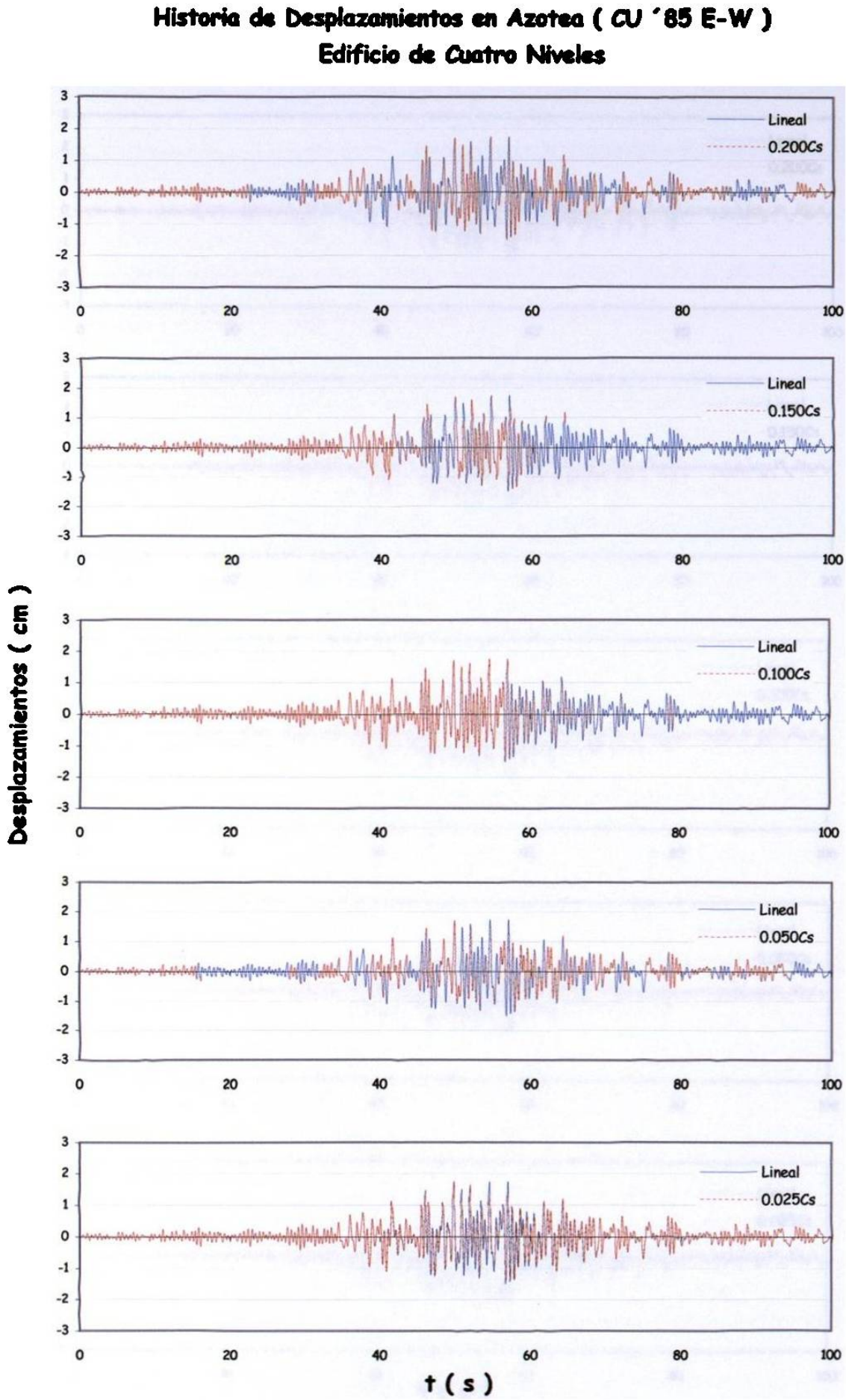


Fig. 6.26 Historia de desplazamientos en azotea (CU `85); K_{ADAS} = 25 %.

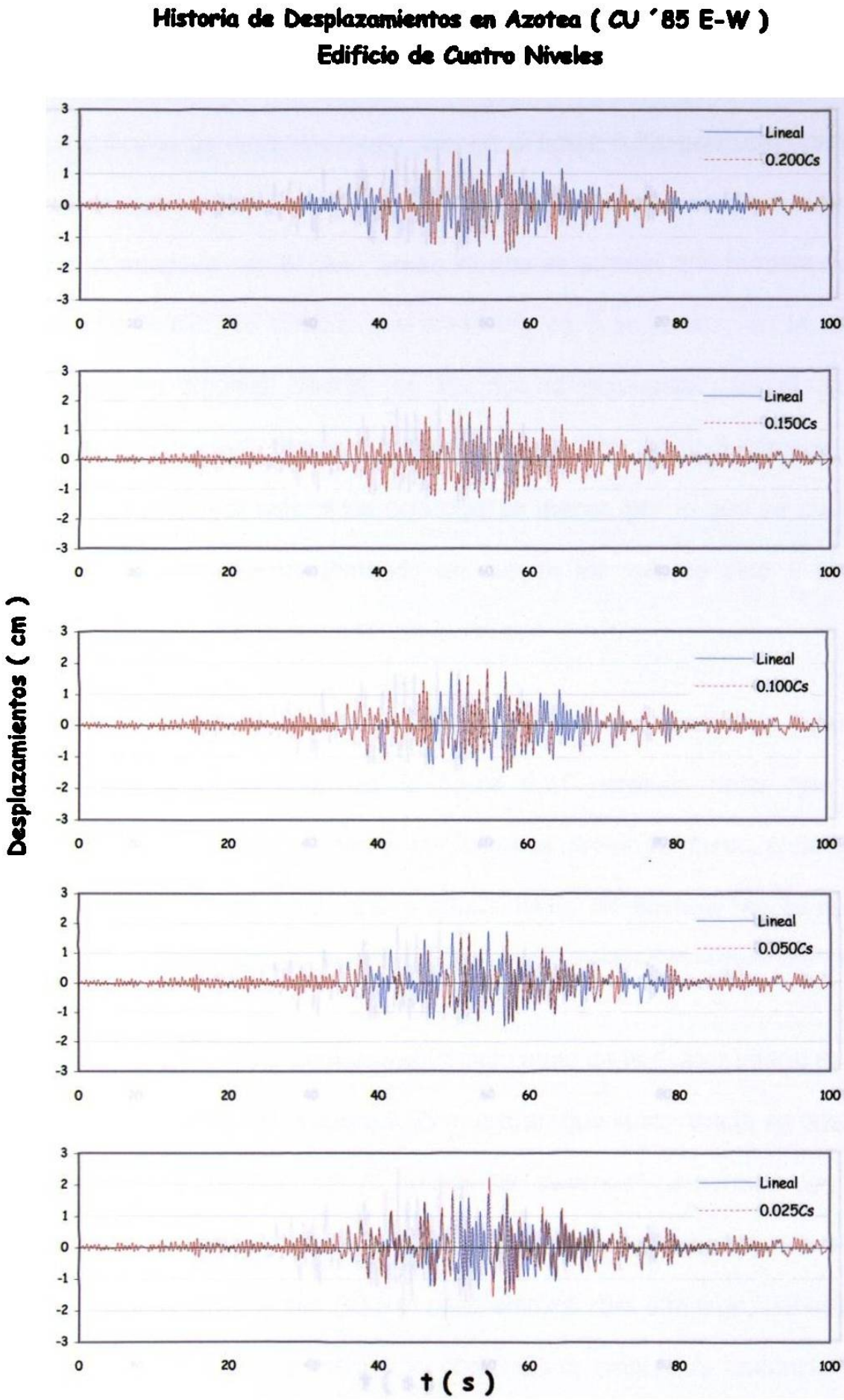


Fig. 6.27 Historia de desplazamientos en azotea (CU `85); K_{ADAS} = 50 %.

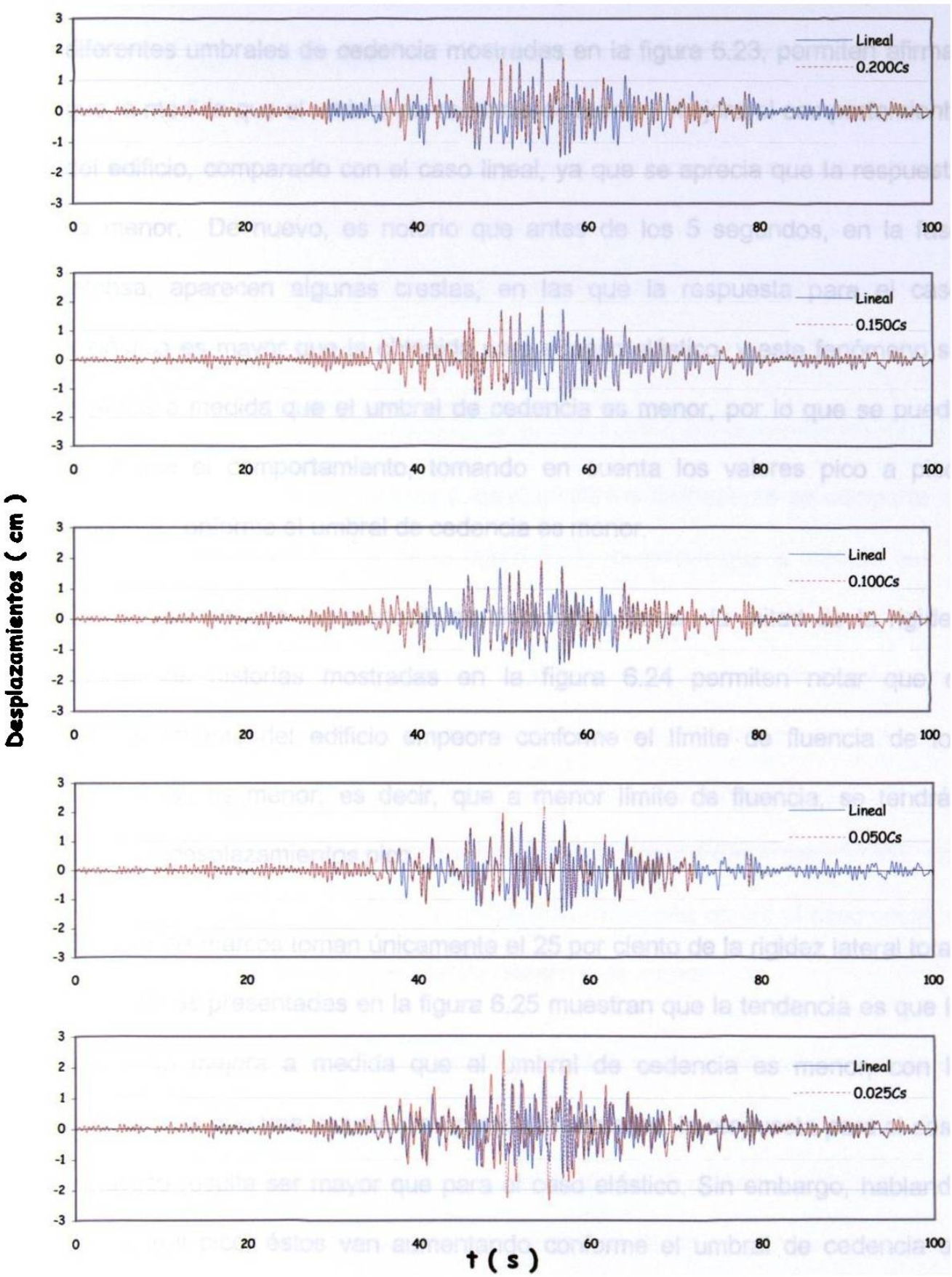


Fig. 6.28 Historia de desplazamientos en azotea (CU `85); K_{ADAS} = 75 %.

Para el sismo de El Centro, cuando la rigidez lateral mayor es la de los marcos, la comparación de las historias de desplazamientos en azotea para los diferentes umbrales de cedencia mostradas en la figura 6.23, permiten afirmar que, a medida que el umbral de cedencia es menor, mejora el comportamiento del edificio, comparado con el caso lineal, ya que se aprecia que la respuesta es menor. De nuevo, es notorio que antes de los 5 segundos, en la fase intensa, aparecen algunas crestas, en las que la respuesta para el caso inelástico es mayor que la obtenida para el caso elástico, y este fenómeno se acentúa a medida que el umbral de cedencia es menor, por lo que se puede decir que el comportamiento, tomando en cuenta los valores pico a pico, empeora conforme el umbral de cedencia es menor.

En el caso en que los dispositivos disipadores toman la mitad de la rigidez lateral, las historias mostradas en la figura 6.24 permiten notar que el comportamiento del edificio empeora conforme el límite de fluencia de los disipadores es menor; es decir, que a menor límite de fluencia, se tendrán mayores desplazamientos pico.

Cuando los marcos toman únicamente el 25 por ciento de la rigidez lateral total, las historias presentadas en la figura 6.25 muestran que la tendencia es que la respuesta mejora a medida que el umbral de cedencia es menor, con la salvedad de que una vez más, en puntos localizados, la respuesta para el caso inelástico resulta ser mayor que para el caso elástico. Sin embargo, hablando de valores pico, éstos van aumentando conforme el umbral de cedencia es menor, de manera que en valores pico no se aprecia mejoría en la respuesta.

En el sismo de CU, si los marcos son los que toman la mayoría de la rigidez lateral, según las historias de desplazamientos en la azotea de la figura 6.26, es posible afirmar que al incorporar los dispositivos, disipadores de energía, se mejora el comportamiento del edificio, ya que se obtienen valores máximos menores cuando se utilizan estos dispositivos que cuando la estructura trabaja linealmente. No obstante, en valores máximos, pico a pico, la tendencia muestra que éstos son mayores a medida que el umbral de cedencia es menor, aunque, en este caso, la diferencia entre el caso lineal y el límite de fluencia menor ($0.025C_s$) no es mayor que el 7 por ciento.

Cuando la rigidez de los marcos y los dispositivos disipadores se comparte en partes iguales, las historias de la figura 6.27, muestran que a medida que el umbral de cedencia es menor, el comportamiento general de la estructura mejora; sin embargo, se presenta el fenómeno de que en la fase intensa del sismo, los desplazamientos observados para los casos inelásticos son mayores que los del caso lineal. En este caso, se repite la tendencia de que a menor límite de fluencia, mayores son los desplazamientos máximos registrados; con un aumento máximo del 22 %, comparada la respuesta contra el caso lineal, el cual se presenta cuando el umbral de cedencia es menor.

En el caso en que los dispositivos disipadores toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, debido a que este sismo presenta la fase intensa entre los 40 y 60 seg. Es precisamente en ese intervalo en el que se aprecia que la respuesta para los casos inelásticos supera a la respuesta obtenida para el caso lineal, según se observa en la figura 6.28. Fuera de ese intervalo, para cualquier

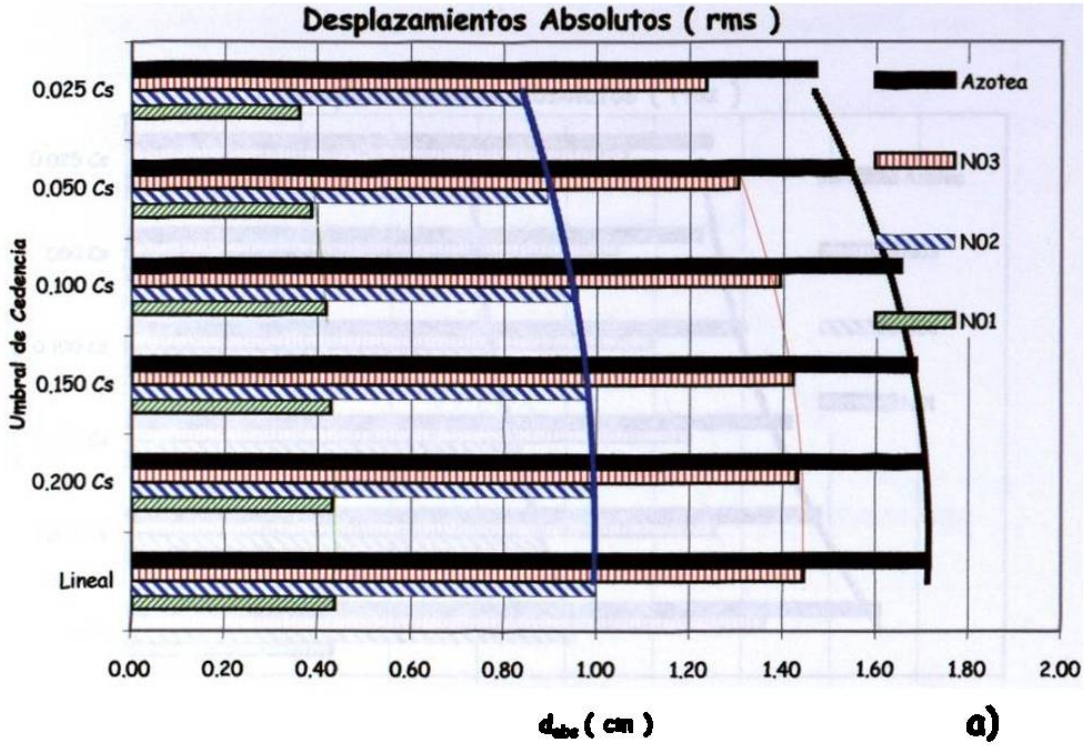
límite de fluencia de los disipadores se presenta un menor desplazamiento que para el caso lineal. Sin embargo, en valores pico se ve que éstos son mayores, a medida que el límite de fluencia es menor, incrementándose el desplazamiento lineal hasta en un 32 por ciento, cuando la fluencia en los disipadores se alcanza con un valor de $0.025C_s$.

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

Al igual que en el caso de los cortantes, se utiliza el índice de rms para encontrar el punto óptimo del umbral de cedencia de los disipadores de energía.

Para los dos sismos utilizados en el análisis de este edificio y para cada caso de rigidez lateral estudiado se presentan las gráficas en las que se comparan los desplazamientos absolutos y relativos máximos en rms y se incluye en cada una de las gráficas comparativas una línea que muestra la tendencia del comportamiento. Con esa línea se aprecia, de manera relativamente fácil, entre qué umbrales de cedencia se localiza el punto óptimo del límite de fluencia de los dispositivos histeréticos. Algo importante que hay que tener presente en lo que respecta a los desplazamientos, es que, según las recomendaciones de los códigos estos deben limitarse a valores permisibles, aunque al limitar los desplazamientos a los recomendados en los códigos es posible que los disipadores no desarrollen toda la ductilidad que les es posible alcanzar y, por lo mismo la energía disipada por histéresis estará limitada. Estás gráficas se muestran en las figuras 6.29 a 6.34.

Comparación de Desplazamientos (El Centro)
Edificio de Cuatro Niveles



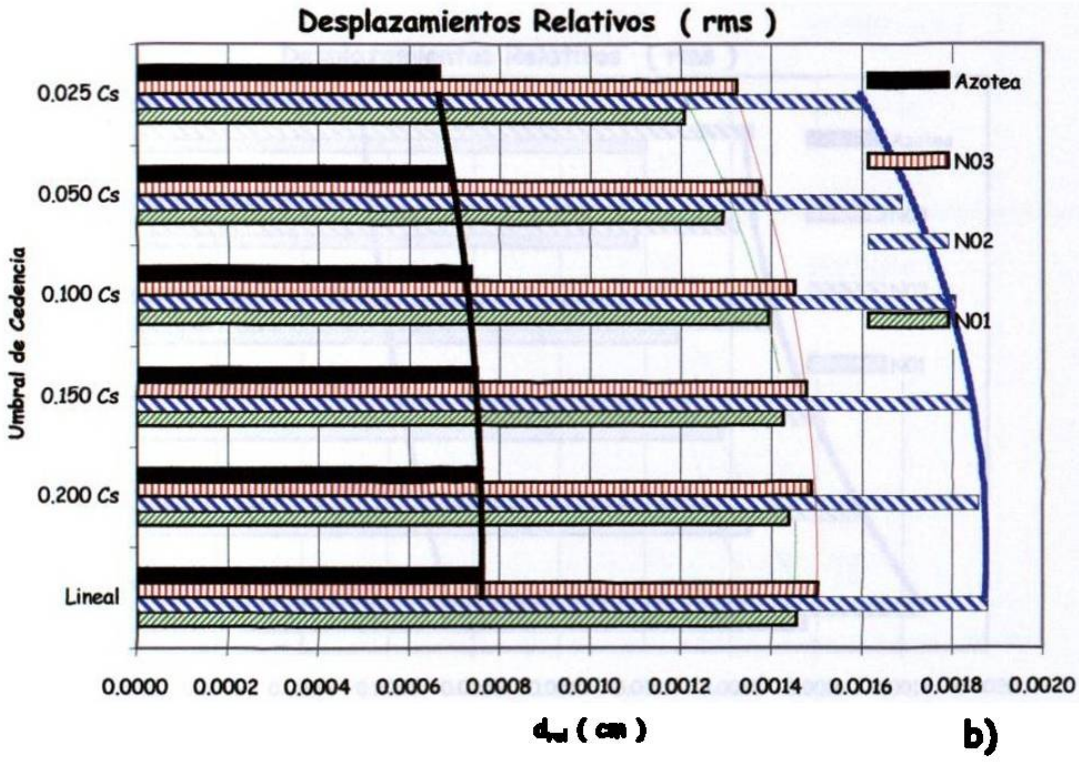
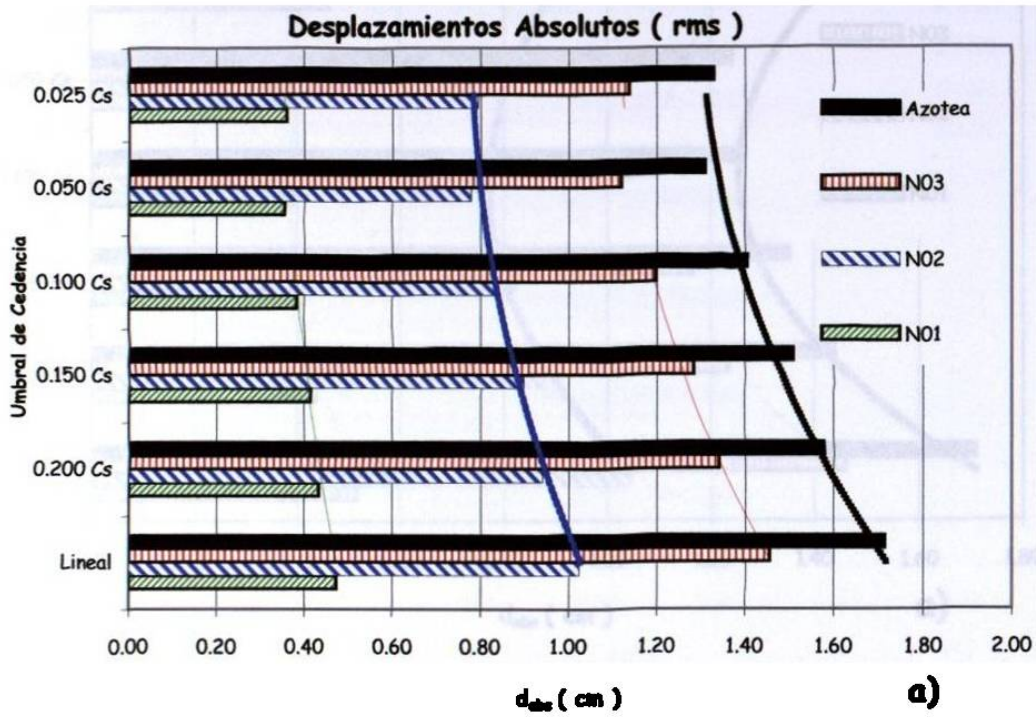


Fig. 6.29 Valores máximos de desplazamientos (El Centro); K_{ADAS} = 25 %.

Comparación de Desplazamientos (El Centro)
Edificio de Cuatro Niveles



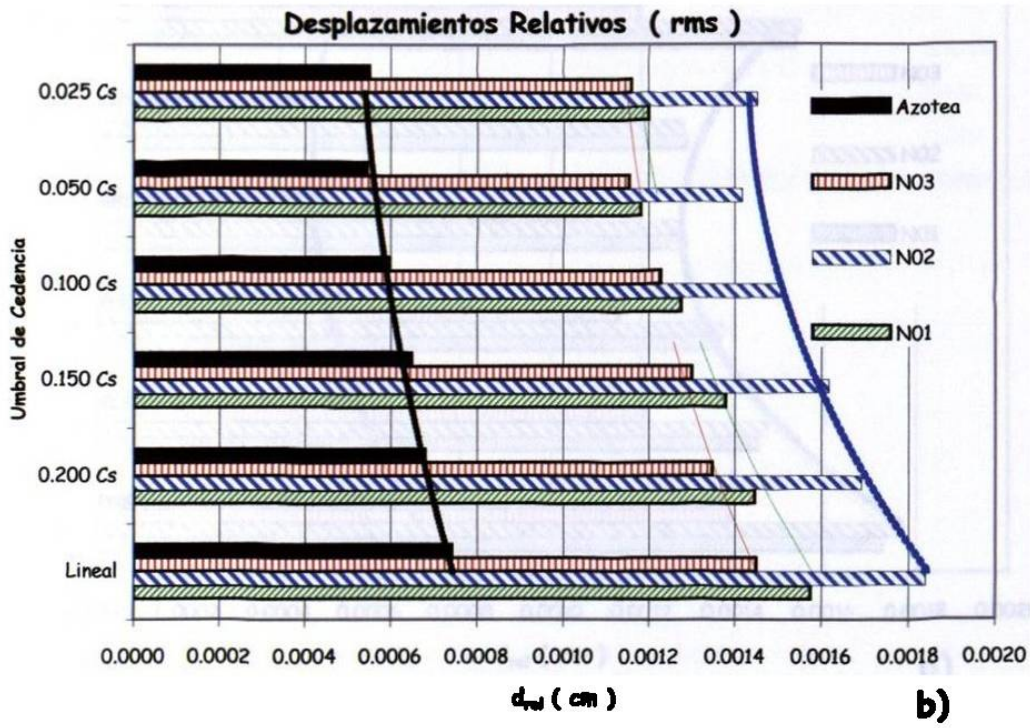
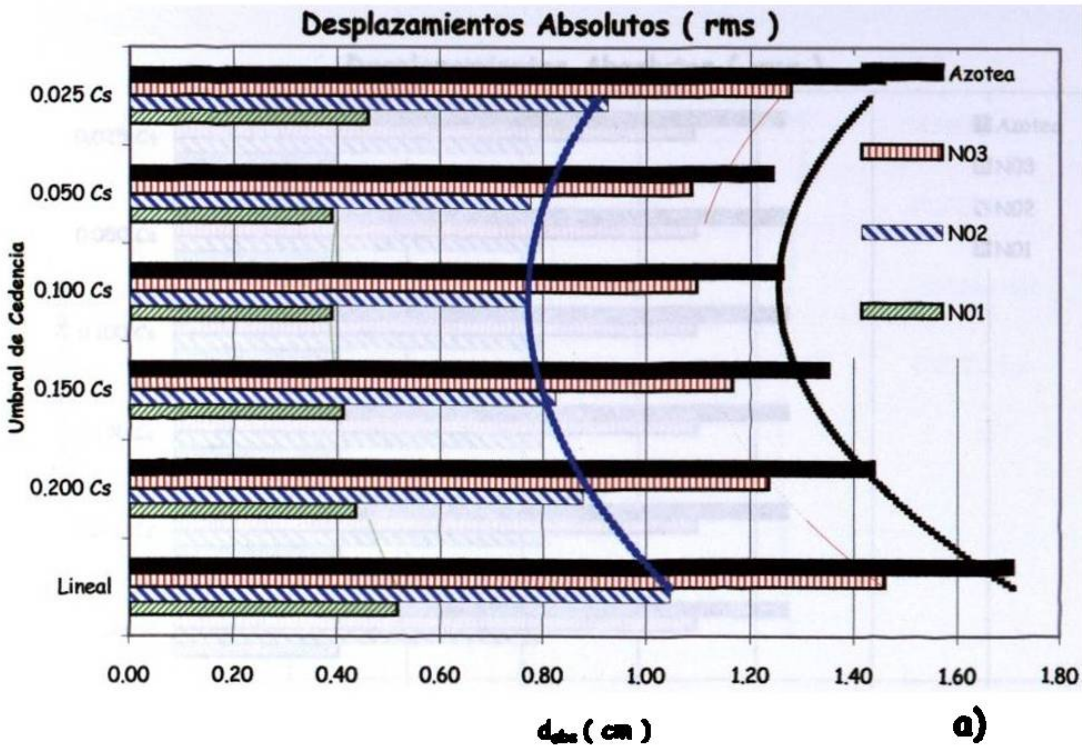


Fig. 6.30 Valores máximos de desplazamientos (El Centro); K_{ADAS} = 50 %.

Comparaciónde Desplazamientos (El Centro)
Edificio de Veinte Niveles



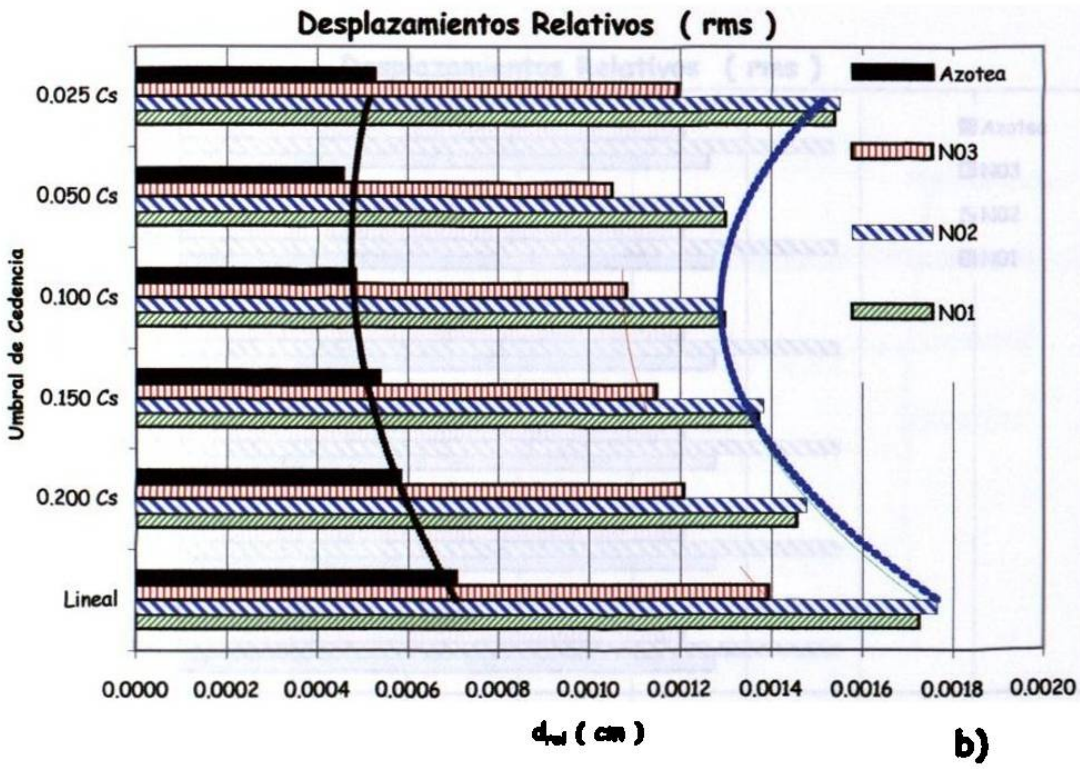
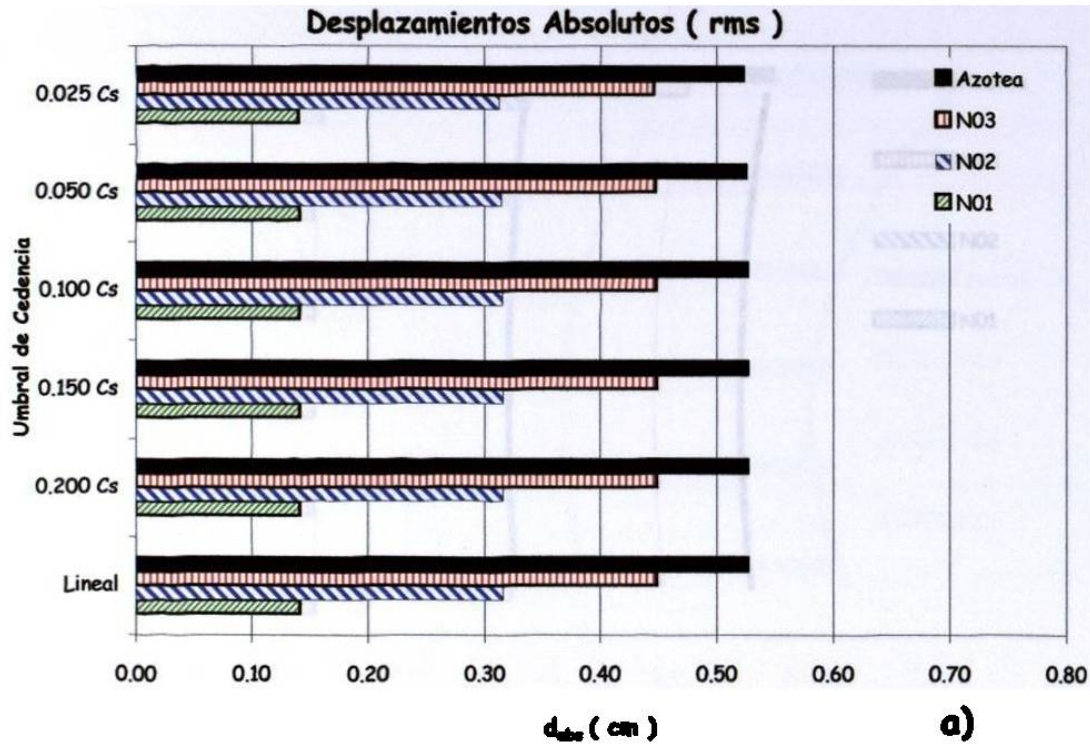


Fig. 6.31 Valores máximos de desplazamientos (El Centro); K_{ADAS} = 75 %.

Historia de Desplazamientos en Azotea (CU '85 E-W)
Edificio de Cuatro Niveles



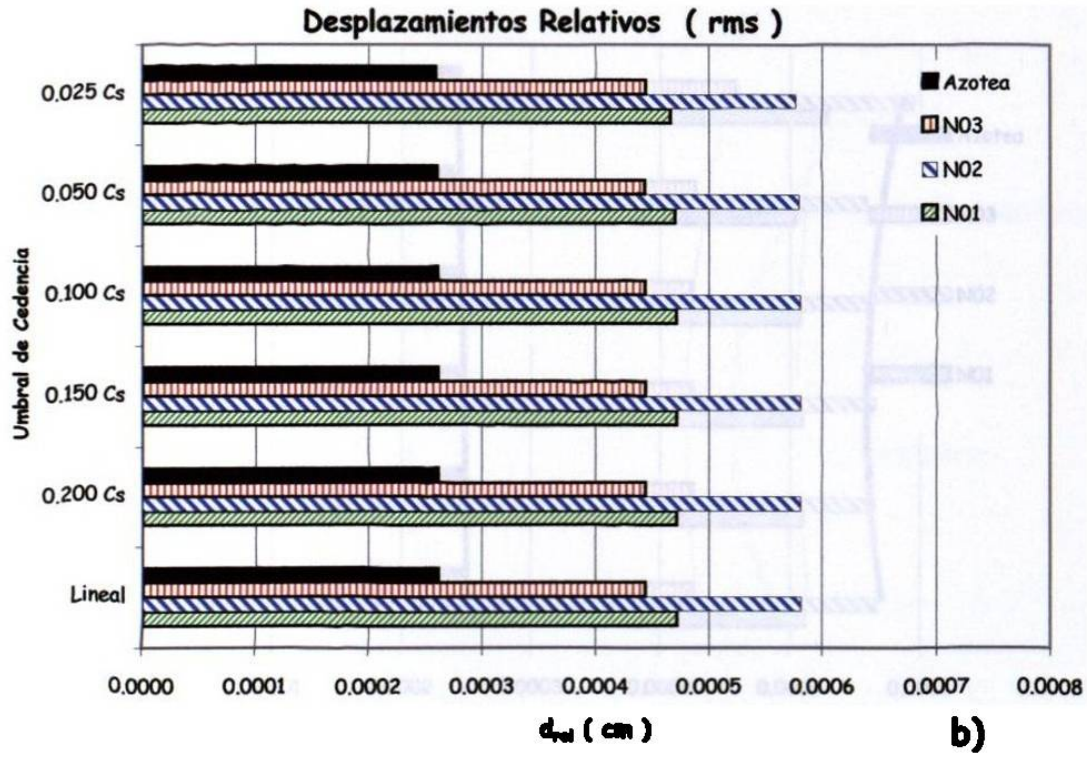
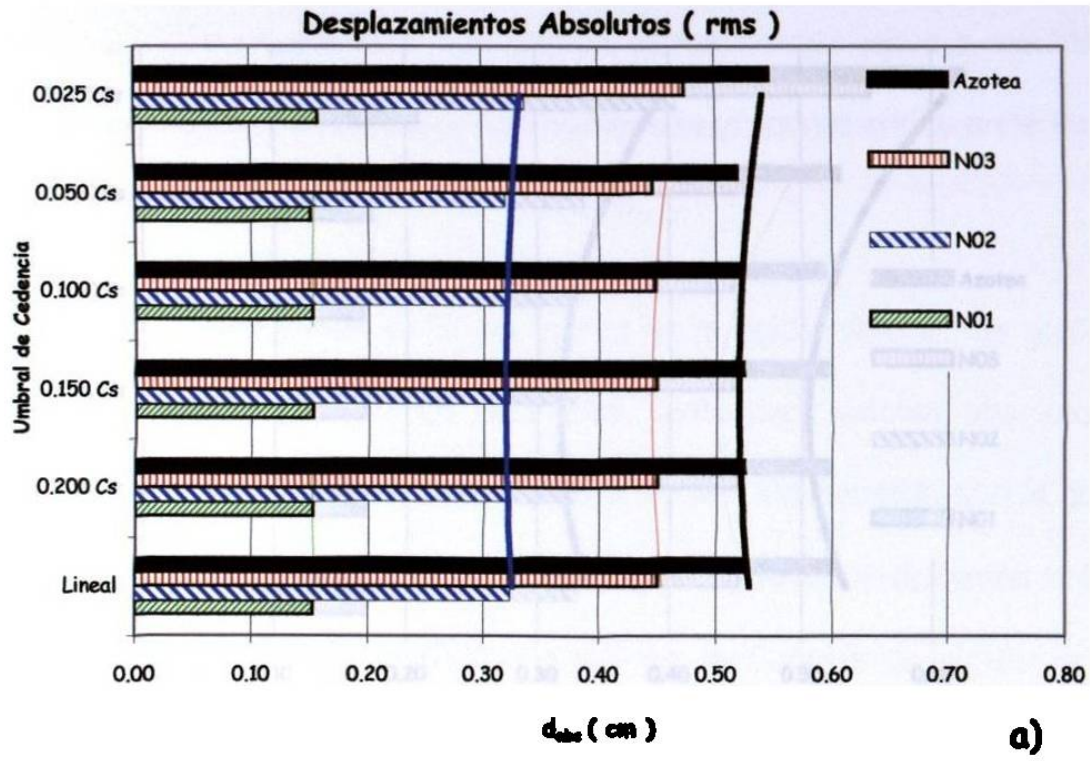


Fig. 6.32 Valores máximos de desplazamientos (CU `85); K_{ADAS} = 25 %.

Historia de Desplazamientos en Azotea (CU ´85 E-W)
Edificio de Cuatro Niveles



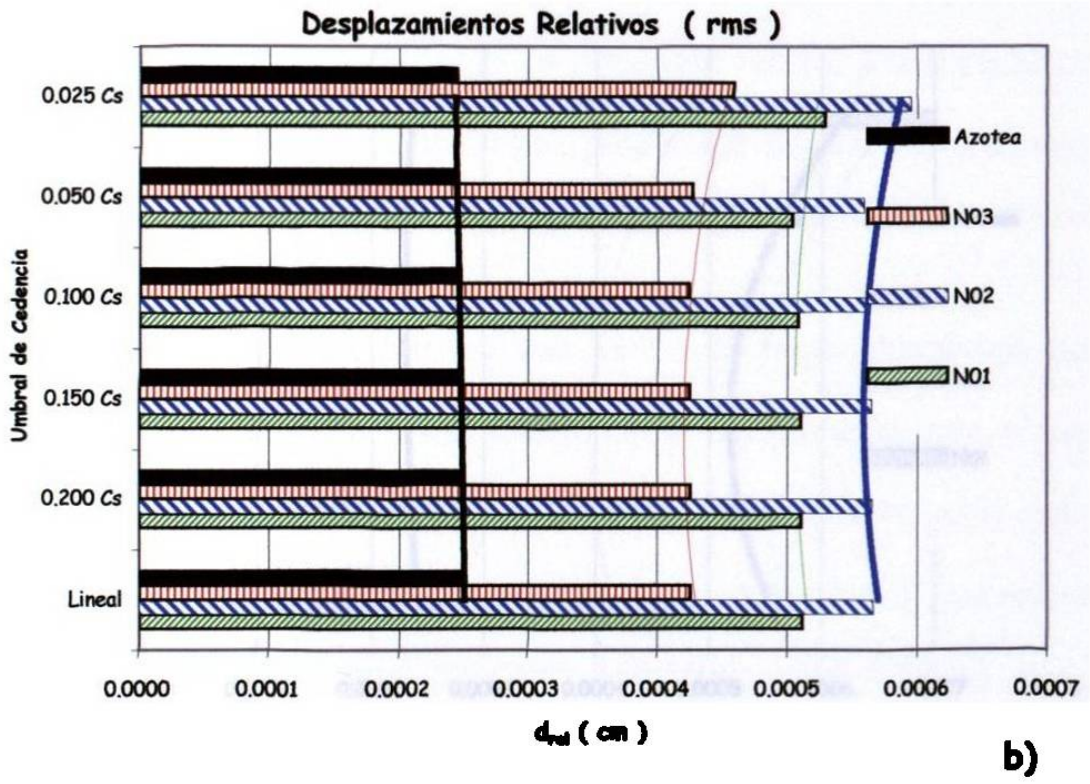
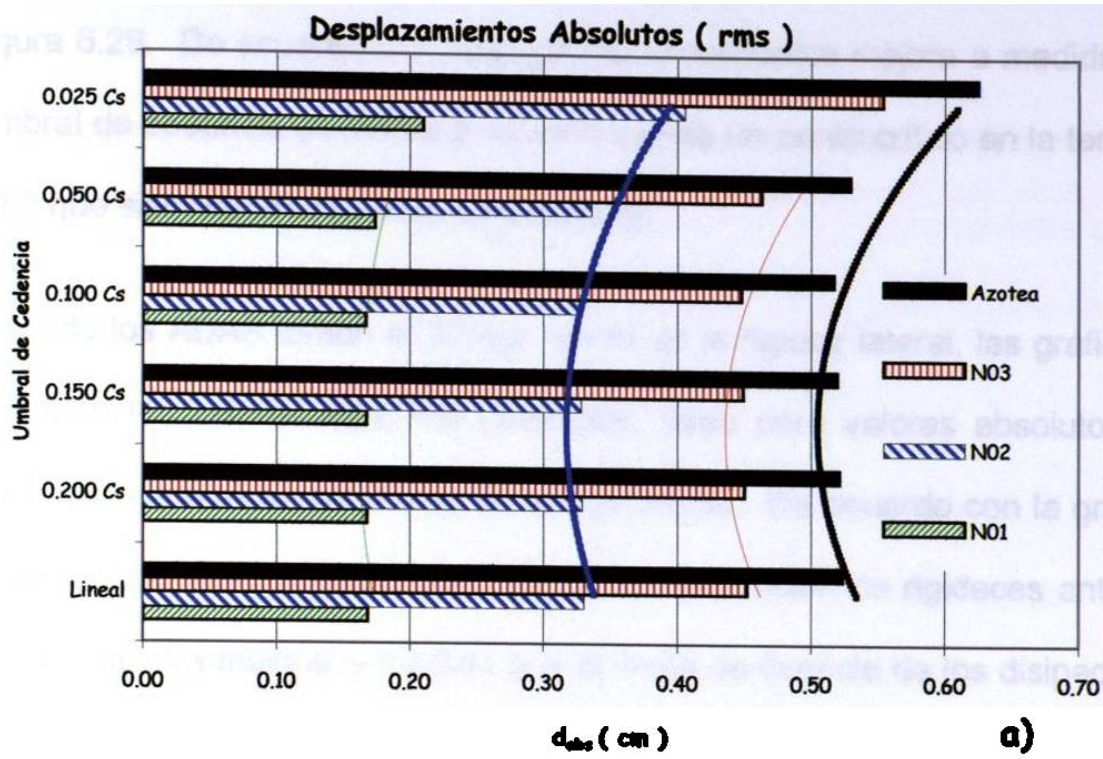


Fig. 6.33 Valores máximos de desplazamientos (CU `85); K_{ADAS} = 50 %.

Historia de Desplazamientos en Azotea (CU ´85 E-W); K_{ADAS} = 75%
Edificio de Cuatro Niveles



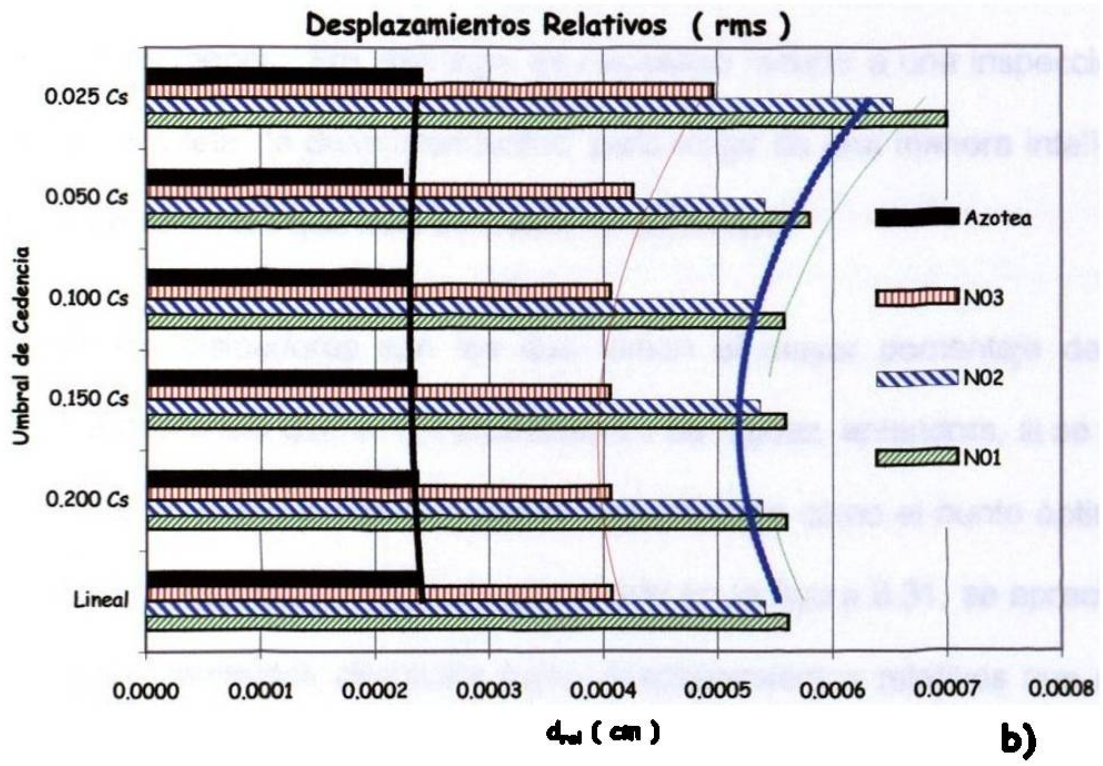


Fig. 6.34 Valores máximos de desplazamientos (CU `85); K_{ADAS} = 75 %.

Para el sismo de El Centro, en el caso en que los marcos toman el mayor porcentaje de la rigidez lateral, las tendencias que se observan, tanto para desplazamientos absolutos como desplazamiento relativos, se mostraron en la figura 6.29. De acuerdo con esa gráfica, la respuesta mejora a medida que el umbral de cedencia es menor y no se presenta un punto crítico en la tendencia, sino que siempre la tendencia es a mejorar.

Cuando los ADAS toman el 50 por ciento de la rigidez lateral, las gráficas que resumen los valores máximos obtenidos, tanto para valores absolutos como para los relativos se presentan en la figura 6.30. De acuerdo con la gráfica se observa que, de nuevo, al igual que en la distribución de rigideces anterior, la tendencia es a mejorar a medida que el límite de fluencia de los disipadores es menor, no se observa un punto crítico que pudiera considerarse como el punto óptimo sino que el desplazamiento disminuye a medida que el umbral de cedencia es menor. Sin embargo, es necesario recurrir a una inspección de la historia completa de desplazamientos, para elegir de una manera inteligente el umbral de cedencia que más conviene en este caso.

Cuando los disipadores son los que toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, a diferencia que en las proporciones de rigidez anteriores, si se observa que existe un punto crítico que puede considerarse como el punto óptimo para el umbral de cedencia. Según lo observado en la figura 6.31, se aprecia, tanto para desplazamientos absolutos como desplazamientos relativos que el punto óptimo del límite de fluencia de los ADAS se localiza entre 0.050 y $0.025C_s$. En primera instancia parece que justamente es ahí en donde se encuentra el

umbral de cedencia que mejora el comportamiento del edificio; sin embargo, al igual que en los casos anteriores, es necesario observar detenidamente la historia completa de desplazamientos, que se muestra en la figura 6.25.

El análisis hecho con el sismo de CU muestra que, cuando la rigidez lateral tomada por los marcos es del 75 por ciento, no existe diferencia entre colocar y no colocar disipadores de energía, atendiendo al índice rms. Según se aprecia en la figura 6.32.

En el caso en que los ADAS toman la mitad de la rigidez lateral, al igual que en el caso anterior y según lo observado en la figura 6.33, no es posible localizar un punto óptimo de comportamiento de los disipadores, ya que los valores en rms son prácticamente los mismos para cualquiera de los umbrales de cedencia estudiados, con la salvedad del menor, $0.025C_s$, el cual tiene respuestas mayores que los demás.

Si los ADAS toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, es notoria la existencia de un punto óptimo para el nivel de fluencia de los ADAS, esto se ve con claridad en la figura 6.34, en la cual se presenta un resumen de los desplazamientos absolutos y relativos para los diferentes niveles del edificio y los distintos umbrales de cedencia. Según esta gráfica, el punto óptimo se localiza entre 0.100 y $0.050C_s$, aunque si se comparan estos valores de desplazamiento contra los del caso lineal, no se observa mejoría, es decir, que no disminuyen los desplazamientos.

6.6 Energías

Para evaluar la respuesta del edificio, se considera que las energías juegan un papel importante, ya que la energía es la moneda universal de la física; es decir, que resulta un parámetro común de comparación, en cualquier fenómeno físico, en este caso el análisis estructural de un edificio, ante un evento sísmico, también es un fenómeno físico.

Es por ello que en este trabajo se decidió, además del enfoque "clásico", utilizado para evaluar la respuesta de un edificio ante un sismo, que es el de desplazamientos y cortantes, se analiza y compara el enfoque energético, con la premisa de que es precisamente ese parámetro, la energía, el que permite de una manera más clara comprender el comportamiento del edificio.

Gracias a que el programa utilizado en este trabajo para el análisis de los edificios (ETABS) permite calcular de manera directa las energías de entrada, cinética y potencial, así como también la energía disipada, tanto por comportamiento modal como por comportamiento histerético, de acuerdo con la ecuación que de balance energético propuesta por Chia-Ming y Bertero (1988), se aprovecha esta posibilidad y se coparan las diferentes energías para complementar la evaluación de la respuesta de la estructura.

Las figuras 6.35 a 6.46 muestran los resultados obtenidos para el sismo de El Centro. En estas figuras se comparan las diferentes energías, para los umbrales de cedencia estudiados.

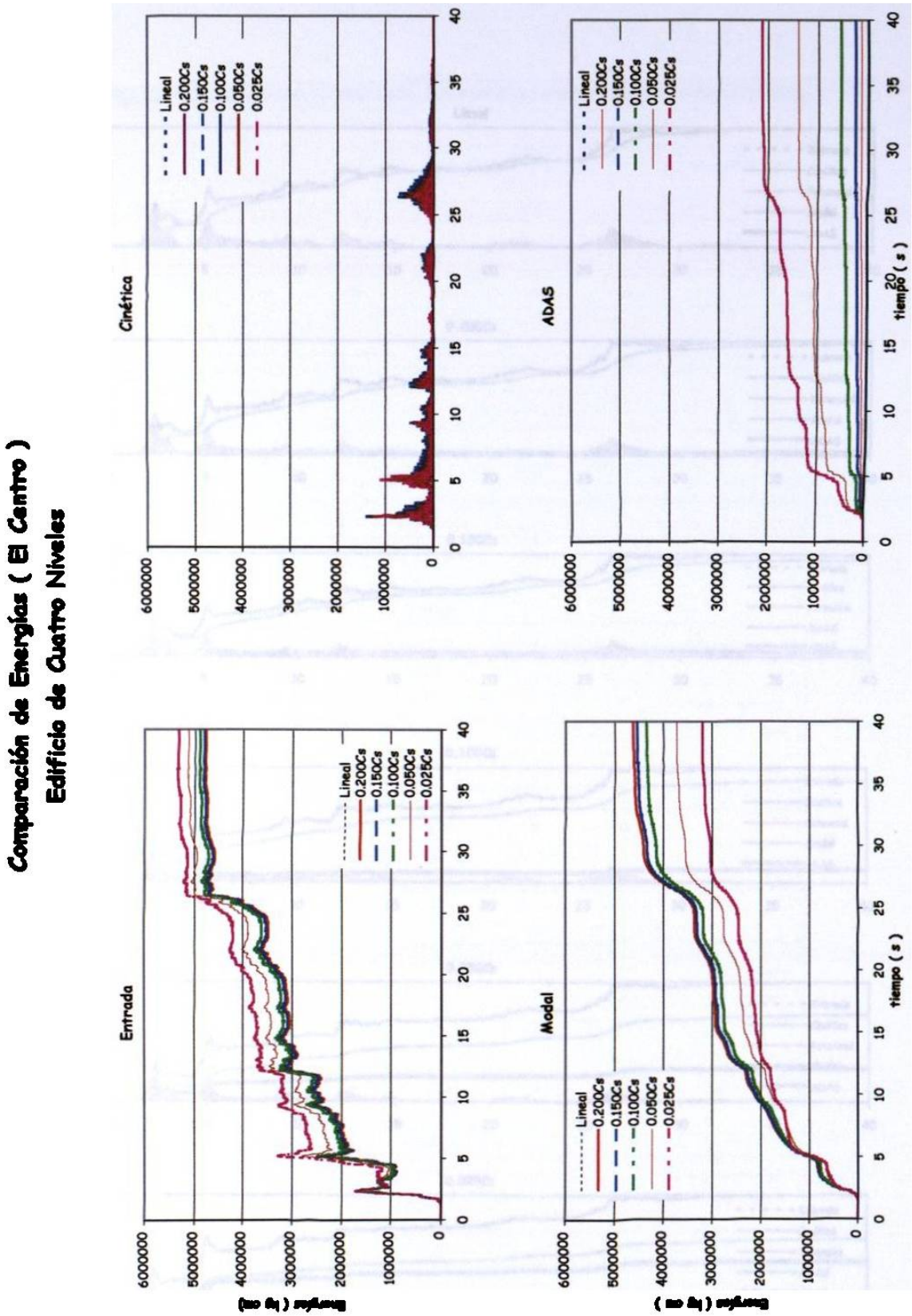


Fig. 6.35 Historias de energías (El Centro); K_{ADAS} = 25 %.

Energías (El Centro)
Edificio de Cuatro Niveles

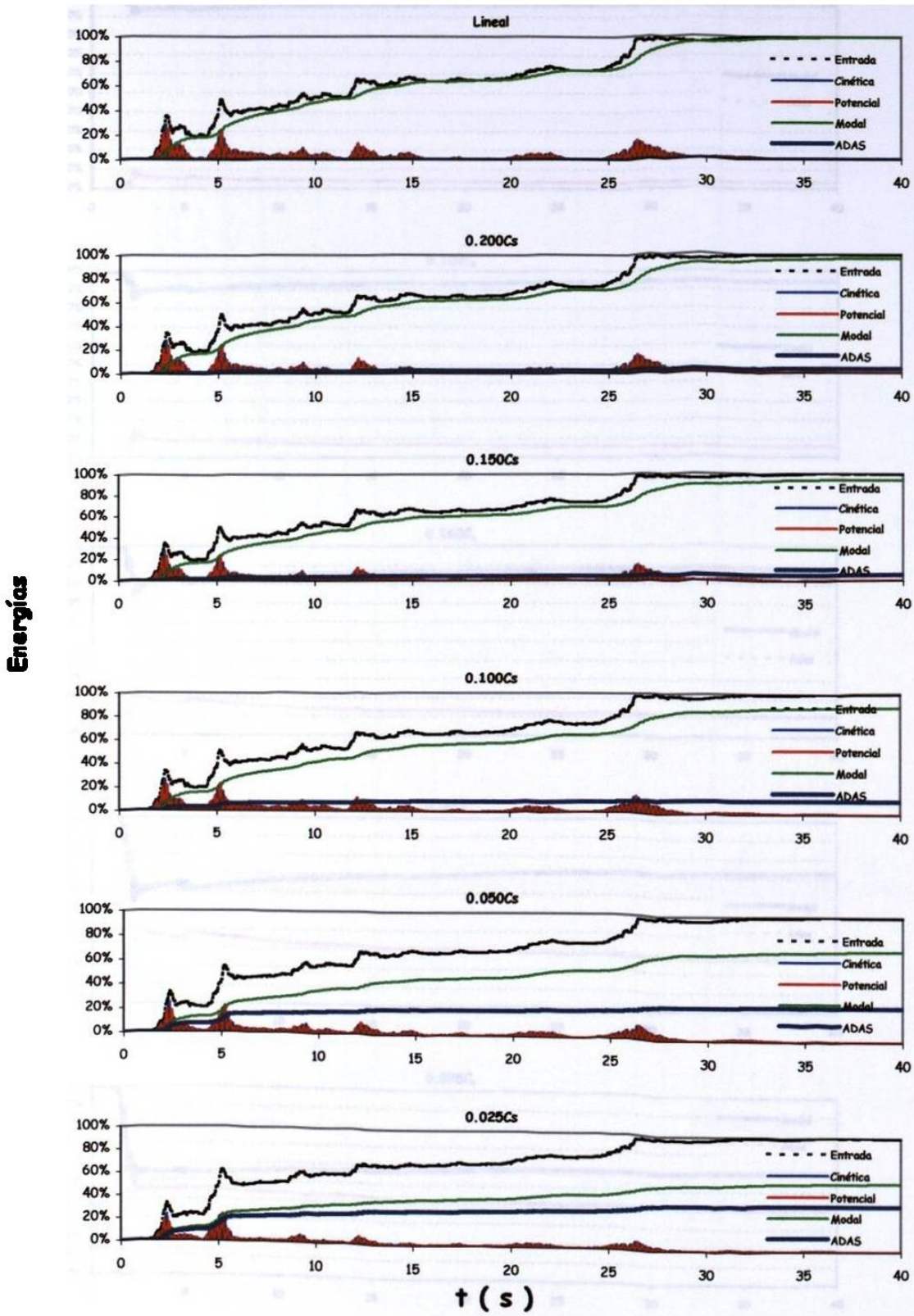


Fig. 6.36 Porcentajes de energías (El Centro); K_{ADAS} = 25 %.

Energías Disipadas (El Centro)
Edificio de Cuatro Niveles

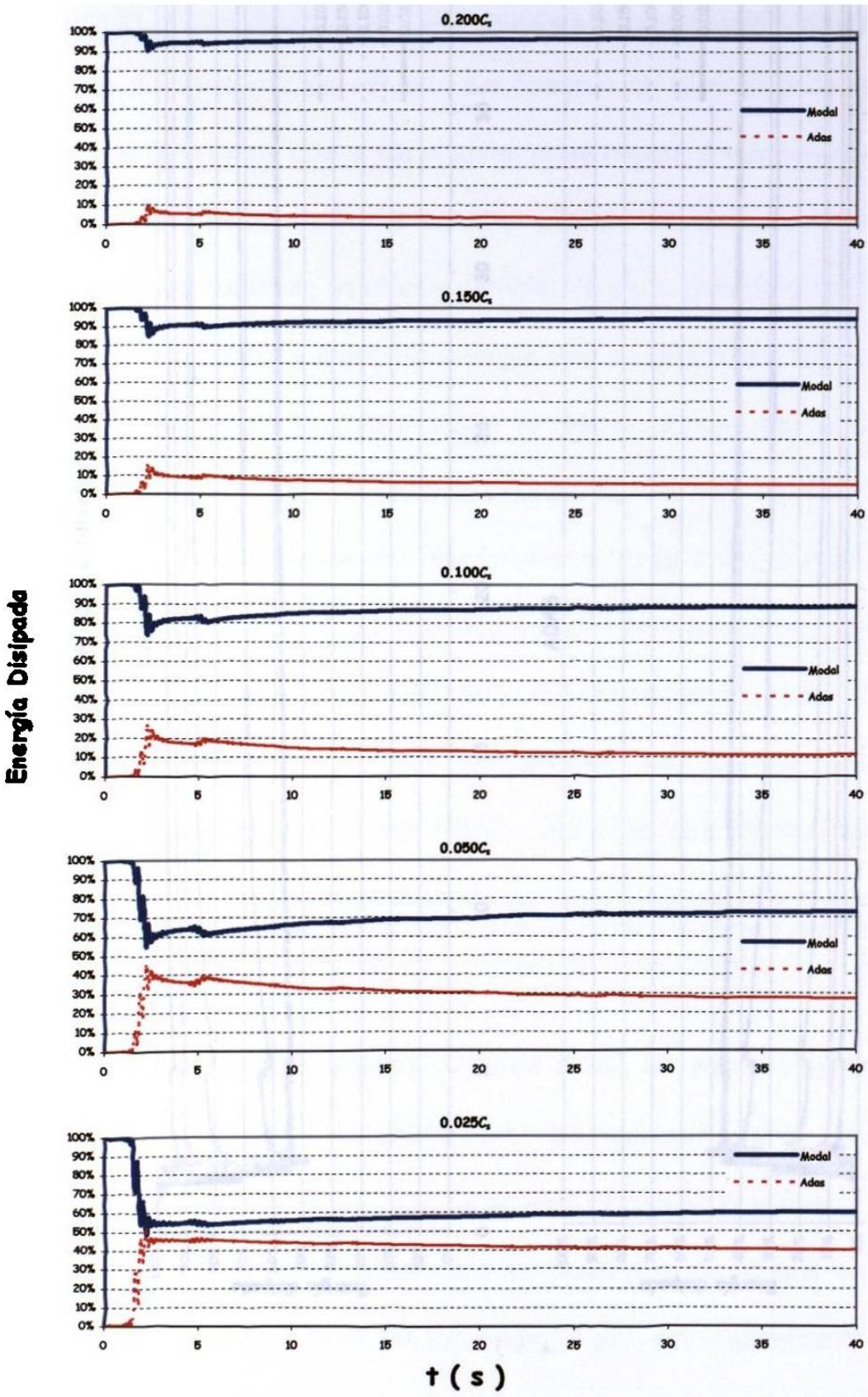


Fig. 6.37 Energías disipadas (El Centro); K_{ADAS} = 25 %.

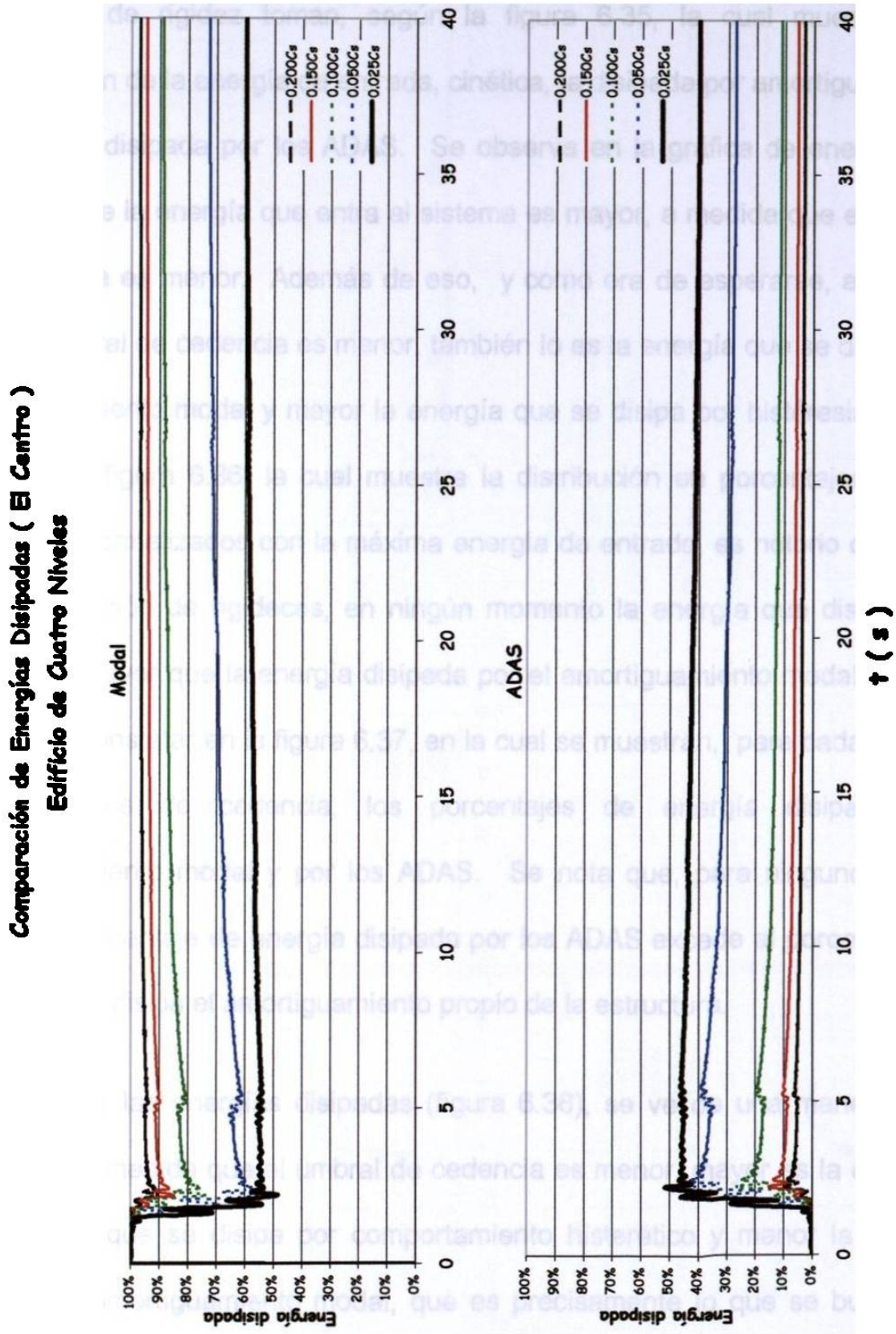


Fig. 6.38 Comparación de energías disipadas (El Centro); K_{ADAS} = 25 %.

Para el sismo de El Centro y en el caso en que los marcos son los que mayor porcentaje de rigidez toman, según la figura 6.35, la cual muestra una comparación de la energía de entrada, cinética, la disipada por amortiguamiento modal y la disipada por los ADAS. Se observa en la gráfica de energías de entrada, que la energía que entra al sistema es mayor, a medida que el umbral de cedencia es menor. Además de eso, y como era de esperarse, a medida que el umbral de cedencia es menor, también lo es la energía que se disipa por amortiguamiento modal y mayor la energía que se disipa por histéresis. Si se observa la figura 6.36, la cual muestra la distribución en porcentajes de las energías, normalizados con la máxima energía de entrada, es notorio que, con esta proporción de rigideces, en ningún momento la energía que disipan los ADAS es mayor que la energía disipada por el amortiguamiento modal, lo cual se puede constatar en la figura 6.37, en la cual se muestran, para cada uno de los umbrales de cedencia, los porcentajes de energía disipada por amortiguamiento modal y por los ADAS. Se nota que, para ninguno de los casos el porcentaje de energía disipada por los ADAS excede al porcentaje de energía que disipa el amortiguamiento propio de la estructura.

Al comparar las energías disipadas (figura 6.38), se ve de una manera más clara que a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es la cantidad de energía que se disipa por comportamiento histerético y menor la que se disipa por amortiguamiento modal, que es precisamente lo que se busca, ya que conseguir que se disipe menor energía por amortiguamiento modal se traduce en menor daño a la estructura.

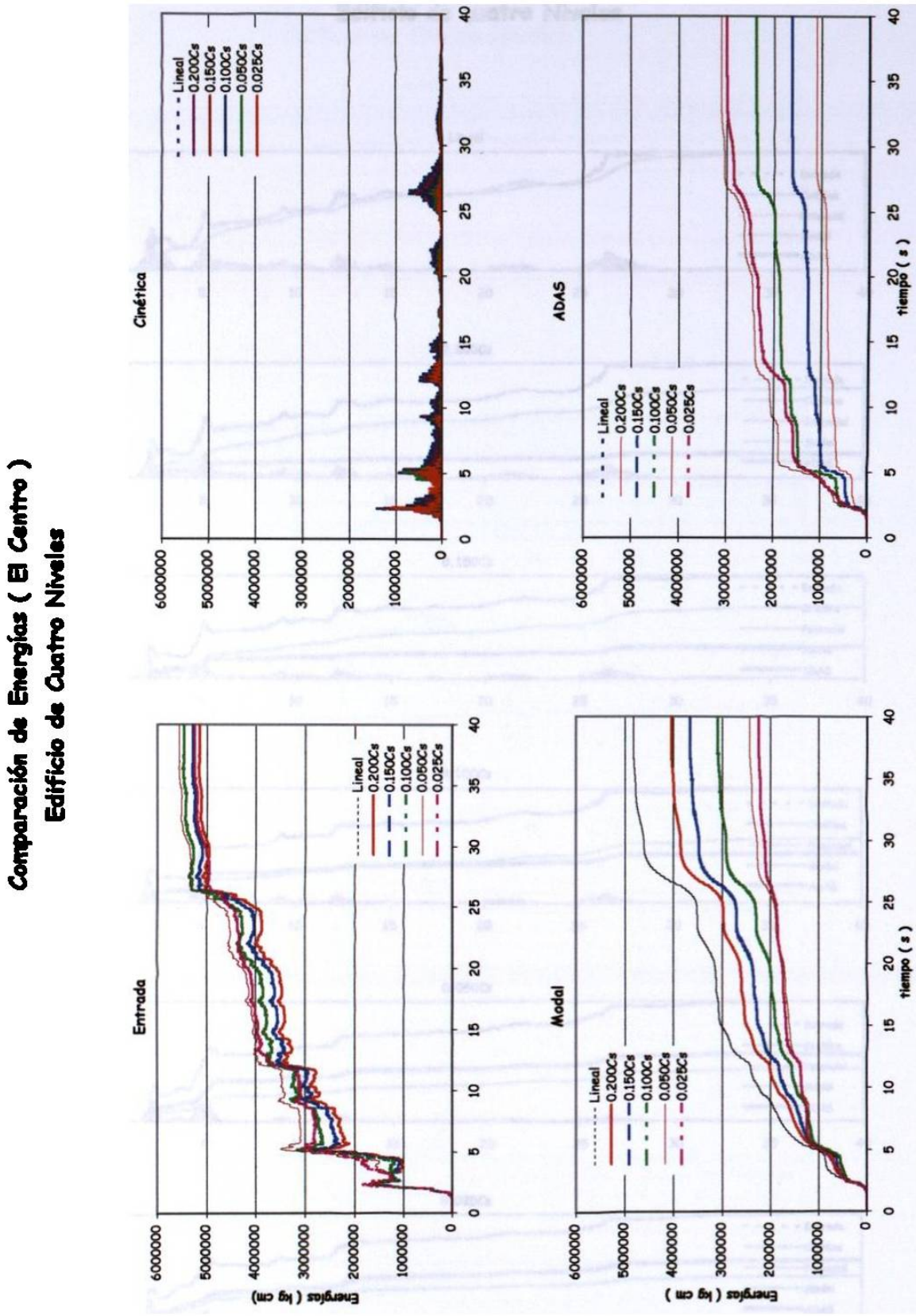


Fig. 6.39 Historias de energías (El Centro); K_{ADAS} = 50 %.

Energías (El Centro)
Edificio de cuatro Niveles

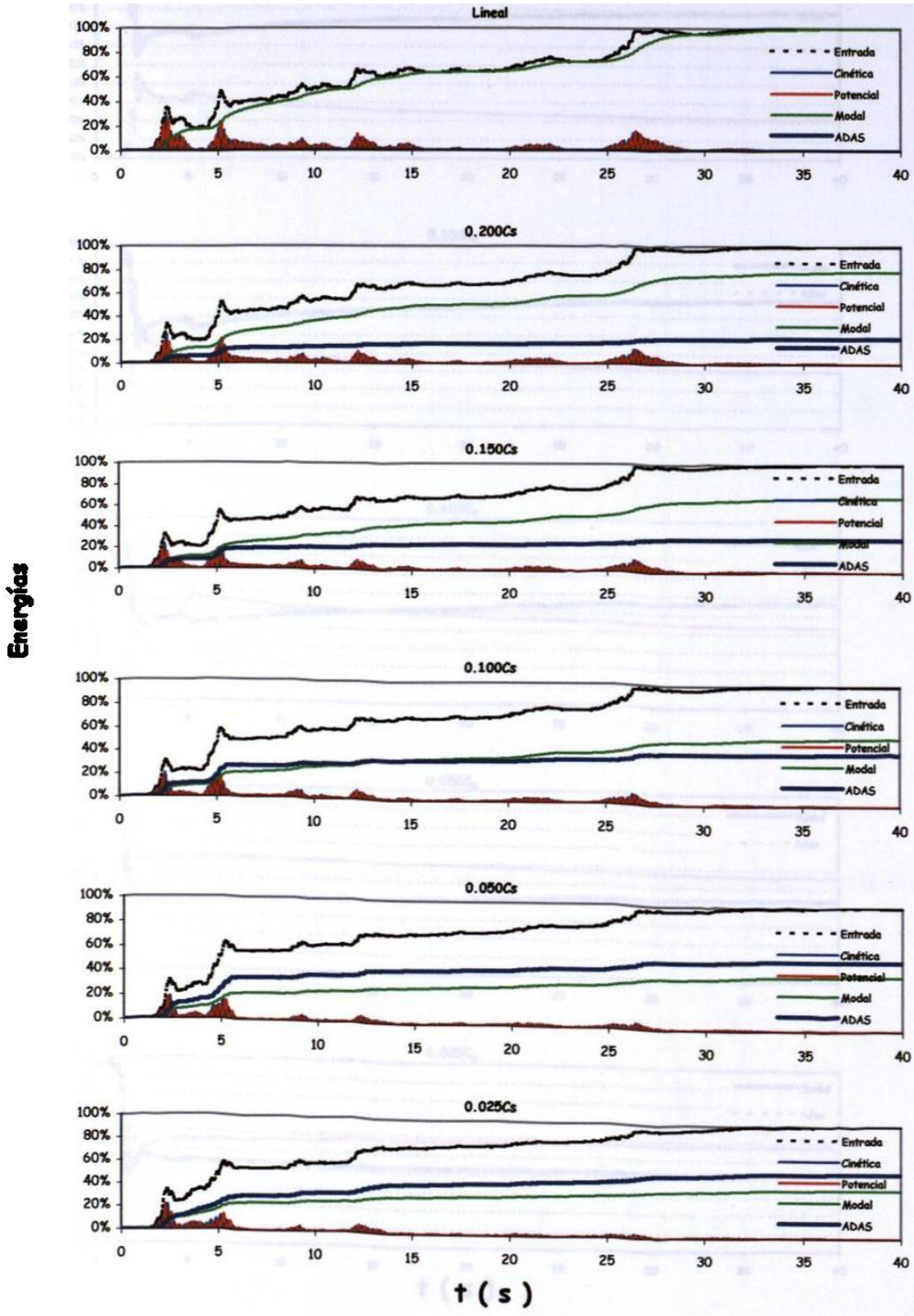


Fig. 6.40 Porcentajes de energías (El Centro); K_{ADAS} = 50 %.

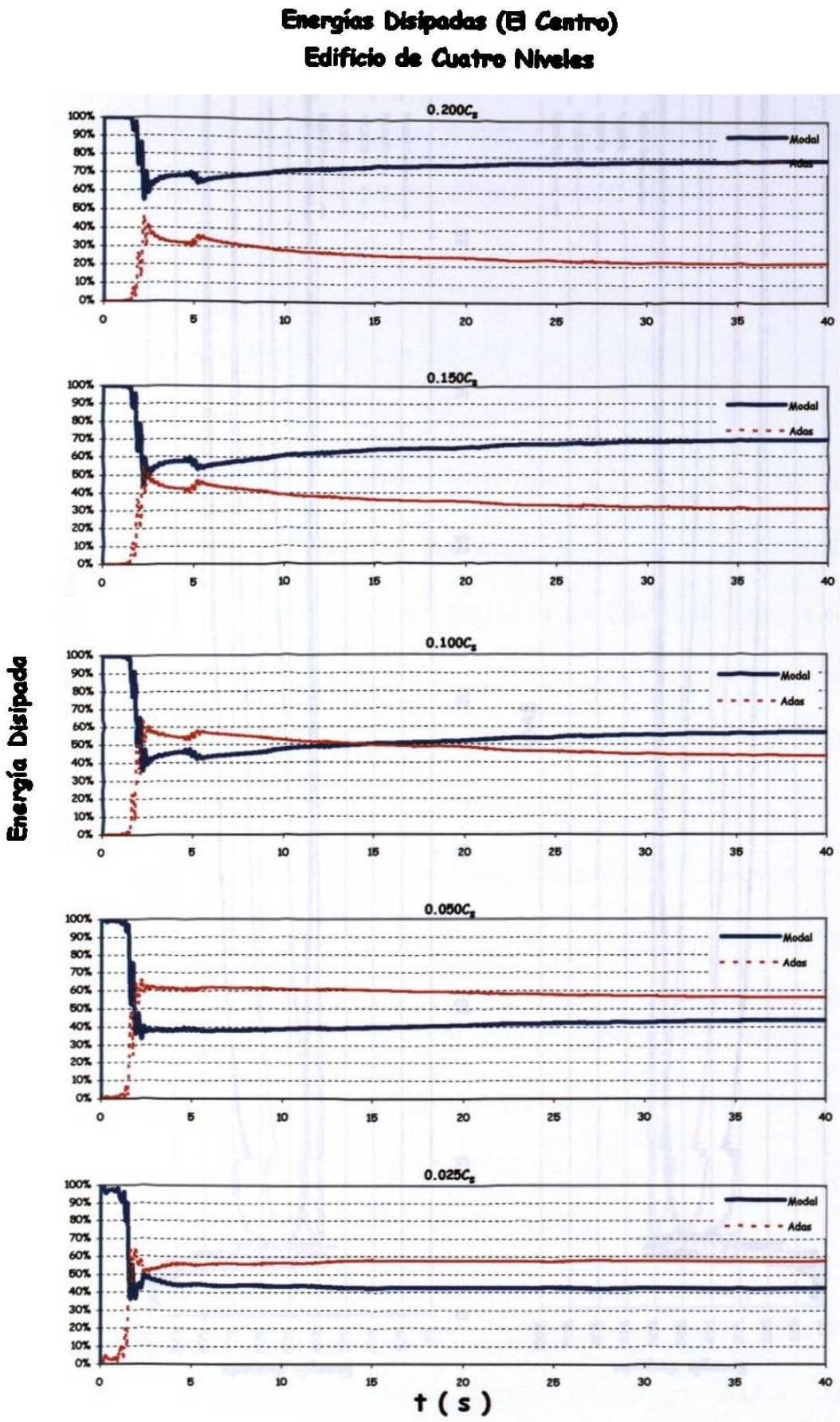


Fig. 6.41 Energías disipadas (El Centro); K_{ADAS} = 50 %.

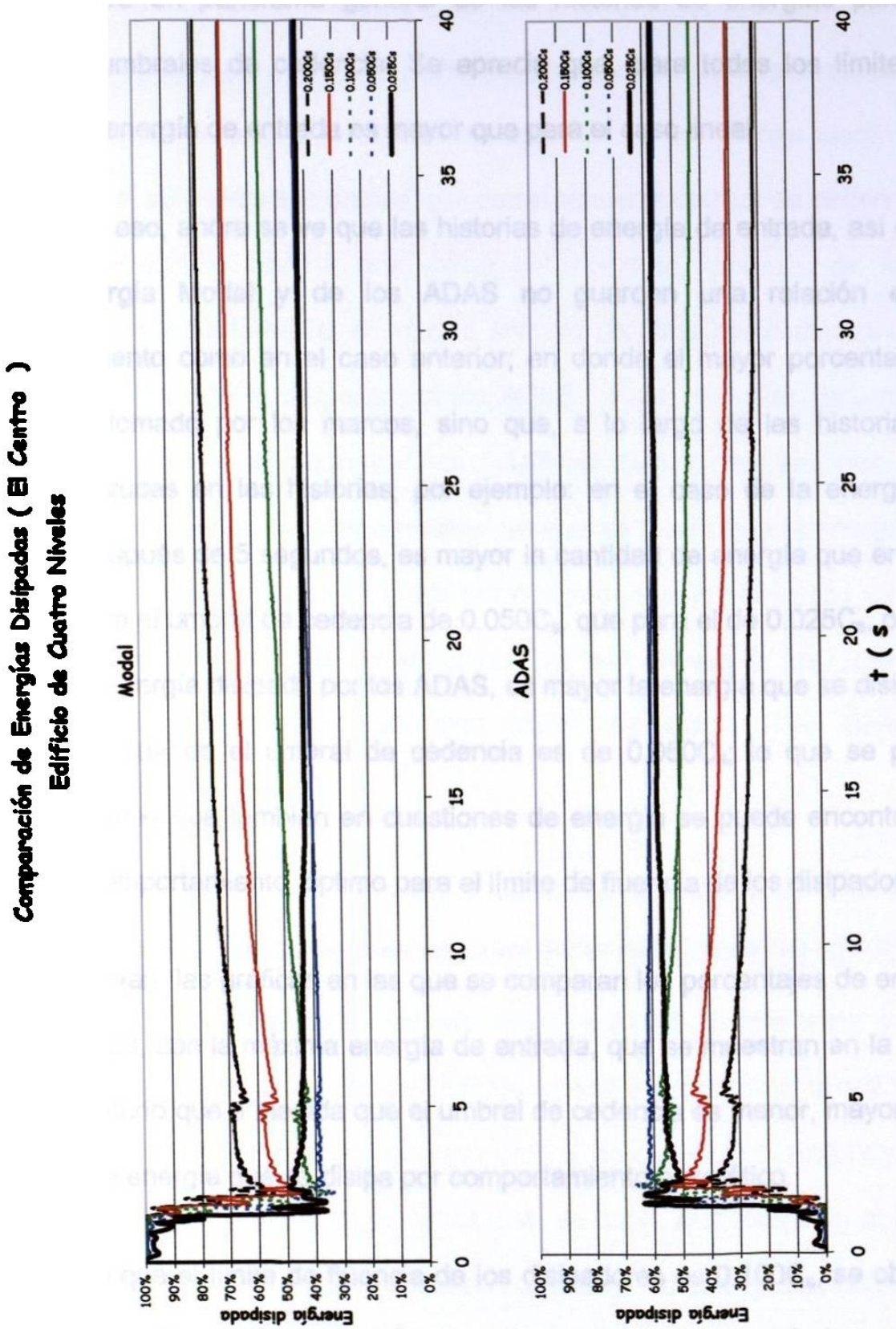


Fig. 6.42 Comparación de energías disipadas (El Centro); K_{ADAS} = 50 %.

Cuando la mitad de la rigidez lateral es proporcionada por los ADAS, la figura 6.39 muestra un panorama general de las historias de energías para los diferentes umbrales de cedencia. Se aprecia que, para todos los límites de fluencia, la energía de entrada es mayor que para el caso lineal.

Además de eso, ahora se ve que las historias de energía de entrada, así como la de energía Modal y de los ADAS no guardan una relación en el comportamiento como en el caso anterior; en donde el mayor porcentaje de rigidez es tomado por los marcos, sino que, a lo largo de las historias se observan cruces en las historias, por ejemplo: en el caso de la energía de entrada, después de 5 segundos, es mayor la cantidad de energía que entra al sistema para el umbral de cedencia de $0.050C_s$, que para el de $0.025C_s$, o en el caso de la energía disipada por los ADAS, es mayor la energía que se disipa de esa forma, cuando el umbral de cedencia es de $0.050C_s$; lo que se puede entender como que también en cuestiones de energía se puede encontrar un punto de comportamiento óptimo para el límite de fluencia de los disipadores.

Si se observan las gráficas en las que se comparan los porcentajes de energía normalizados, con la máxima energía de entrada, que se muestran en la figura 6.40, es notorio que a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es la cantidad de energía que se disipa por comportamiento histerético.

En el caso que el límite de fluencia de los disipadores es $0.100C_s$, se observa que, aproximadamente a los 13 segundos, existe un "cruce" de energías disipadas, es decir, antes de ese punto, es mayor la energía disipada por los

ADAS; pero después de ese punto, se disipa mayor cantidad de energía por comportamiento modal; sin embargo, para umbrales de cedencia menores, la energía disipada por los ADAS es mayor que la que se disipa por amortiguamiento modal. Ese "cruce" se observa, de forma más clara, en la figura 6.41, si se observa la gráfica que corresponde al umbral de cedencia de $0.100C_s$, es posible advertir que existe un momento, después de los 13 segundos, aproximadamente, en que la energía disipada por comportamiento modal es mayor que la disipada por los ADAS. Para umbrales de cedencia menores, la energía disipada por los ADAS es mayor una vez que estos empiezan a trabajar, lo cual es deseable, ya que se busca que la energía que ya ha entrado al sistema sea disipada por comportamiento histerético y no por el amortiguamiento propio de la estructura, ya que de esa forma, cuando la energía se disipa por amortiguamiento modal, los daños a los elementos estructurales son mayores.

Al comparar los porcentajes de energías disipadas para todos los umbrales de cedencia, según la gráfica que se presenta en la figura 6.42, se aprecia que para ambos casos de energía disipada, Modal y ADAS, la diferencia entre lo umbrales de cedencia de $0.025C_s$ y $0.050C_s$ es casi imperceptible, lo que puede entenderse como que después de cierto umbral de cedencia la mejora que se tiene en el comportamiento ya no es mucha, es decir, que existe un punto de fluencia de los disipadores que se puede considerar como el punto de fluencia óptimo para el comportamiento del edificio.

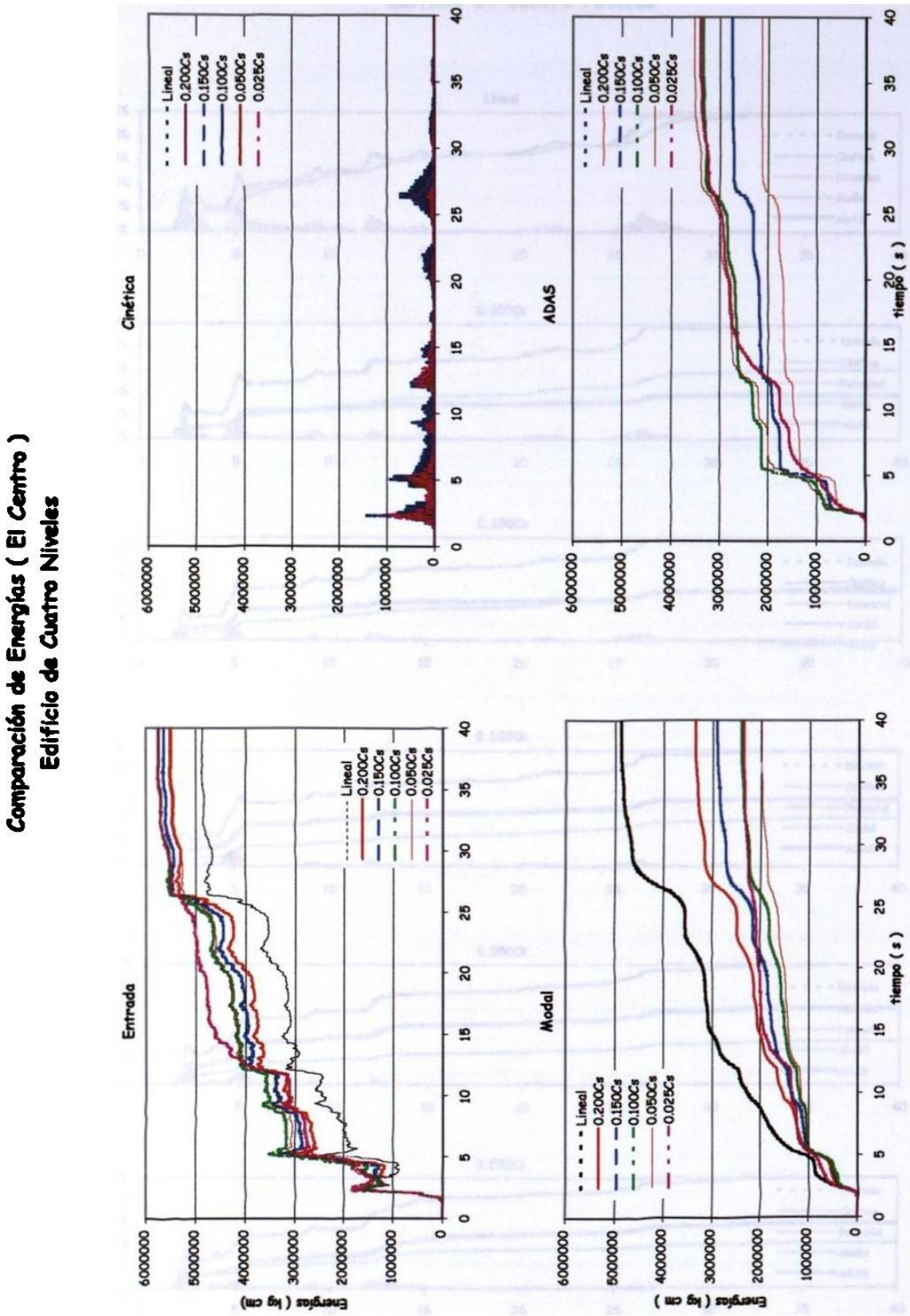


Fig. 6.43 Historias de energías (El Centro); K_{ADAS} = 75 %.

Energías (El *Centro*)
Edificio de *Cuatro* Niveles

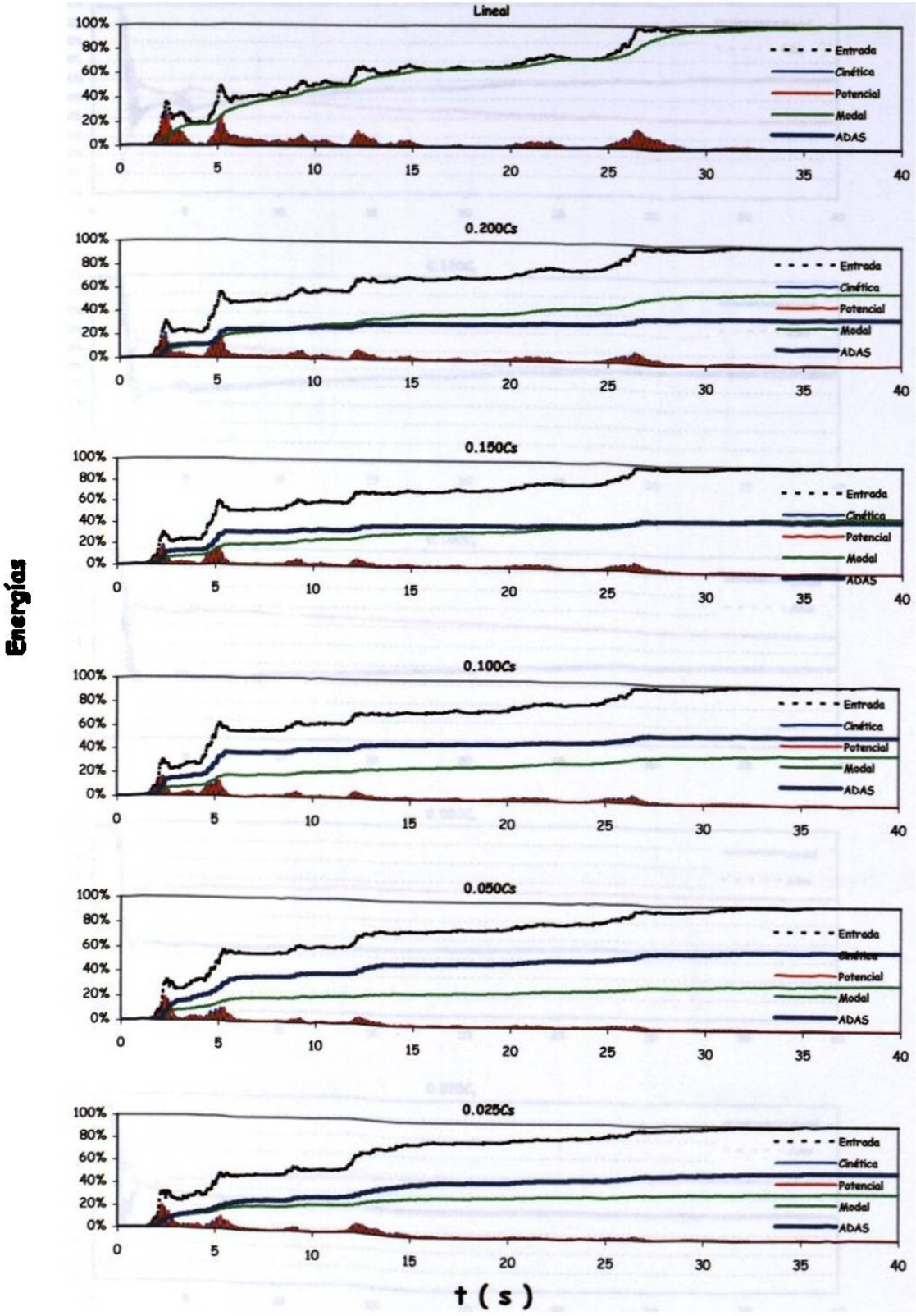


Fig. 6.44 Porcentajes de energías (El Centro); K_{ADAS} = 75 %.

Energías Disipadas (El Centro)
Edifico de Cuatro Niveles

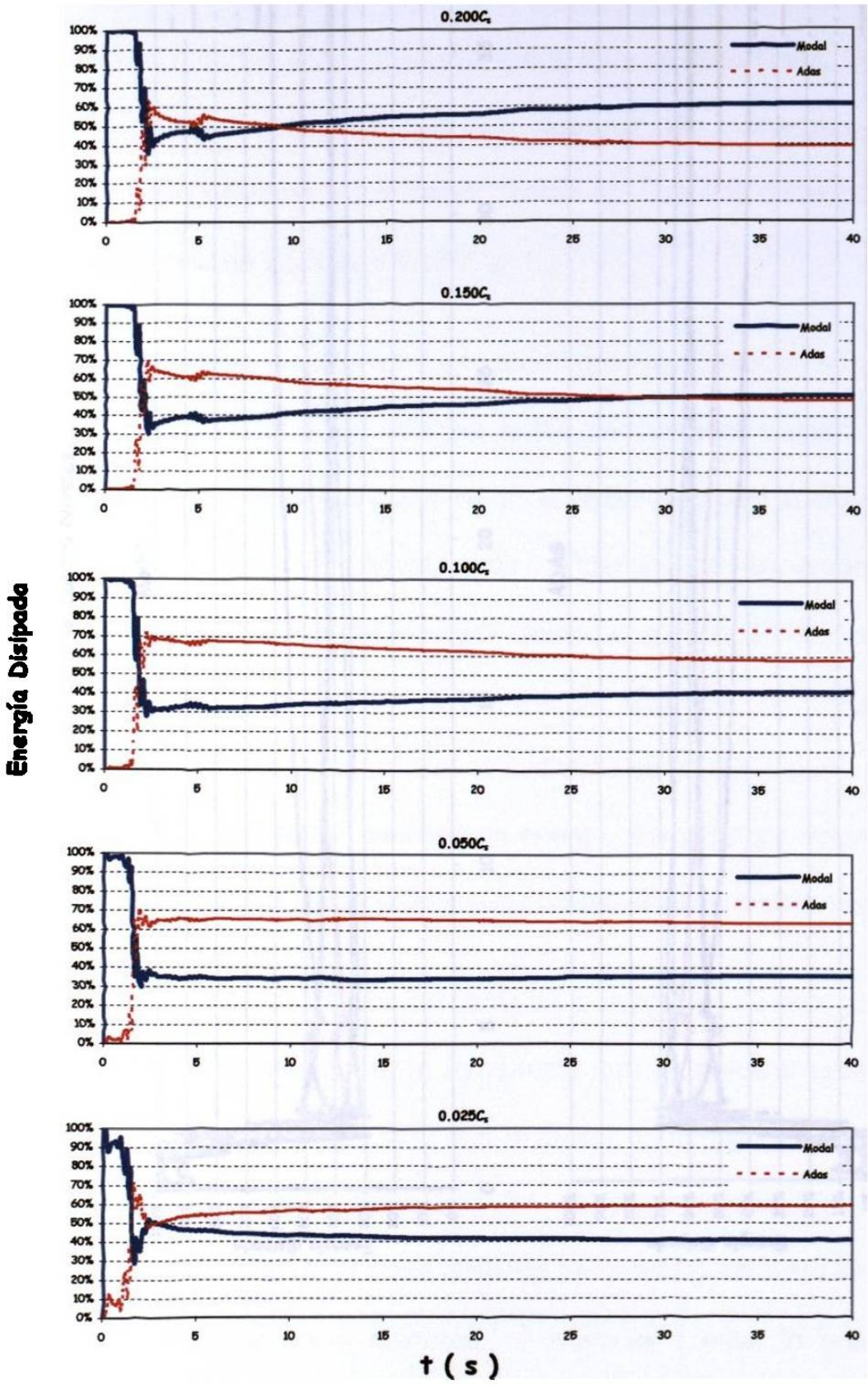


Fig. 6.45 Energías disipadas (El Centro); K_{ADAS} = 75 %.

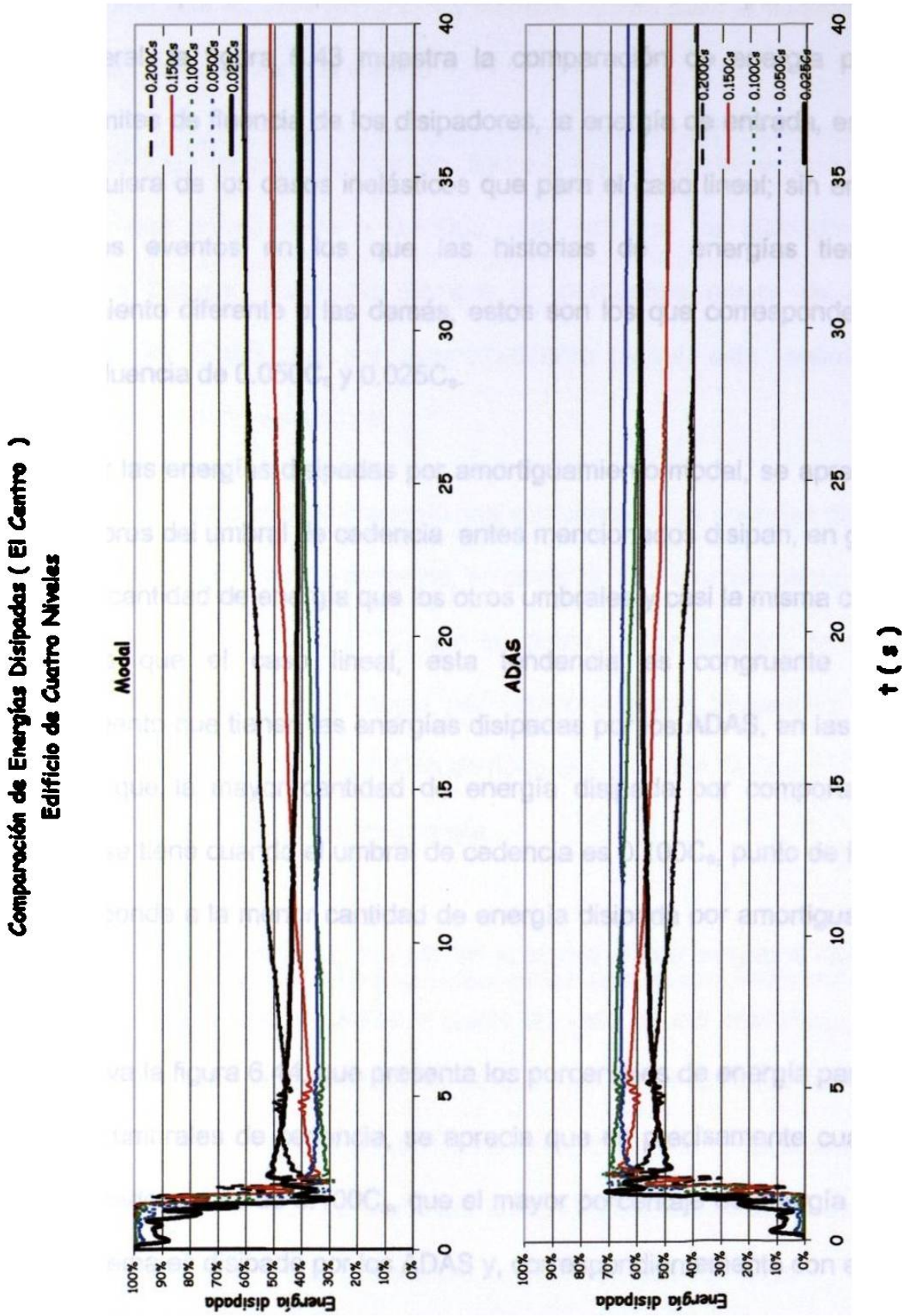


Fig. 6.46 Comparación de energías disipadas (El Centro); K_{ADAS} = 75 %.

En el caso en que los disipadores histeréticos toman el 75 por ciento de la rigidez lateral, la figura 6.43 muestra la comparación de energía para los distintos límites de fluencia de los disipadores, la energía de entrada, es mayor para cualquiera de los casos inelásticos que para el caso lineal; sin embargo, existen dos eventos en los que las historias de energías tienen un comportamiento diferente a las demás, estos son los que corresponden a los límites de fluencia de $0.050C_s$ y $0.025C_s$.

Al observar las energías disipadas por amortiguamiento modal, se aprecia que los dos valores del umbral de cedencia antes mencionados disipan, en general, una mayor cantidad de energía que los otros umbrales y casi la misma cantidad de energía que el caso lineal, esta tendencia es congruente con el comportamiento que tienen las energías disipadas por los ADAS, en las que se puede ver que la mayor cantidad de energía disipada por comportamiento histerético se tiene cuando el umbral de cedencia es $0.100C_s$, punto de fluencia que corresponde a la menor cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal.

Si se observa la figura 6.44, que presenta los porcentajes de energía para cada uno de los umbrales de cedencia, se aprecia que es precisamente cuando el umbral de cedencia es de $0.100C_s$, que el mayor porcentaje de energía que ya entró al sistema es disipado por los ADAS y, correspondientemente con esto, se tiene la menor cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal, no así para umbrales de cedencia menores, ni mayores a este, lo que se puede

entender como que es este el punto de fluencia óptimo para la distribución de rigideces laterales que tiene el edificio.

En los porcentajes de energía disipada (figura 6.45), se puede ver que el límite de fluencia que corresponde a $0.100C_s$, una vez que los disipadores han empezado a trabajar, mantiene siempre un porcentaje mayor de energía disipada por los ADAS que por comportamiento modal, este fenómeno se traduce en menor daño estructural.

En la figura 6.46, en la cual se presenta una comparación de energías disipadas para los distintos umbrales de cedencia, se observa que, efectivamente, es con el límite de fluencia igual a $0.100C_s$ que se disipa menor cantidad de energía por amortiguamiento modal y mayor por comportamiento histerético; así es posible afirmar que, en esta proporción de rigideces, el límite de fluencia óptimo es ese, al menos en cuestiones de energía.

El comportamiento del edificio, cuando se le sujeta al acelerograma del sismo de CU, también se analiza desde el punto de vista de las energías; ya que, como se explicó con anterioridad, se considera que el enfoque energético complementa el análisis hecho, al considerar únicamente los desplazamientos y los cortantes en la base, que es la manera en que se suele evaluar la respuesta de una estructura, en este caso, el edificio, sujeto a fuerzas sísmicas.

Las gráficas obtenidas del análisis del edificio con el acelerograma de CU, se muestran en las figuras de la 6.47 a la 6.58.

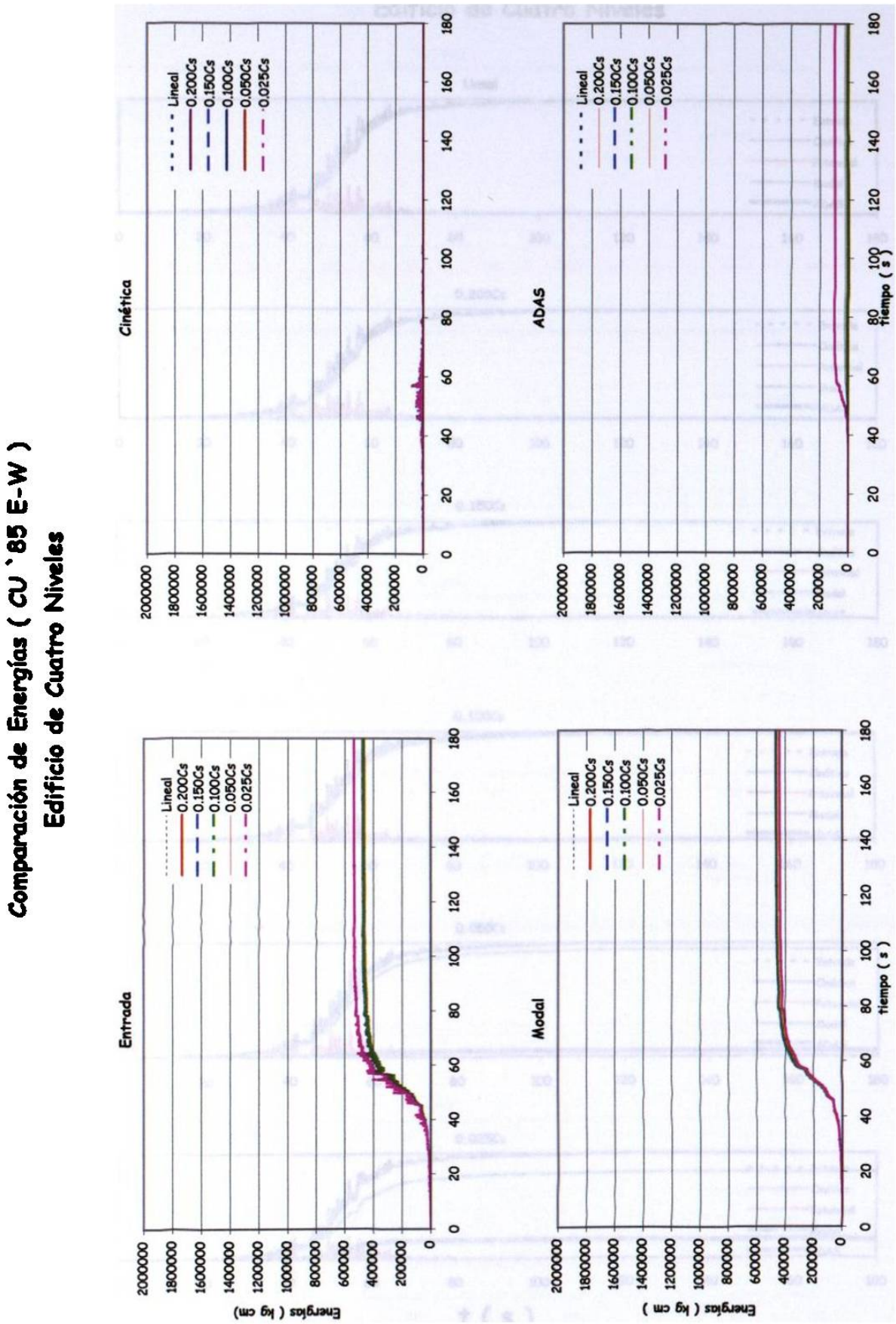


Fig. 6.47 Historias de energías (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 25 %.