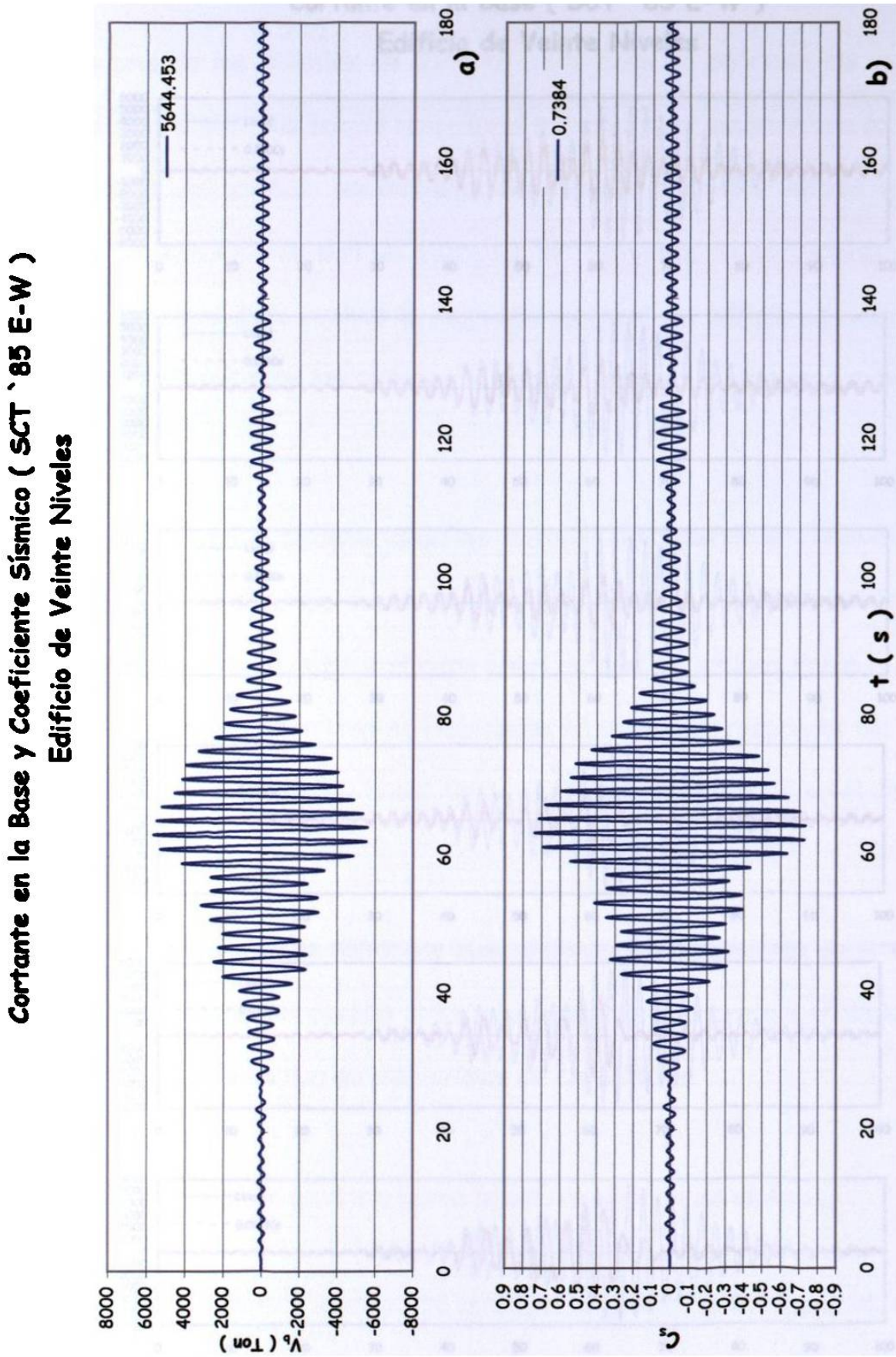


Fig. 7.6 Cortante en la base y Coeficiente sísmico (SCT `85 (E-W)).

Cortante en la Base (SCT `85 E-W)
Edificio de Veinte Niveles

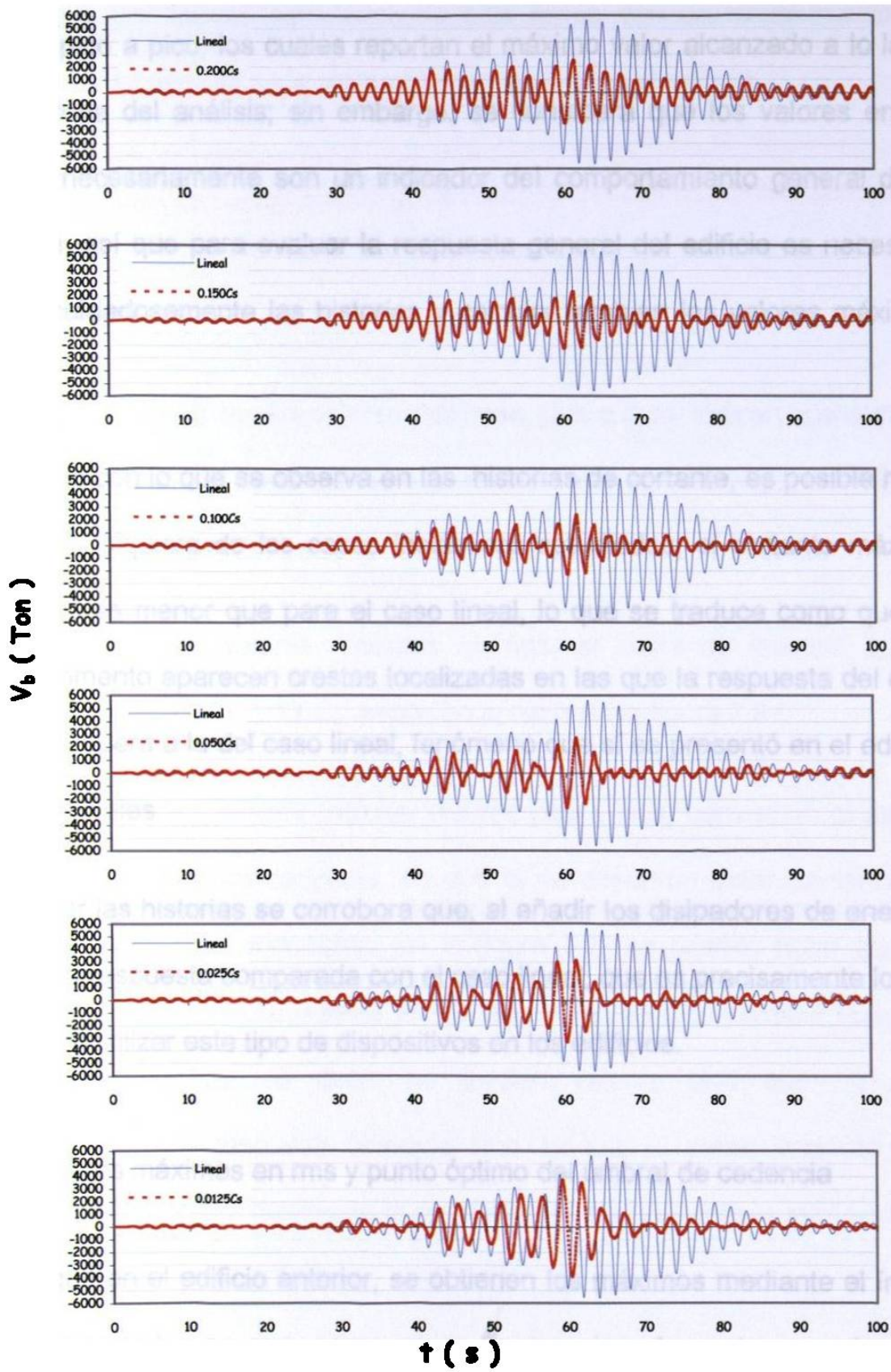


Fig. 7.7 Historia de cortantes en la base (SCT `85 (E-W)).

7.4.1 Valores máximos, pico a pico

De cada una de las historias de cortante en la base se obtienen los valores máximos pico a pico, los cuales reportan el máximo valor alcanzado a lo largo de la historia del análisis; sin embargo, se considera que los valores en los picos no necesariamente son un indicador del comportamiento general de la estructura, así que para evaluar la respuesta general del edificio es necesario analizar cuidadosamente las historias y calcular también los valores máximos en rms.

De acuerdo con lo que se observa en las historias de cortante, es posible notar que para cualquiera de los casos inelásticos estudiados, el cortante máximo pico a pico es menor que para el caso lineal, lo que se traduce como que en ningún momento aparecen crestas localizadas en las que la respuesta del caso inelástico supera a la del caso lineal, fenómeno que sí se presentó en el edificio de cuatro niveles.

Al observar las historias se corrobora que, al añadir los disipadores de energía, se abate la respuesta comparada con el caso lineal, que es precisamente lo que se busca al utilizar este tipo de dispositivos en los edificios.

7.4.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia

Al igual que en el edificio anterior, se obtienen los máximos mediante el índice rms; los resultados en rms, como ya se ha mencionados antes, ponderan la

respuesta encontrada para un sismo, ya que con este índice se eliminan las crestas que no son representativas del comportamiento general del sistema. Es por ello que los valores calculados de esta forma dan un mejor indicio del comportamiento general de la estructura, en este caso el edificio.

Debido a lo anterior es que se obtiene y compara la respuesta, utilizando este índice para evaluar la conducta que tiene el edificio, con los valores máximos obtenidos pico a pico.

Para el sismo de análisis, los valores máximos, pico a pico, indican que el punto óptimo del umbral de cedencia está localizado entre $0.1500C_s$ y $0.1000C_s$., según se ve en la figura 7.8 a.

Si se comparan los valores máximos en rms, el límite de fluencia óptimo también se localiza en $0.1000C_s$, según se aprecia en la figura 7.8 b.

Para esta estructura, ambos índices: valores pico y rms, convergen al mismo valor para el umbral de cedencia, ya que si se observan detenidamente las historias de cortantes, mostradas en la figura 7.7, es posible notar que en ningún momento aparecen crestas en las que la respuesta inelástica supere a la respuesta elástica; es decir, no existen valores pico que no sean representativos de la respuesta obtenida, sino que todo el comportamiento de la historia completa refleja realmente la conducta del edificio, ante la excitación de este acelerograma, en particular.

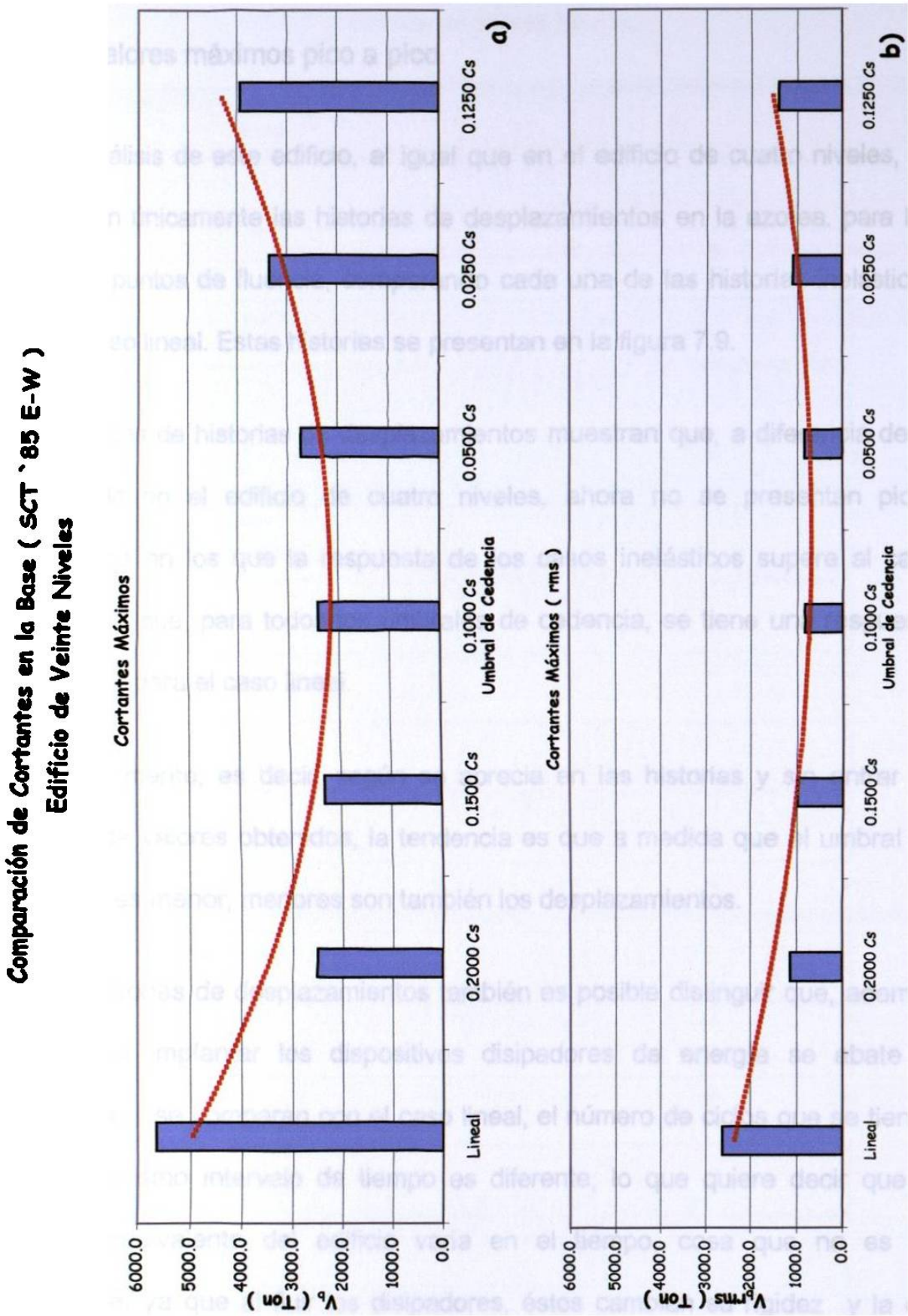


Fig. 7.8 Valores máximos de cortantes (SCT `85 (E-W)).

7.5 Desplazamientos

7.5.1 Valores máximos pico a pico

En el análisis de este edificio, al igual que en el edificio de cuatro niveles, se presentan únicamente las historias de desplazamientos en la azotea. para los distintos puntos de fluencia, comparando cada una de las historias inelásticas con el caso lineal. Estas historias se presentan en la figura 7.9.

Las gráficas de historias de desplazamientos muestran que, a diferencia de lo observado en el edificio de cuatro niveles, ahora no se presentan picos localizados en los que la respuesta de los casos inelásticos supere al caso lineal; sino que, para todos los umbrales de cedencia, se tiene una respuesta menor que para el caso lineal.

Cualitativamente, es decir, según se aprecia en las historias y sin entrar en detalles de valores obtenidos, la tendencia es que a medida que el umbral de cedencia es menor, menores son también los desplazamientos.

En las historias de desplazamientos también es posible distinguir que, además de que al implantar los dispositivos disipadores de energía se abate la respuesta si se comparan con el caso lineal, el número de ciclos que se tienen para un mismo intervalo de tiempo es diferente, lo que quiere decir que el periodo equivalente del edificio varía en el tiempo, cosa que no es de extrañarse, ya que al fluir los disipadores, éstos cambian su rigidez y la del edificio.

Historia de Desplazamientos en Azotea (SCT ´85 E-W)
Edificio de Veinte Niveles

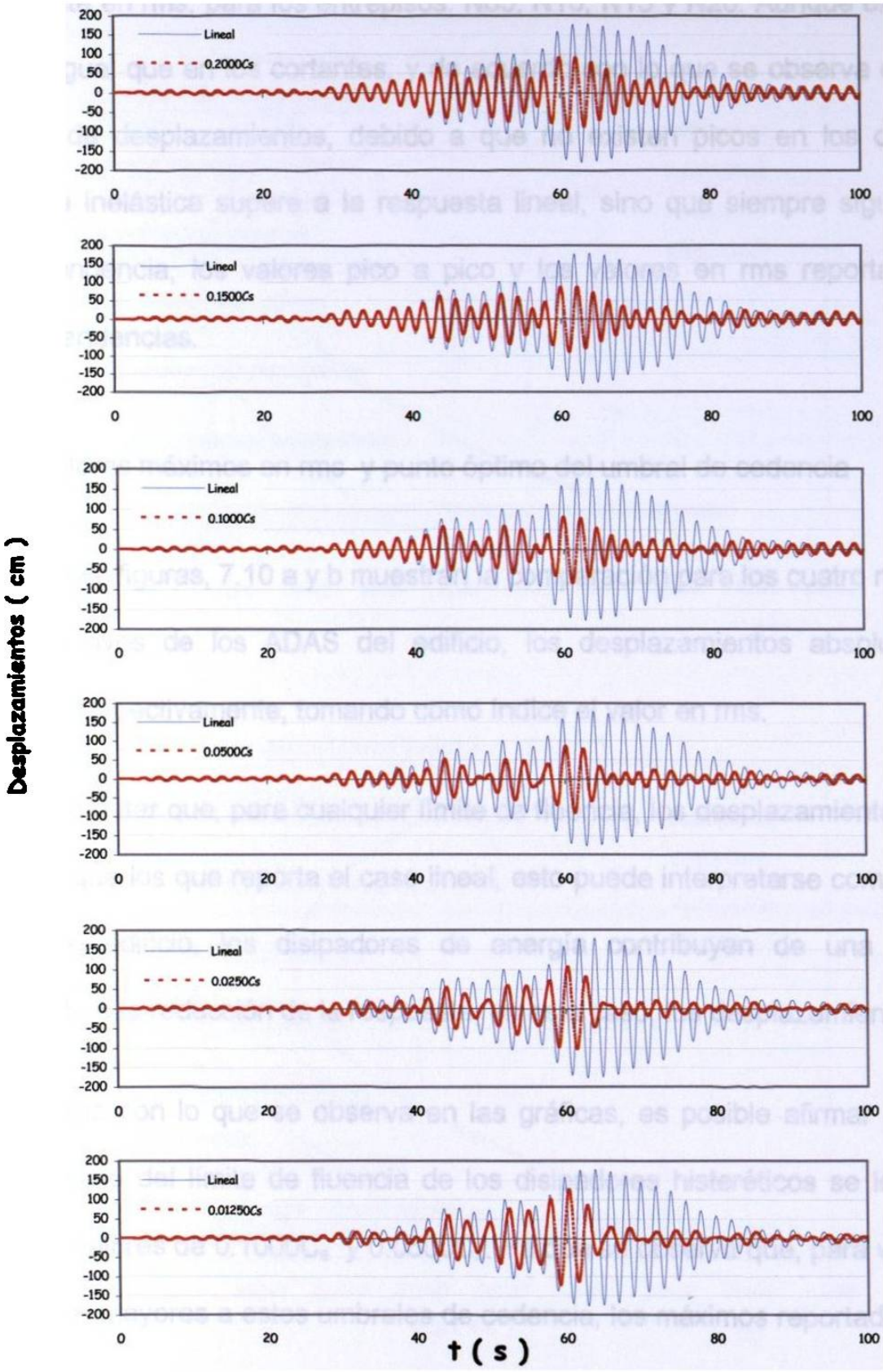


Fig. 7.9 Historia de desplazamientos en azotea (SCT `85 (E-W)).

Además de las historias de desplazamientos, se incluye también, en las figuras 7.10 a y b un resumen de los desplazamientos máximos absolutos y relativos, únicamente en rms, para los entrepisos: N05, N10, N15 y N20. Aunque en este caso, al igual que en los cortantes, y de acuerdo con lo que se observa en las historias de desplazamientos, debido a que no existen picos en los que la respuesta inelástica supere a la respuesta lineal, sino que siempre siguen la misma tendencia, los valores pico a pico y los valores en rms reportan las mismas tendencias.

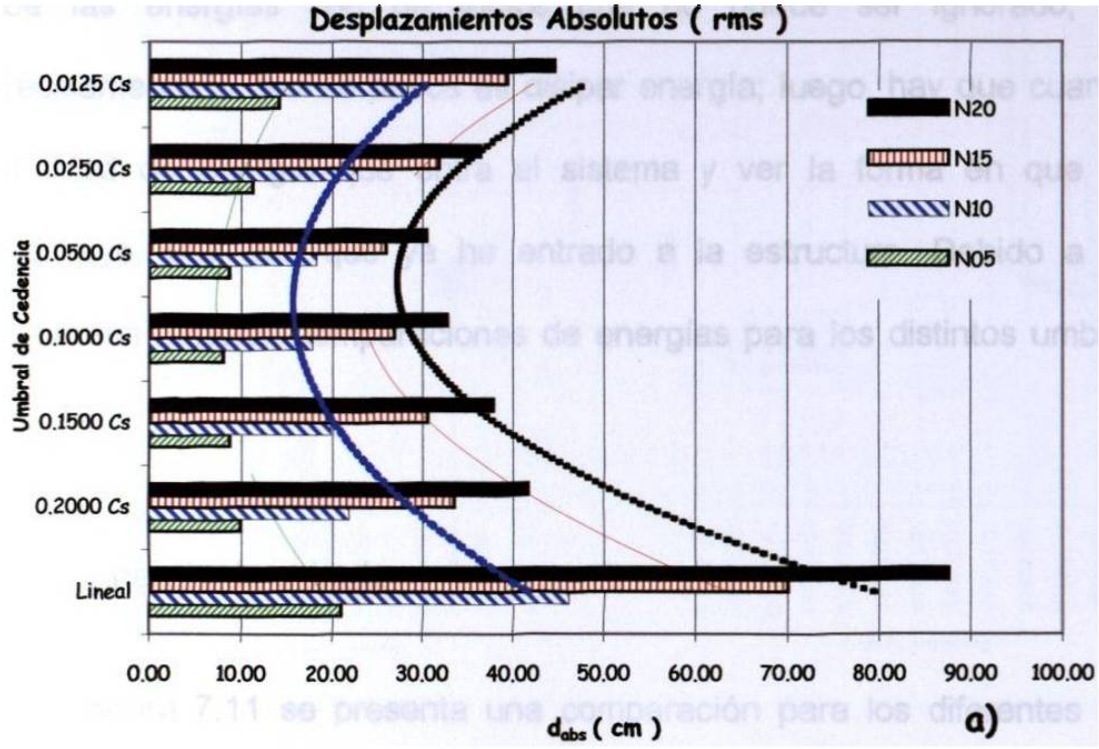
7.5.2 Valores máximos en rms y punto óptimo del umbral de cedencia

Las mismas figuras, 7.10 a y b muestran la comparación para los cuatro niveles representativos de los ADAS del edificio, los desplazamientos absolutos y relativos, respectivamente, tomando como índice el valor en rms.

Es posible notar que, para cualquier límite de fluencia, los desplazamientos son menores que los que reporta el caso lineal, esto puede interpretarse como que, para este edificio, los disipadores de energía contribuyen de una forma importante a la reducción de la respuesta, en este caso, los desplazamientos.

De acuerdo con lo que se observa en las gráficas, es posible afirmar que el punto óptimo del límite de fluencia de los disipadores histeréticos se localiza entre los valores de $0.1000C_s$ y $0.0500C_s$. Ya que se observa que, para valores menores o mayores a estos umbrales de cedencia, los máximos reportados son mayores.

Comparación de Desplazamientos (SCT `85 E-W)
Edifico de Veinte Niveles



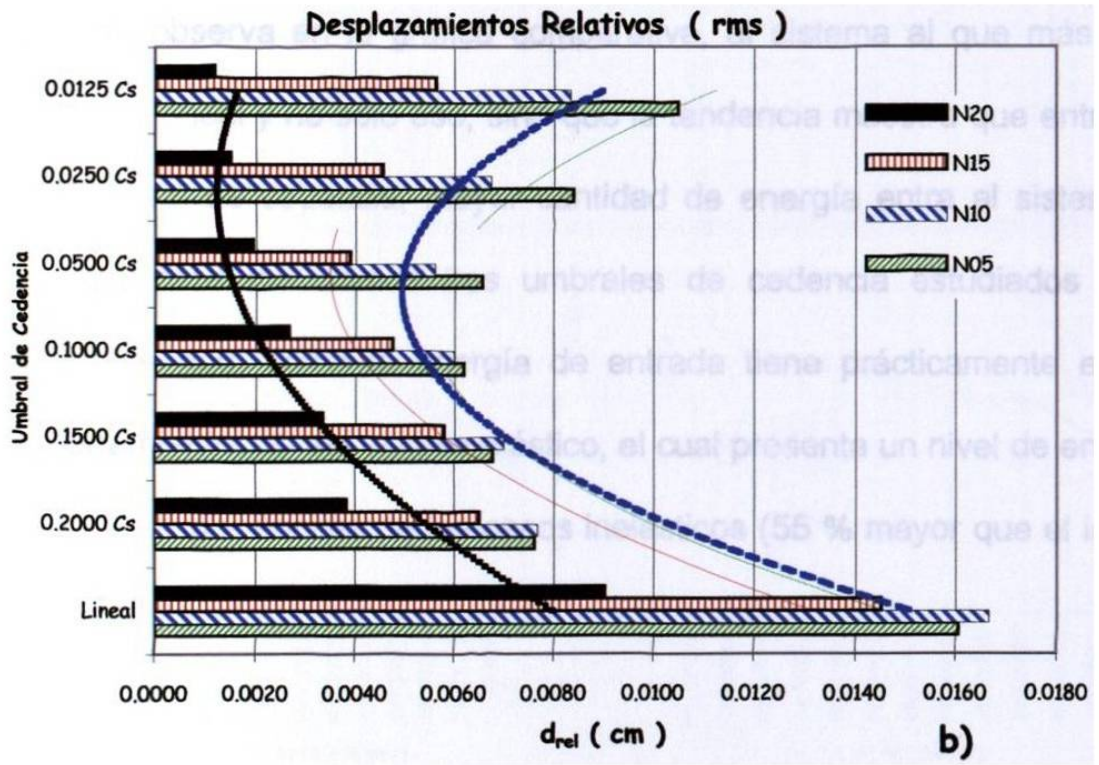


Fig. 7.10 Valores máximos de desplazamientos.

7.6 Energías

Para evaluar la respuesta del edificio de una forma más completa, se considera que las energías son un índice que no puede ser ignorado, ya que precisamente lo que se busca es disipar energía; luego, hay que cuantificar la cantidad de energía que entra al sistema y ver la forma en que ésta se distribuye, una vez que ya ha entrado a la estructura. Debido a ello, se presentan también comparaciones de energías para los distintos umbrales de cedencia.

7.6.1 Energía de entrada

En la figura 7.11 se presenta una comparación para los diferentes tipos de energía considerados en este análisis. En el caso de la energía de entrada, según se observa en la gráfica comparativa, el sistema al que más energía entra es al lineal y no sólo eso, sino que la tendencia muestra que entre mayor se el umbral de cedencia, mayor cantidad de energía entra al sistema. Sin embargo, para los últimos tres umbrales de cedencia estudiados en este edificio, se nota cómo la energía de entrada tiene prácticamente el mismo comportamiento; no así el caso elástico, el cual presenta un nivel de energía de entrada muy por encima de los casos inelásticos (55 % mayor que el inelástico mayor).

Comparación de Energías (SCT `85 E-W)
Edificio de Veinte Niveles

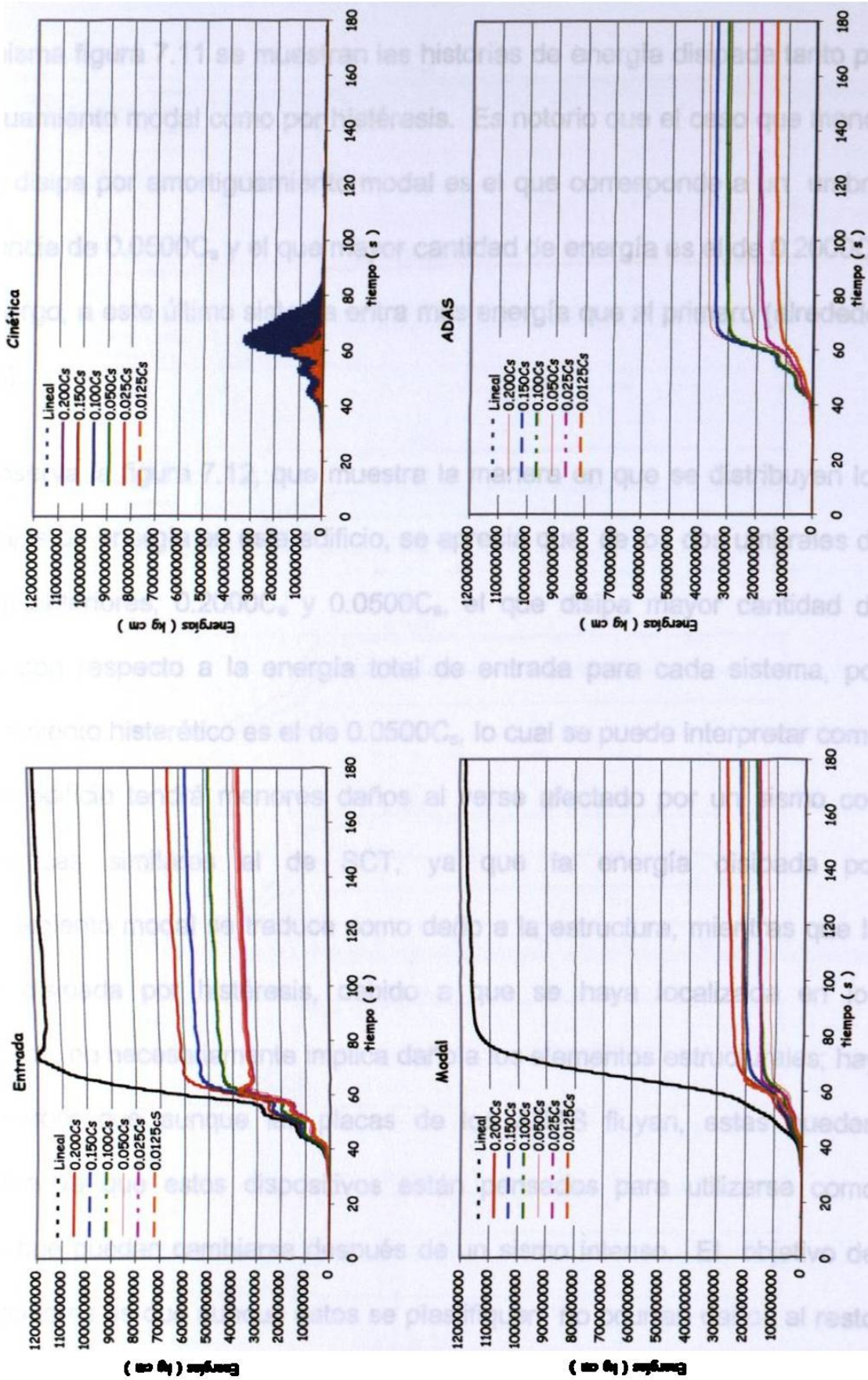


Fig. 7.11 Historias de energías (SCT `85 (E-W)).

7.6.2 Energía disipada

En la misma figura 7.11 se muestran las historias de energía disipada tanto por amortiguamiento modal como por histéresis. Es notorio que el caso que menos energía disipa por amortiguamiento modal es el que corresponde a un umbral de cedencia de $0.0500C_s$ y el que mayor cantidad de energía es el de $0.2000C_s$, sin embargo, a este último sistema entra más energía que al primero (alrededor del 60%).

Si se observa la figura 7.12, que muestra la manera en que se distribuyen los porcentajes de energía en este edificio, se aprecia que, de los dos umbrales de cedencia anteriores, $0.2000C_s$ y $0.0500C_s$, el que disipa mayor cantidad de energía, con respecto a la energía total de entrada para cada sistema, por comportamiento histerético es el de $0.0500C_s$, lo cual se puede interpretar como que este edificio tendrá menores daños al verse afectado por un sismo con características similares al de SCT, ya que la energía disipada por amortiguamiento modal se traduce como daño a la estructura, mientras que la energía disipada por histéresis, debido a que se haya localizada en los disipadores, no necesariamente implica daño a los elementos estructurales; hay que recordar que aunque las placas de los ADAS fluyan, estas pueden cambiarse ya que estos dispositivos están pensados para utilizarse como fusibles que puedan cambiarse después de un sismo intenso. El objetivo de los disipadores es que aunque estos se plastifiquen, no ocurran daños al resto de la estructura.

Energías (SCT `85 E-W)
Edificio de Veinte Niveles

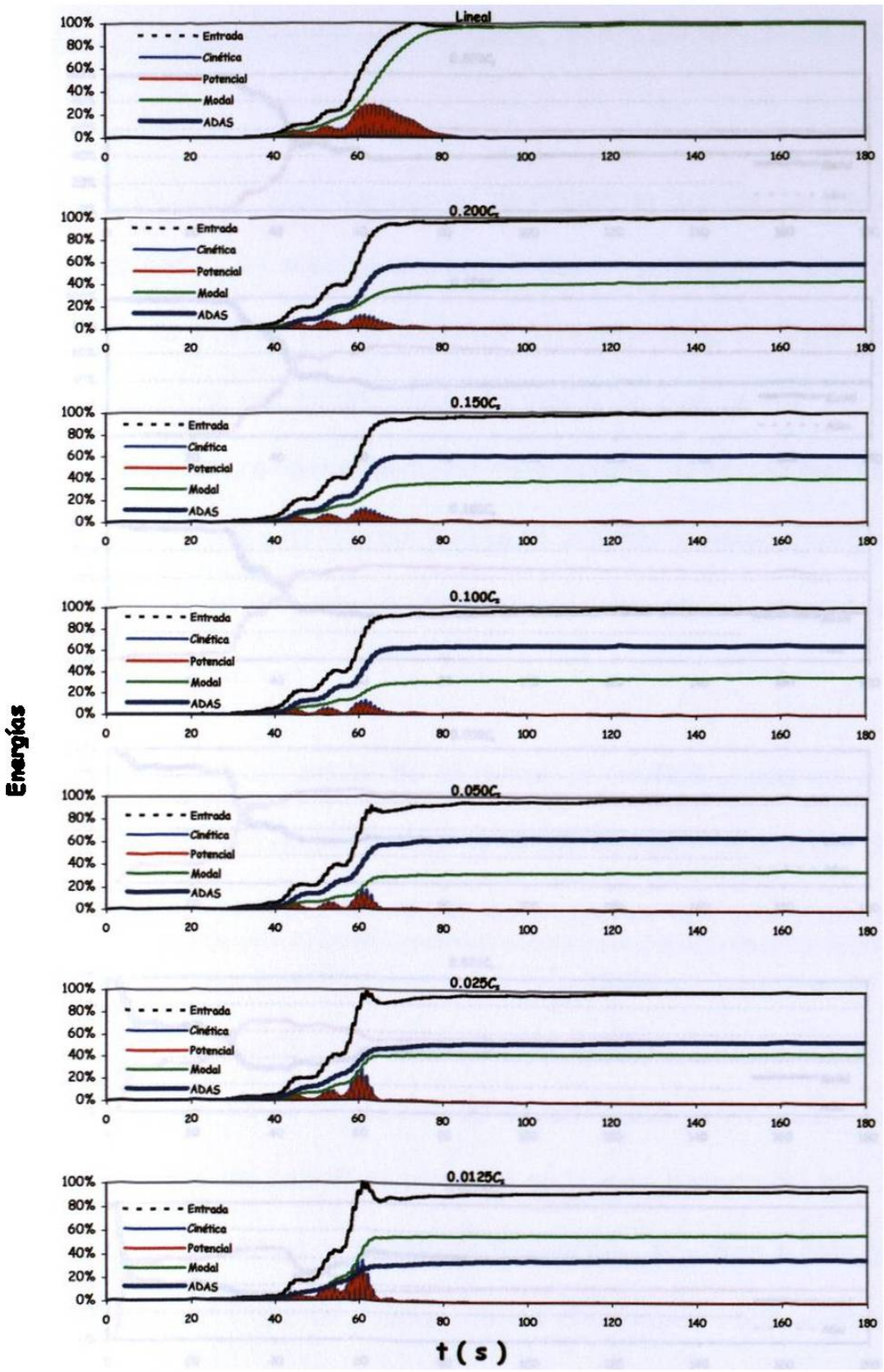


Fig. 7.12 Porcentajes de energías (SCT `85 (E-W)).

Energías Disipadas (SCT `85 E-W)
Edificio de Veinte Niveles

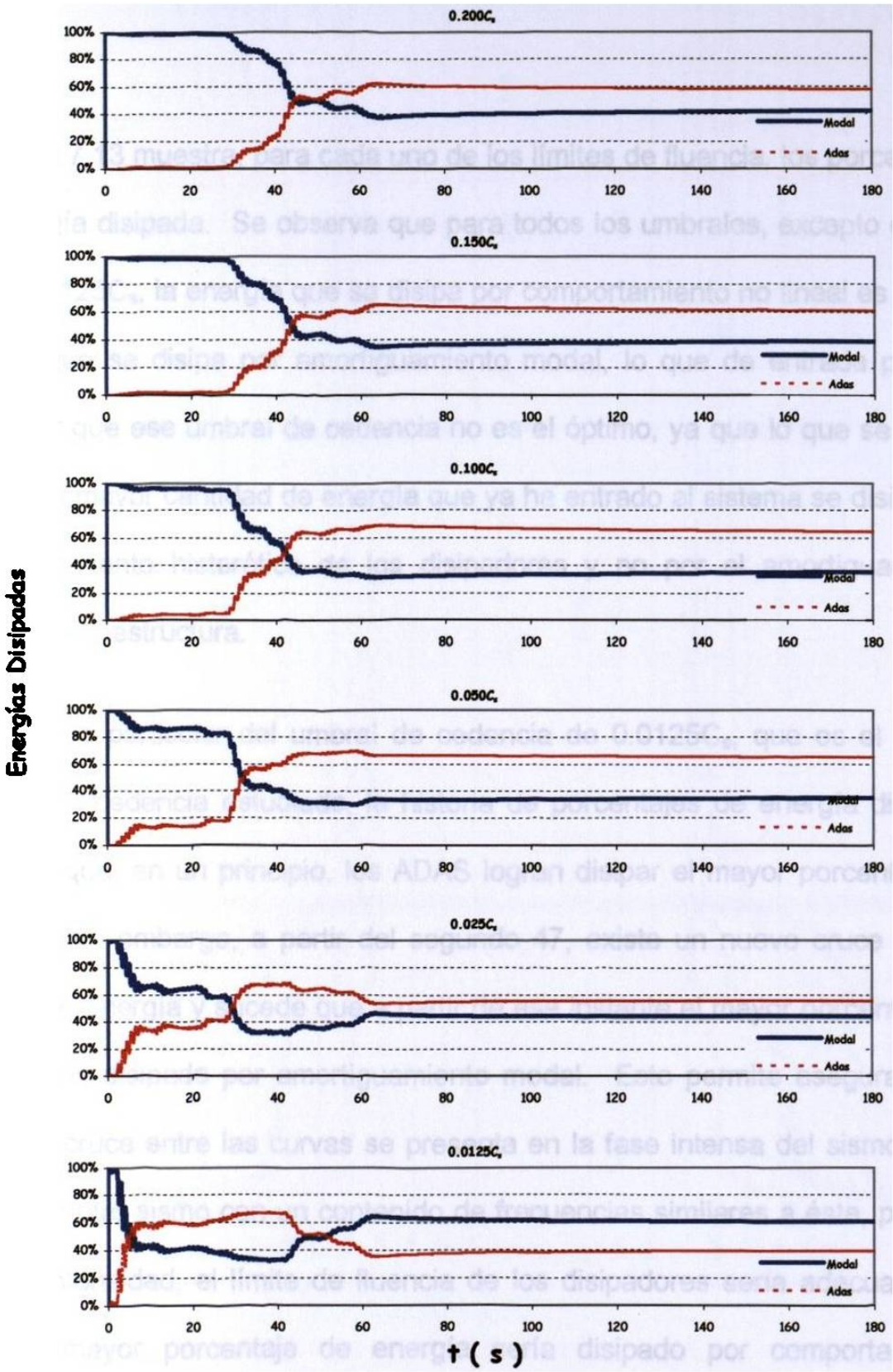


Fig. 7.13 Energías disipadas (SCT `85 (E-W)).

Así, en términos de energía disipada, es posible afirmar que es el umbral de $0.0500C_s$, el que se comporta mejor, ya que es el que disipa de una mejor forma, con el mayor porcentaje por histéresis, la energía que ya ha entrado al sistema.

La figura 7.13 muestra, para cada uno de los límites de fluencia, los porcentajes de energía disipada. Se observa que para todos los umbrales, excepto el más bajo, $0.0125C_s$, la energía que se disipa por comportamiento no lineal es mayor que la que se disipa por amortiguamiento modal, lo que de entrada permite asegurar que ese umbral de cedencia no es el óptimo, ya que lo que se busca es que la mayor cantidad de energía que ya ha entrado al sistema se disipe por comportamiento histerético de los disipadores y no por el amortiguamiento mismo de la estructura.

En el caso particular del umbral de cedencia de $0.0125C_s$, que es el menor umbral de cedencia estudiado, la historia de porcentajes de energía disipada muestra que, en un principio, los ADAS logran disipar el mayor porcentaje de energía; sin embargo, a partir del segundo 47, existe un nuevo cruce de las curvas de energía y sucede que a partir de ese instante el mayor porcentaje de energía es disipado por amortiguamiento modal. Esto permite asegurar que, como el cruce entre las curvas se presenta en la fase intensa del sismo, para cualquier otro sismo con un contenido de frecuencias similares a éste, pero de menor intensidad, el límite de fluencia de los disipadores sería adecuado, ya que el mayor porcentaje de energía sería disipado por comportamiento histerético.

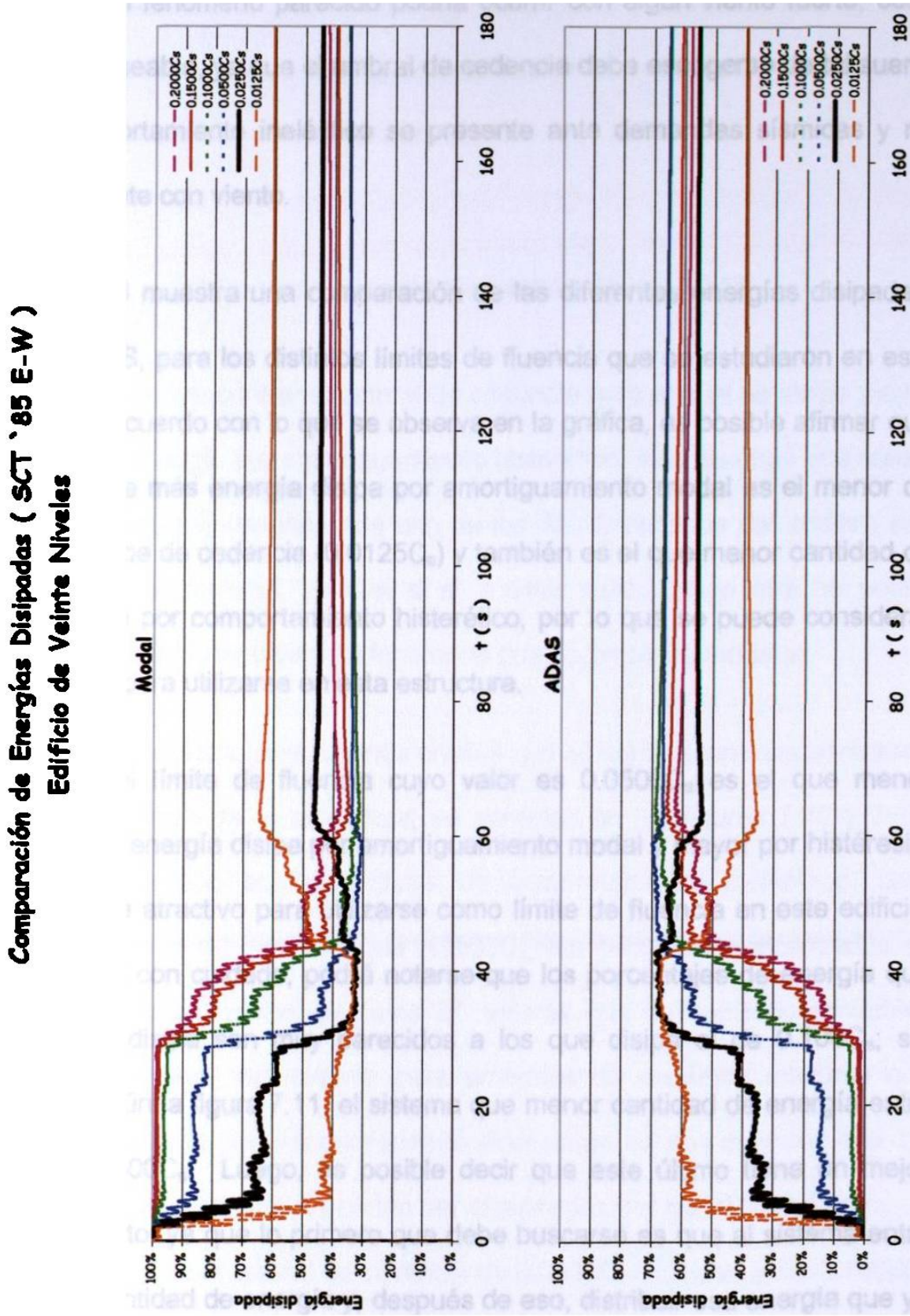


Fig. 7.14 Comparación de energías disipadas (SCT `85 (E-W)).

Desafortunadamente, el sismo de análisis es demasiado para este umbral de cedencia. Un fenómeno parecido podría ocurrir con algún viento fuerte, cosa que no es deseable, ya que el umbral de cedencia debe escogerse de tal suerte que el comportamiento inelástico se presente ante demandas sísmicas y no necesariamente con viento.

La figura 7.14 muestra una comparación de las diferentes energías disipadas, Modal y ADAS, para los distintos límites de fluencia que se estudiaron en este edificio. De acuerdo con lo que se observa en la gráfica, es posible afirmar que el sistema que más energía disipa por amortiguamiento modal es el menor de los umbrales de de cedencia ($0.0125C_s$) y también es el que menor cantidad de energía disipa por comportamiento histerético, por lo que se puede considerar no adecuado para utilizarse en esta estructura.

En cambio, el límite de fluencia cuyo valor es $0.0500C_s$ es el que menor porcentaje de energía disipa por amortiguamiento modal y mayor por histéresis, lo que lo hace atractivo para utilizarse como límite de fluencia en este edificio. Si se observa con cuidado, podrá notarse que los porcentajes de energía que este sistema disipa son muy parecidos a los que disipa el de $0.100C_s$; sin embargo, según la figura 7.11, el sistema que menor cantidad de energía entra es el de $0.0500C_s$. Luego, es posible decir que este último tiene un mejor comportamiento, ya que lo primero que debe buscarse es que al sistema entre una menor cantidad de energía y, después de eso, distribuir esa energía que ya ha entrado, de tal forma que la mayor cantidad posible sea disipada por comportamiento inelástico y no por el amortiguamiento propio del edificio, ya

que eso se traduciría en daño estructural. Entonces, debe concentrarse la energía disipada en los dispositivos de comportamiento histerético; en este caso, ADAS para, de esa forma, localizar los puntos en donde se disipa la energía y evitar el daño a la estructura.

7.7 Comportamiento histerético de los ADAS

No sólo basta con encontrar el umbral de cedencia para el cual se disipe mayor porcentaje de energía por amortiguamiento histerético, sino que hay que cuidar que la ductilidad que reporta cada uno de los ADAS después del análisis sea alcanzable en la realidad, ya que si el análisis reporta algo que no puede lograrse, no es representativo del fenómeno que se pretende modelar.

Las curvas histeréticas, para algunos niveles que se consideran representativos del comportamiento de la estructura, se aprecian en las figuras 7.15 y 7.16. Según lo observado en las gráficas de comportamiento histerético, para umbrales de cedencia menores que $0.0500C_s$, las ductilidades alcanzadas en los ADAS alcanzan valores de hasta 27, valores que no son recomendables para los disipadores; en cambio, para umbrales de cedencia mayores que $0.0500C_s$ se aprecia que las ductilidades alcanzadas no son mayores que 12. Estos valores de ductilidad sí pueden ser alcanzados por los ADAS. Luego, es posible afirmar, que el umbral de cedencia de $0.0500C_s$ o incluso el de $0.1000C_s$ tienen los mejores comportamientos, hablando de los ADAS.

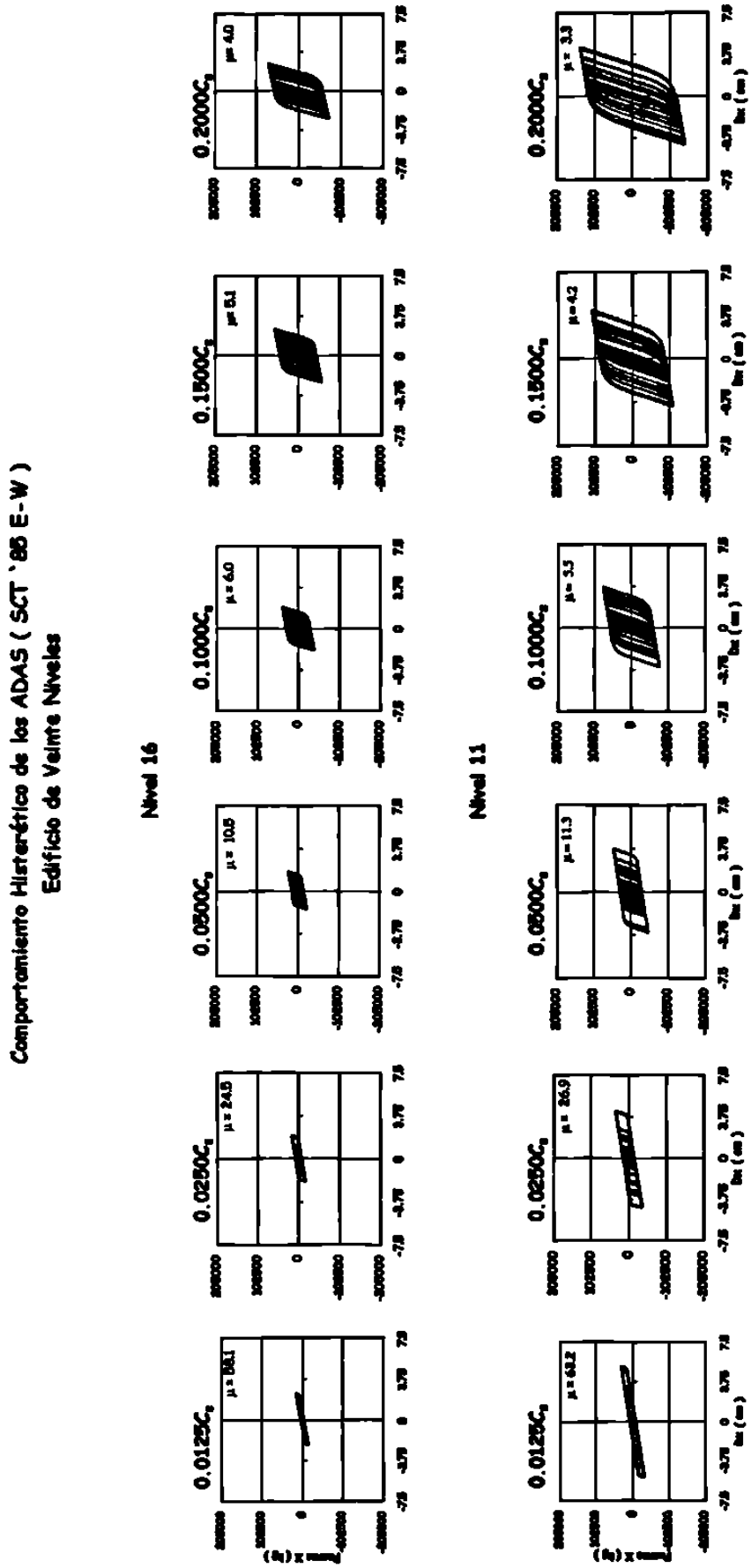


Fig. 7.15 Ciclos histeréticos en niveles superiores (SCT '85 (E-W)).

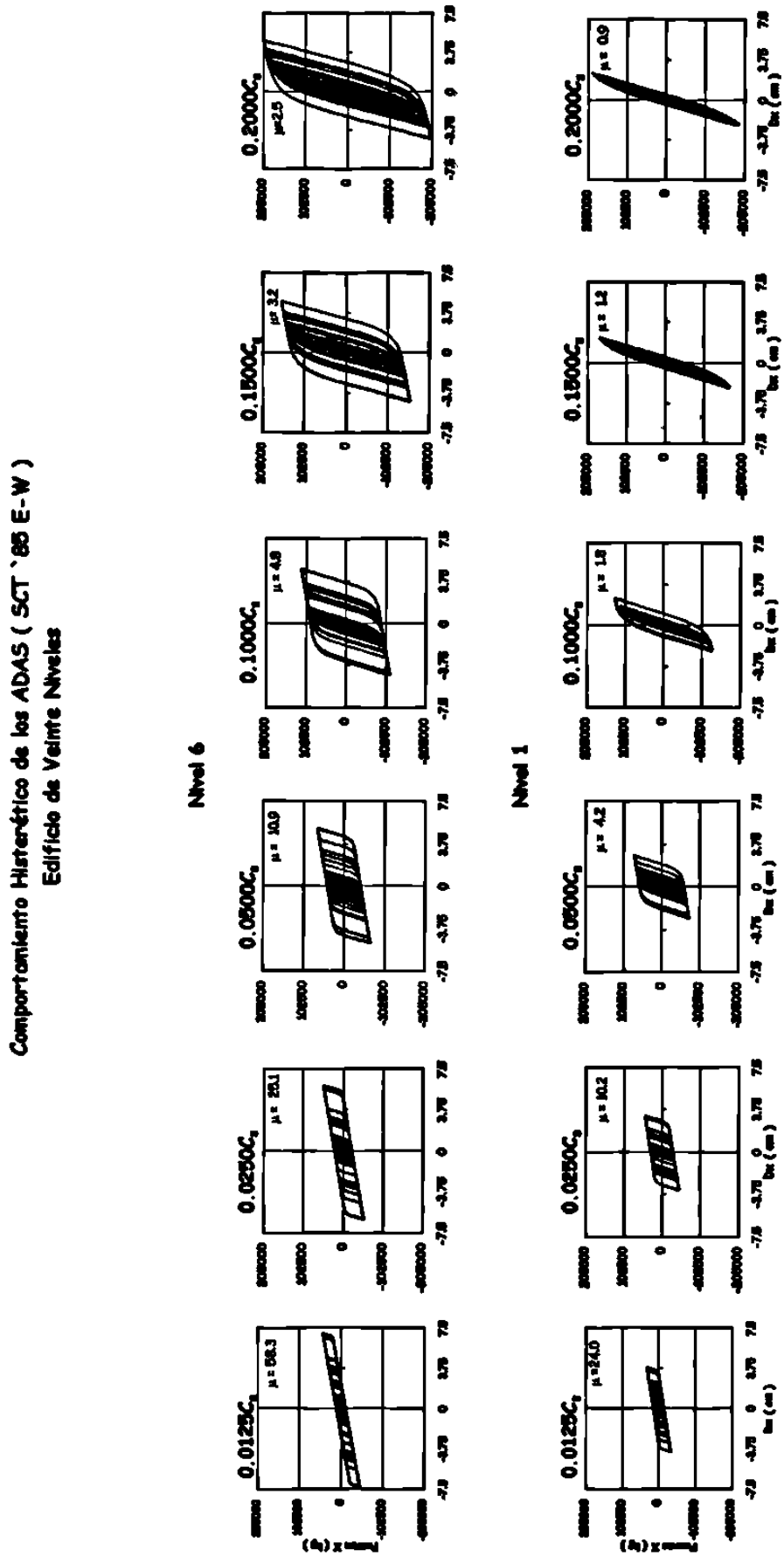


Fig. 7.16 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (SCT `85 (E-W)).

7.8 Análisis general de la respuesta

Ahora, después de observar el comportamiento para los diferentes parámetros estudiados, es posible hacer las siguientes afirmaciones:

En cortantes en la base, el menor cortante se obtiene para el umbral de cedencia de $0.1000C_s$; sin embargo, el límite de fluencia de $0.0500C_s$ tiene un cortante que no es mayor que el anterior en un 2 por ciento. Por lo que se puede afirmar que los cortantes obtenidos para cualquiera de los dos límites de fluencia son prácticamente los mismos.

Hablando de desplazamientos absolutos, tanto en rms como en valores pico, la menor respuesta se obtiene para el límite de fluencia de $0.1000C_s$; no obstante, los desplazamientos relativos, que son los que más se asocian al daño estructural, menores, encontrados, fueron para el umbral de $0.0500C_s$. En este caso, la diferencia entre uno y otro límite de fluencia es alrededor del 10 por ciento, para los desplazamientos absolutos y 40 por ciento, para los desplazamientos relativos.

Atendiendo al comportamiento energético, se observó que los dos umbrales antes mencionados disipan la energía en más o menos los mismos porcentajes, tanto para el caso de energía disipada por amortiguamiento modal, como la energía disipada por comportamiento histerético.

Sin embargo, se observó también que el edificio que menor cantidad de energía de entrada tiene es el que tiene los disipadores con un límite de fluencia igual a $0.0500C_s$. En este caso, la diferencia entre este umbral y el de $0.1000C_s$ es alrededor del 60 por ciento, lo que hace posible afirmar que, a pesar de que los porcentajes de energía disipada sean iguales, no necesariamente se distribuyen igual. Esto se observa con mayor claridad en las gráficas que comparan las energías, las cuales se muestran en la figura 7.13. En ellas se aprecia que es el límite de fluencia de $0.0500C_s$ el que mejor se comporta, ya que a este sistema entra menos cantidad de energía y de la energía que ya ha entrado, menos se disipa por amortiguamiento modal y más por comportamiento histerético, lo que es deseable, ya que de esa forma se tendrá menor daño estructural.

El comportamiento que se observó en los ADAS pone en evidencia que el umbral de cedencia que más dúctil resulta es el de $0.0500C_s$, ya que a pesar de que umbrales más bajos presentan mayores valores de ductilidad, éstos no pueden ser alcanzados en la realidad, de acuerdo con las pruebas hechas por Whittaker, *et al.*, 1989, quienes encontraron que los ADAS pueden desarrollar ductilidades hasta de 14; aunque recomiendan que, para fines de diseño, se usen ductilidades de 10 y, según lo observado en los ciclos histeréticos, es precisamente ese límite de fluencia el que se comporta de acuerdo con lo recomendado.

7.9 Comentarios

En general, es posible afirmar que el mejor comportamiento es el que presenta el límite de fluencia de $0.0500C_s$, ya que, aunque no se obtienen menores cortantes en la base, para el resto de los parámetros evaluados es el que mejor se comporta; sin embargo, el umbral de cedencia de $0.1000C_s$ ofrece también ventajas sobre los otros umbrales estudiados; pero, en este caso, no se tiene tanta ductilidad como la que alcanza el de $0.0500C_s$, lo que puede ser deseable en algunos casos, dependiendo de qué tanto desea el proyectista que se deformen los ADAS ante un evento sísmico, como el que representa el acelerograma utilizado para este análisis.

Vale la pena mencionar que es gracias a que el mayor porcentaje de rigidez lateral del edificio es proporcionado por los ADAS es posible que se disipe energía, ya que, como se vio en el edificio de cuatro niveles, cuando los marcos toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, la energía que los disipadores logran disipar no es la suficiente como para emplear este tipo de mecanismos en la estructura. Existen investigaciones como las desarrolladas por Díaz, O. y Esteva, L. (1998), quienes han estudiado la proporción de rigidez que deben guardar los disipadores con respecto a los marcos.