Energías (CU `85 E-W)
Edificio de Cuatro Niveles

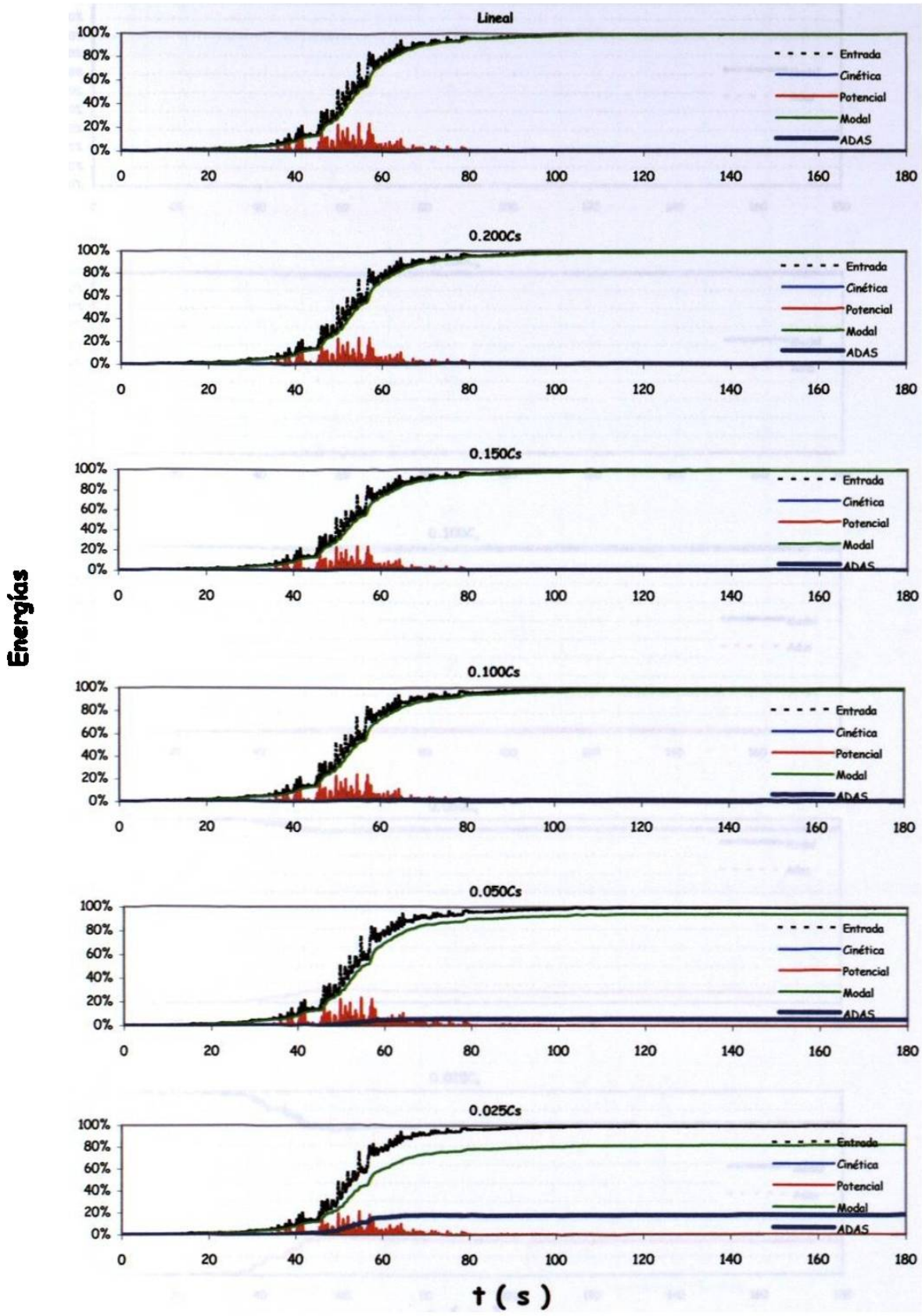

Fig. 6.48 Porcentajes de energía (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 25 %.

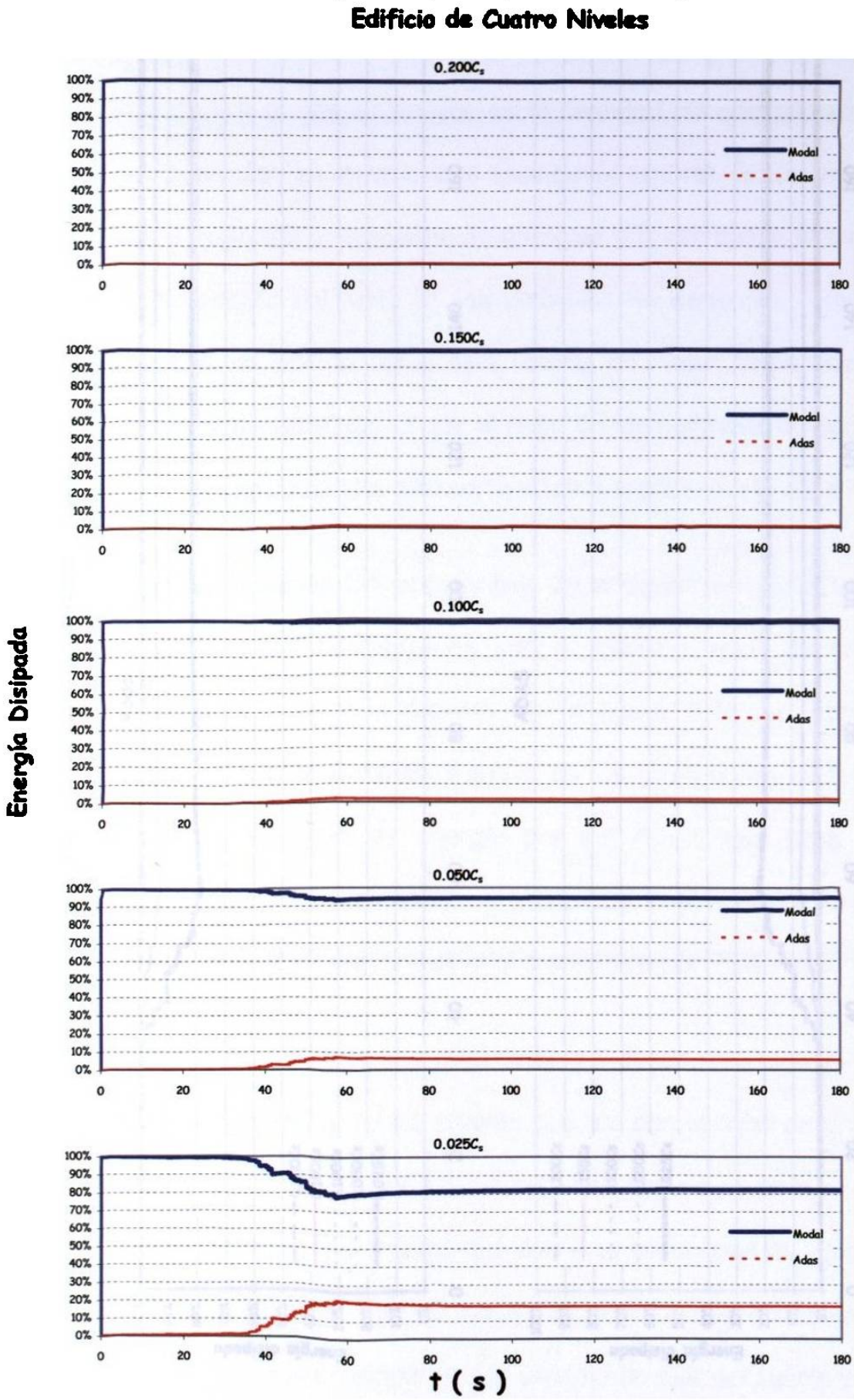

Fig. 6.49 Energías disipadas (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 25 %.

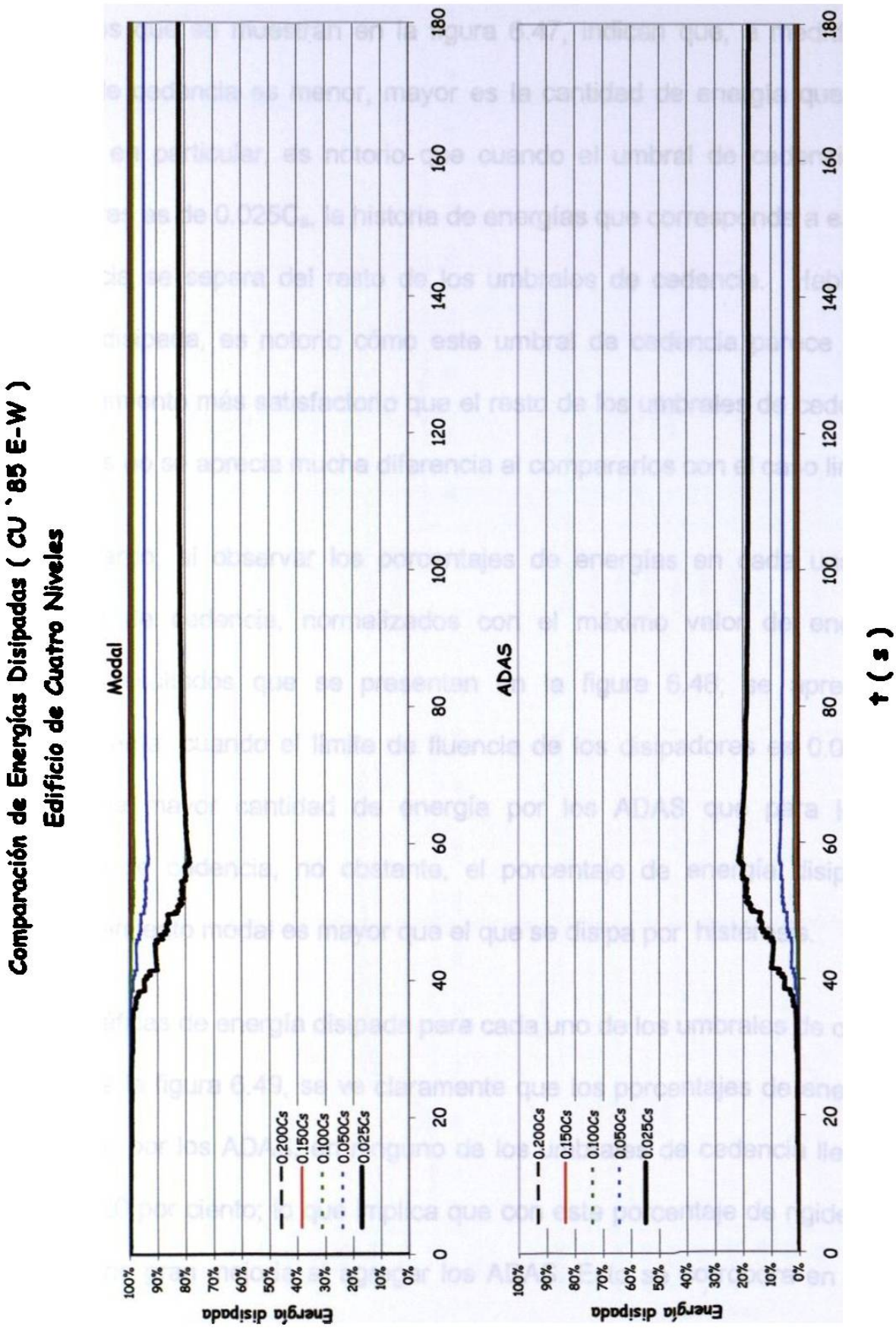

Fig. 6.50 Comparación de energías disipadas (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 25 %.

En el caso en que los marcos toman el 75 por ciento de la rigidez lateral, los resultados que se muestran en la figura 6.47, indican que, a medida que el umbral de cedencia es menor, mayor es la cantidad de energía que entra al sistema; en particular, es notorio que cuando el umbral de cedencia de los disipadores es de $0.025C_s$, la historia de energías que corresponde a este límite de fluencia se separa del resto de los umbrales de cedencia. Hablando de energía disipada, es notorio cómo este umbral de cedencia parece tener un comportamiento más satisfactorio que el resto de los umbrales de cedencia, en los cuales no se aprecia mucha diferencia al compararlos con el caso lineal.

Sin embargo, al observar los porcentajes de energías en cada uno de los umbrales de cedencia, normalizados con el máximo valor de energía de entrada, resultados que se presentan en la figura 6.48; se aprecia que, efectivamente, cuando el límite de fluencia de los disipadores es $0.025C_s$, se disipa una mayor cantidad de energía por los ADAS que para los otros umbrales de cedencia, no obstante, el porcentaje de energía disipado por amortiguamiento modal es mayor que el que se disipa por histéresis.

En las gráficas de energía disipada para cada uno de los umbrales de cedencia, gráfica de la figura 6.49, se ve claramente que los porcentajes de energía que se disipan por los ADAS, en ninguno de los umbrales de cedencia llega a ser más del 20 por ciento; lo que implica que con este porcentaje de rigidez lateral no se tiene gran mejoría al agregar los ADAS. Esto se corrobora en la figura 6.50, que muestra que los disipadores de energía no disipan suficiente energía con los ADAS, como para considerar conveniente agregarlos al edificio.

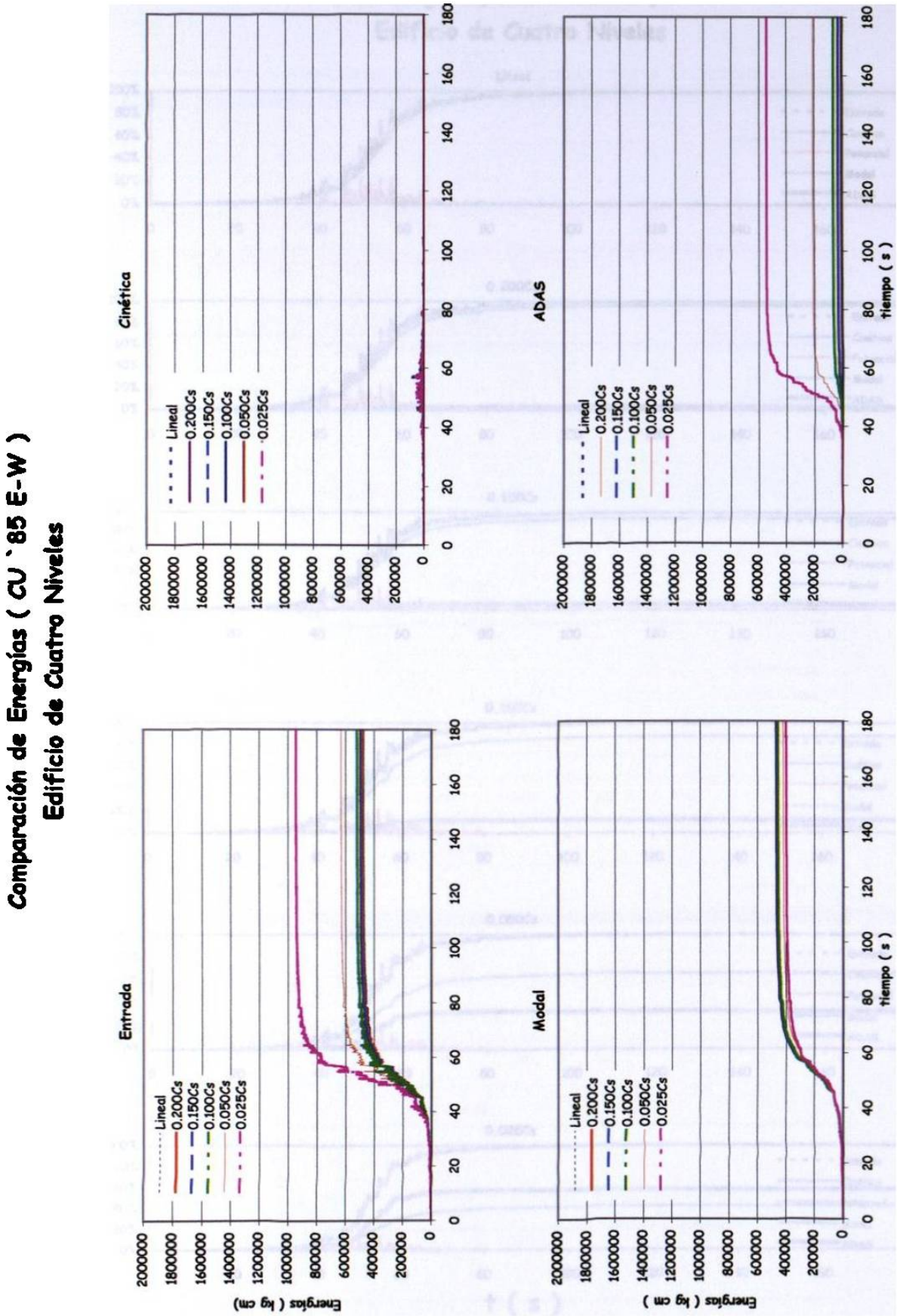

Fig. 6.51 Historias de energías (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 50 %.

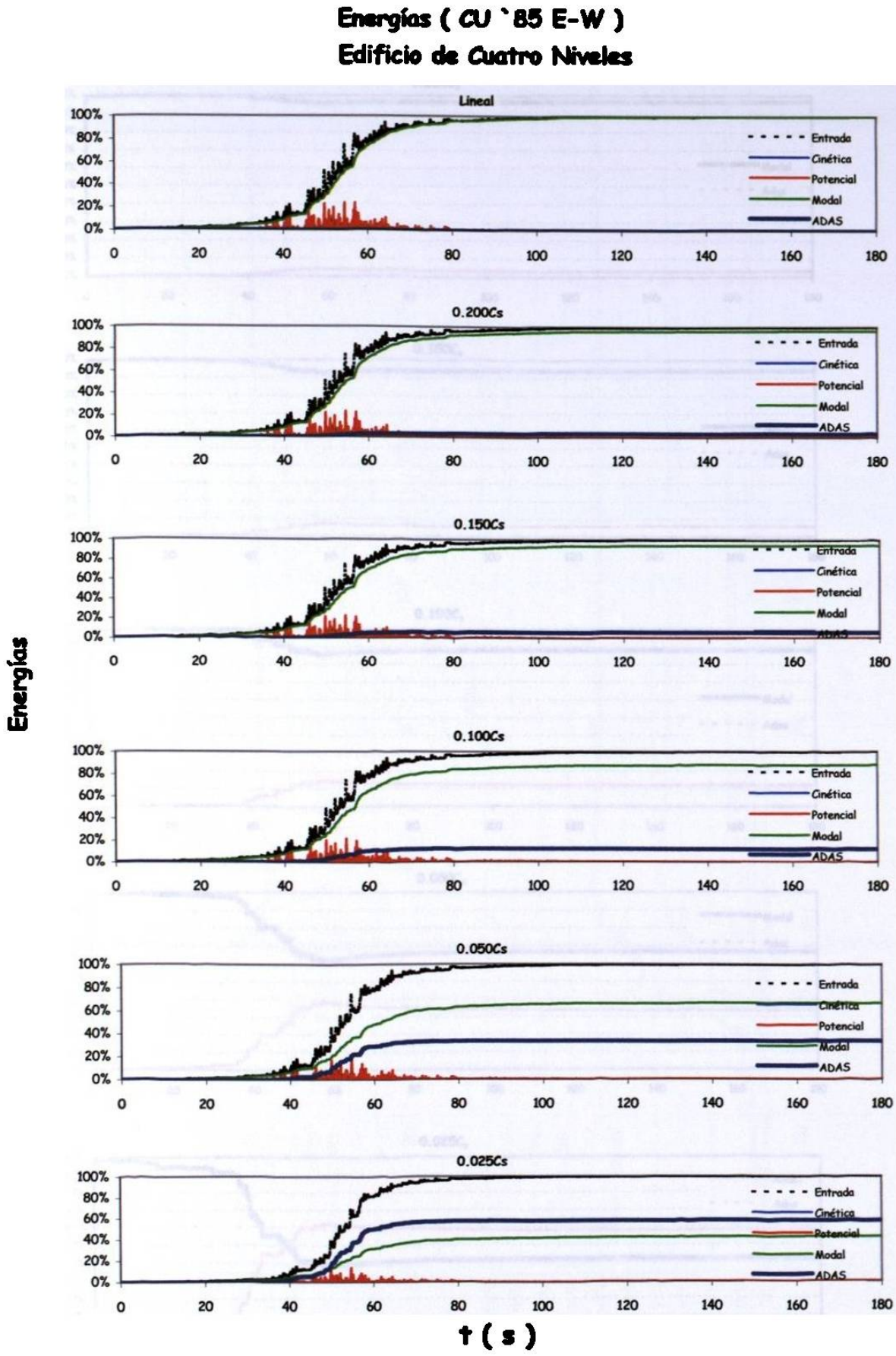

Fig. 6.52 Porcentajes de energías (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 50 %.

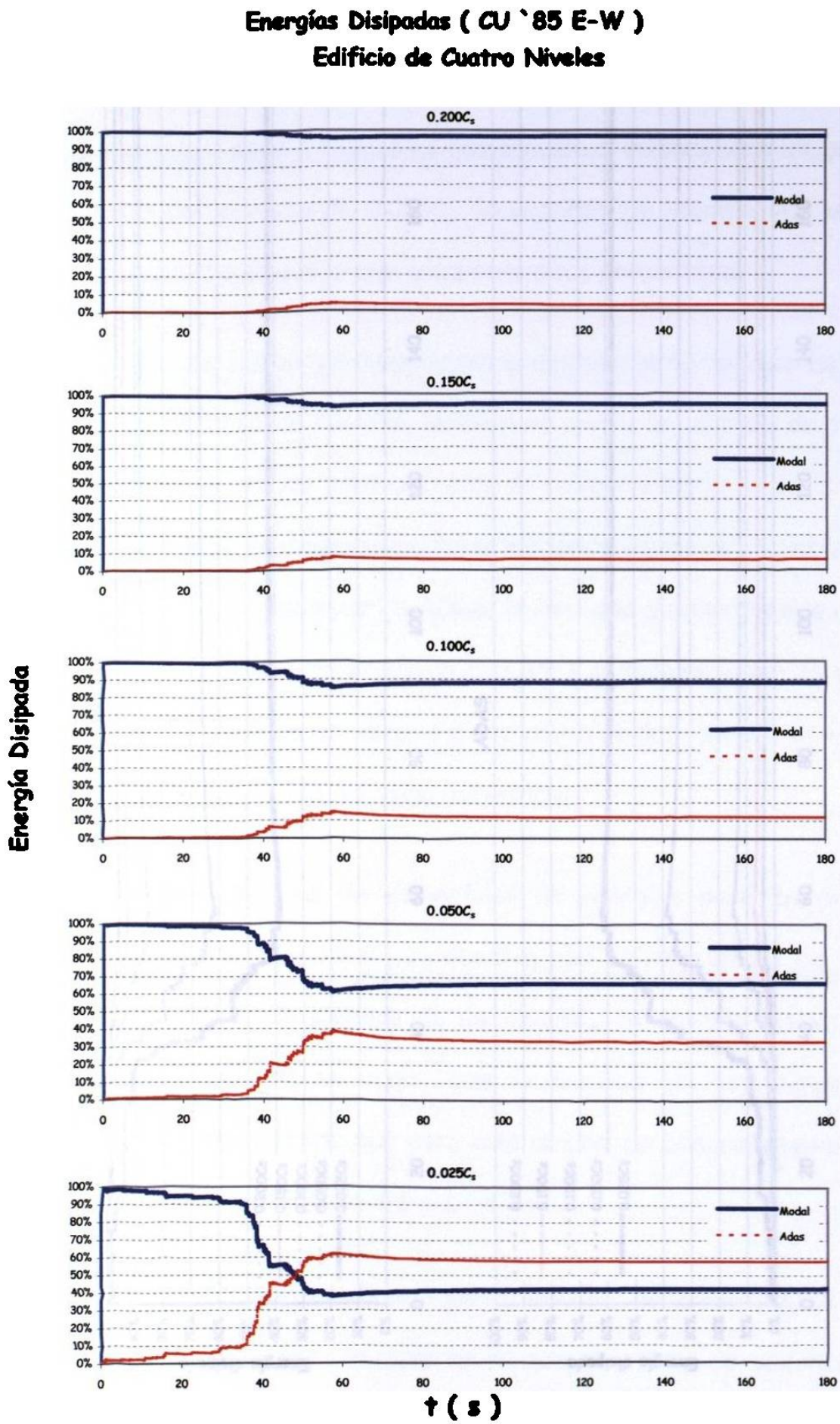

Fig. 6.53 Energías disipadas (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 50 %.

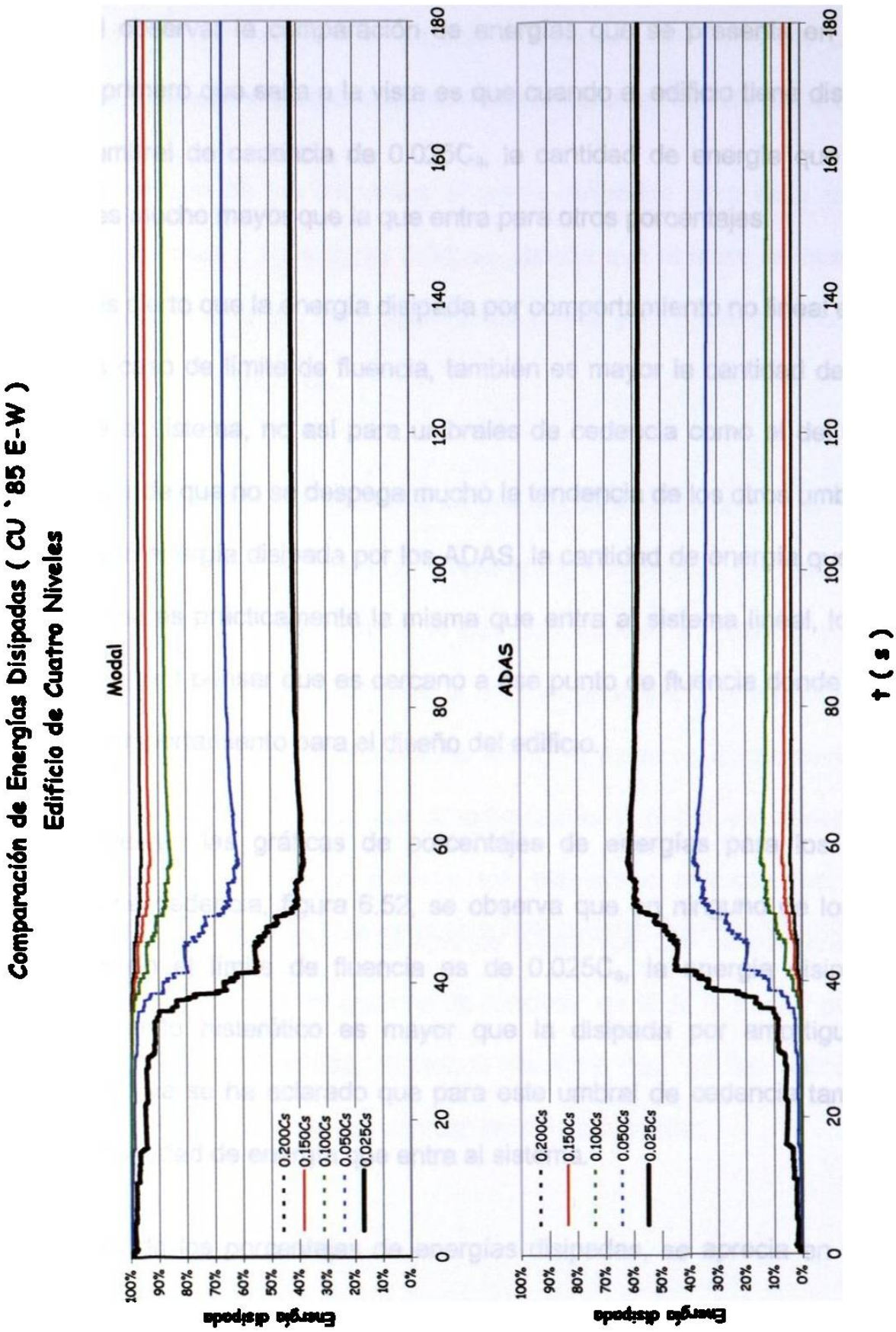

Fig. 6.54 Comparación de energías Disipadas (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 50 %.

En el caso en que la rigidez lateral tomada por los ADAS es el cincuenta por ciento, al observar la comparación de energías que se presenta en la figura 6.51, lo primero que salta a la vista es que cuando el edificio tiene disipadores con un umbral de cedencia de $0.025C_s$, la cantidad de energía que entra al sistema es mucho mayor que la que entra para otros porcentajes.

Si bien, es cierto que la energía disipada por comportamiento no lineal es mayor para este caso de límite de fluencia, también es mayor la cantidad de energía que entra al sistema, no así para umbrales de cedencia como el del $0.100C_s$, que a pesar de que no se despega mucho la tendencia de los otros umbrales de cedencia en energía disipada por los ADAS, la cantidad de energía que entra a este sistema es prácticamente la misma que entra al sistema lineal, lo que da evidencias para pensar que es cercano a ese punto de fluencia donde se tiene el mejor comportamiento para el diseño del edificio.

Si se observan las gráficas de porcentajes de energías para los distintos umbrales de cedencia, figura 6.52, se observa que en ninguno de los casos, salvo cuando el límite de fluencia es de $0.025C_s$, la energía disipada por comportamiento histerético es mayor que la disipada por amortiguamiento modal, pero ya se ha aclarado que para este umbral de cedencia también es mayor la cantidad de energía que entra al sistema.

En el caso de los porcentajes de energías disipadas, se aprecia en la figura 6.53 que únicamente es para el caso en el que el umbral de cedencia sea $0.025C_s$, que la energía disipada por comportamiento histerético es mayor que

la que se disipa por amortiguamiento modal de la estructura; una vez que los dispositivos disipadores han empezado a trabajar; sin embargo, para este umbral de cedencia es para el que entra mayor cantidad de energía al sistema.

Una comparación de las diferentes energías disipadas para cada umbral de cedencia se muestra en la figura 6.54, se aprecia que el límite de fluencia que menor energía disipa por amortiguamiento modal y más por comportamiento histerético, es el de $0.025C_s$.

Sin embargo, ya se había visto que es precisamente este umbral el que tiene mayor energía de entrada; así que, descartando ese umbral, es posible afirmar que el que mejor se comporta es el que corresponde a $0.050C_s$, ya que en comparación con los otros umbrales, la energía de entrada es prácticamente la misma, pero la energía disipada por los ADAS es mayor y, al mismo tiempo, la cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal es menor, lo que puede traducirse en menor daño a los elementos estructurales, que es precisamente lo que se busca al agregar elementos que disipen energía por comportamiento histerético, además de localizar en ellos el mayor porcentaje posible de energía disipada, cuidando siempre que no se sobrepase la ductilidad que estos dispositivos son capaces de desarrollar.

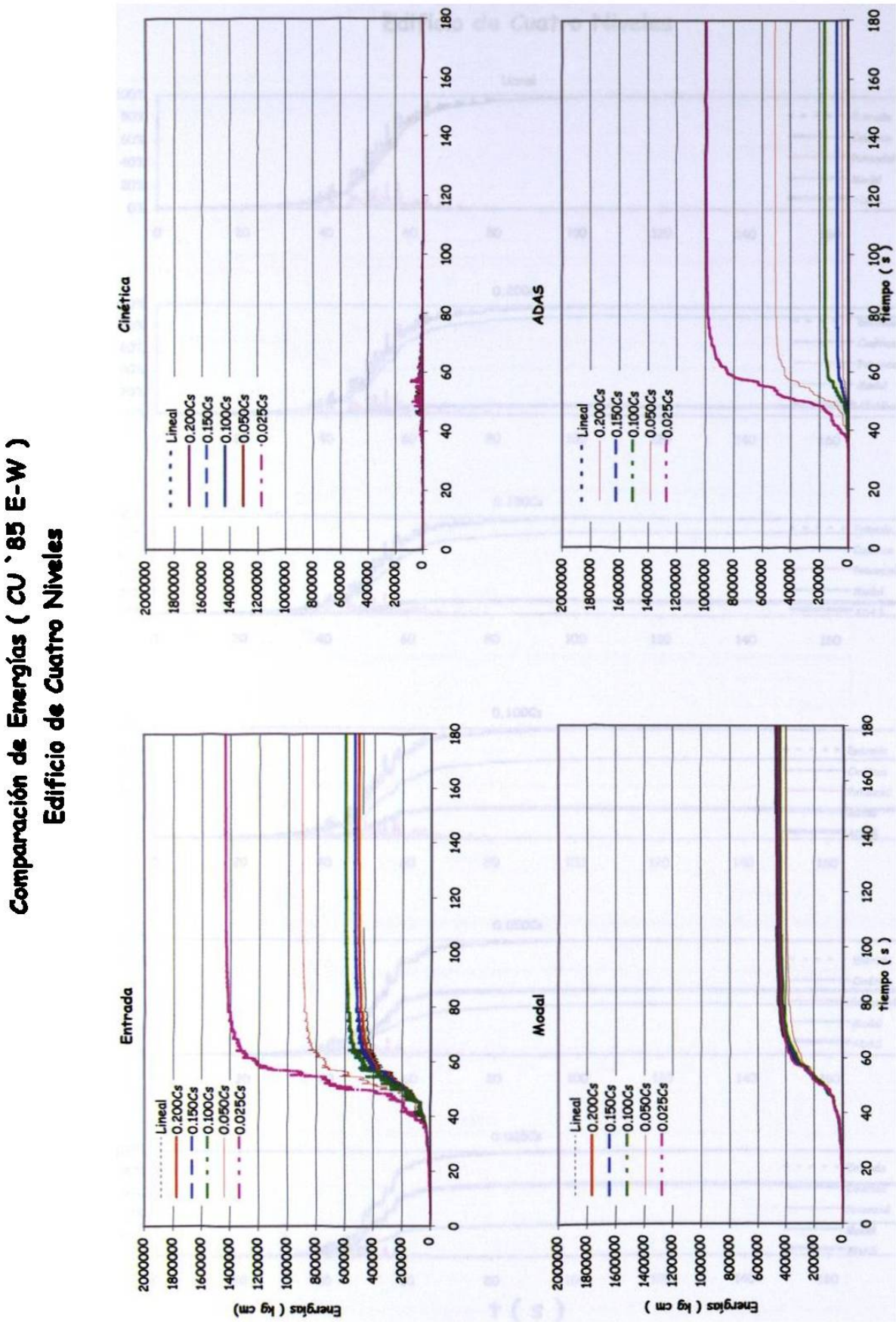

Fig. 6.55 Historias de energías (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 75 %.

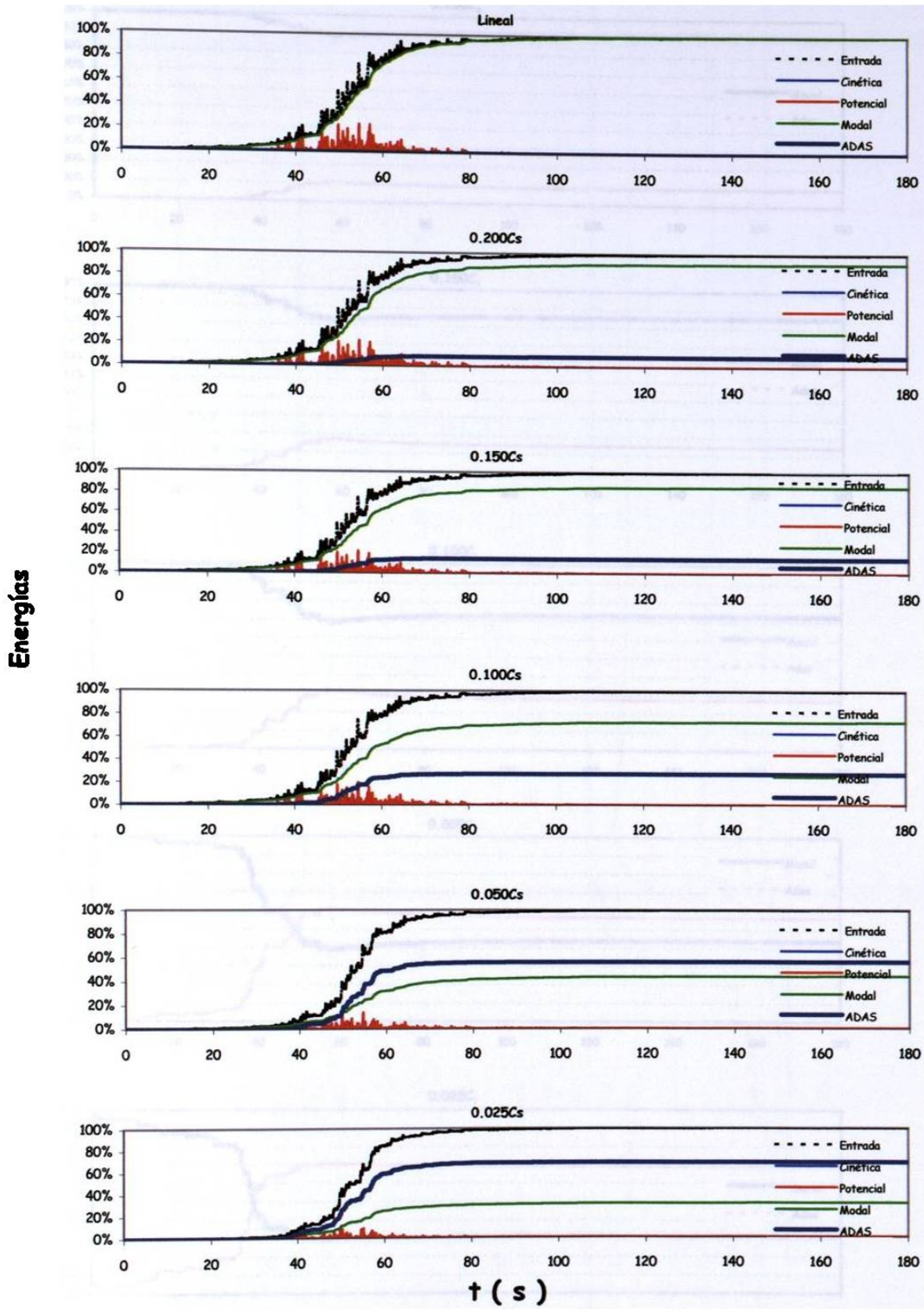

Fig. 6.56 Porcentajes de energías (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 75 %.

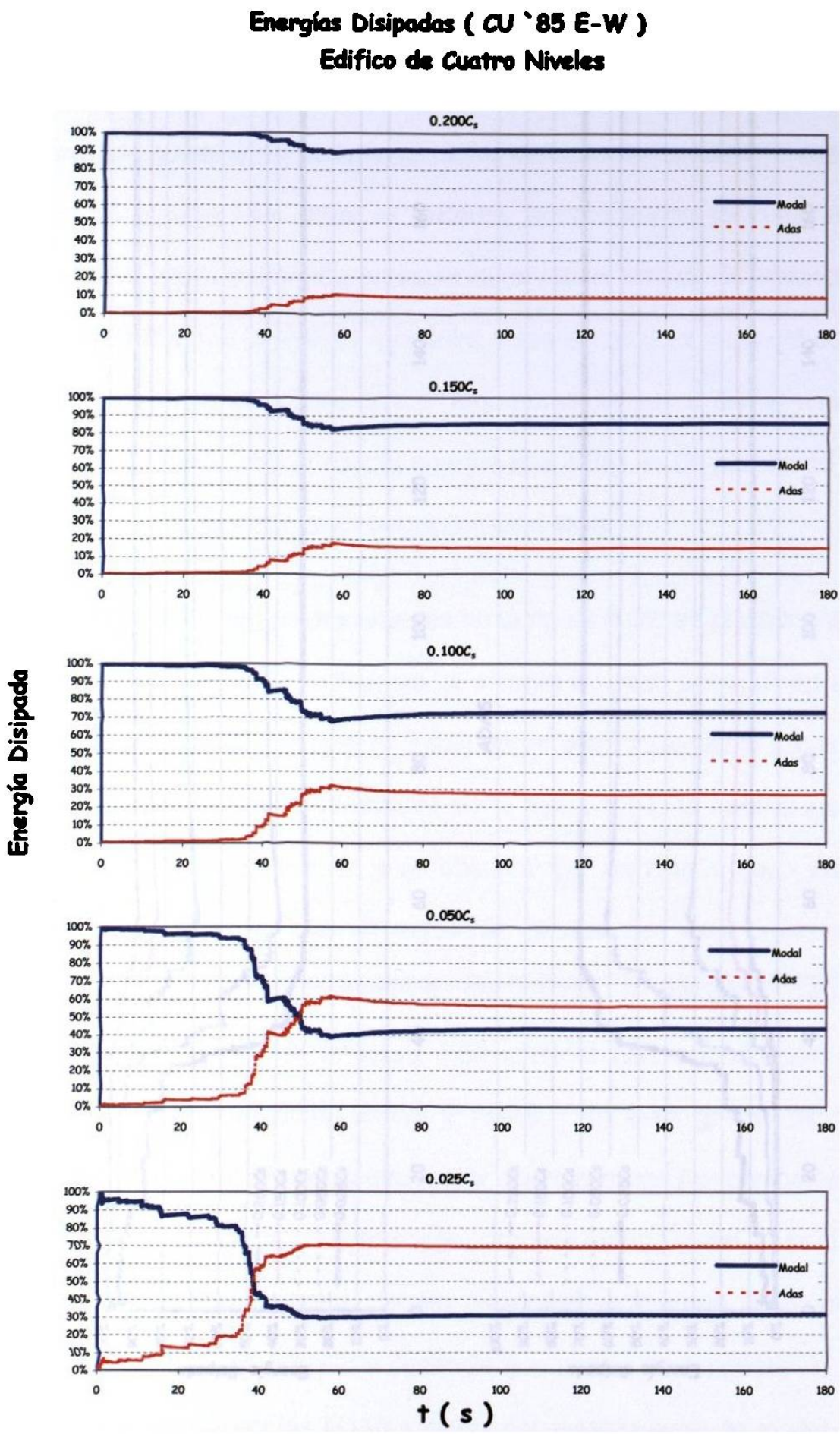

Fig. 6.57 Energías disipadas (CU `85 (E-W)); K_{ADAS} = 75 %.

Cuando los ADAS toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, la comparación de energías, presentada en la figura 6.55, muestra que existe una tendencia de que, a medida que el límite de fluencia de los disipadores es menor, mayor es la cantidad de energía que entra al sistema, sobresaliendo los umbrales de cedencia de $0.025C_s$ y $0.050C_s$; en especial, el menor umbral de cedencia, con el cual se obtiene que la energía que entra a ese sistema es más del doble de la energía que entra al sistema lineal. Algo parecido ocurre con el umbral de cedencia de $0.050C_s$, con el cual la energía que entra es 60 por ciento mayor que la que entra al sistema, con comportamiento lineal.

En las gráficas de energías presentadas en la figura 6.56, es posible notar que para ningún caso de límite de fluencia, la energía disipada por comportamiento histerético es mayor que la que se disipa por el amortiguamiento propio de la estructura. Esto se puede corroborar en la figura 6.57, la cual muestra los porcentajes de energía disipada y se observa que en ningún caso existe un cruce entre las energías que dé evidencia de que con esta proporción de rigideces se mejora el comportamiento del edificio, al agregarle disipadores histeréticos. La gráfica de la figura 6.58 muestra una comparación de las diferentes energías disipadas, Modal y ADAS. En este gráfico es posible apreciar que el límite de fluencia que mayor energía disipa por comportamiento histerético es el de $0.025C_s$; sin embargo, con ese umbral y con el de $0.050C_s$ son a los que más energía entra, por ello es posible afirmar que, en cuestión de energías, es $0.100C_s$ el umbral de cedencia que tiene una conducta en la cual se disipe más energía por los ADAS y menor por amortiguamiento modal.

6.7 Comportamiento histerético de los ADAS

Debido a que se busca que la mayor cantidad de energía disipada sea por comportamiento no-lineal y no por el amortiguamiento propio de la estructura, es necesario complementar la información de energías disipadas con el comportamiento histerético de los disipadores, ya que la conducta de los ADAS va de la mano con la energía que se disipa por este medio, es decir, a mayor energía disipada por histéresis, más amplios serán los ciclos histeréticos.

Para el análisis del comportamiento de los disipadores, que comparan los ciclos histeréticos de los disipadores de energía de cada nivel obtenidos para los diferentes umbrales de cedencia, en cada una de las curvas se indica la ductilidad del ADAS y vale la pena recordar que, según las pruebas de laboratorio hechas en la mesa vibradora, (Whittaker, *et al.*, 1989), se encontraron que los ADAS pueden desarrollar ductilidades hasta de 14, aunque recomiendan que, para fines de diseño, se usen ductilidades de 10, ya que para este grado de deformación, las curvas de histéresis son estables y no muestran degradación en su resistencia.

Para el sismo de El Centro, las curvas histeréticas obtenidas para cada una de las proporciones de rigidez analizadas se presentan en las figuras: de la 6.59 a la 6.64 y para el sismo de CU, en las figuras de la 6.65 a la 6.70.

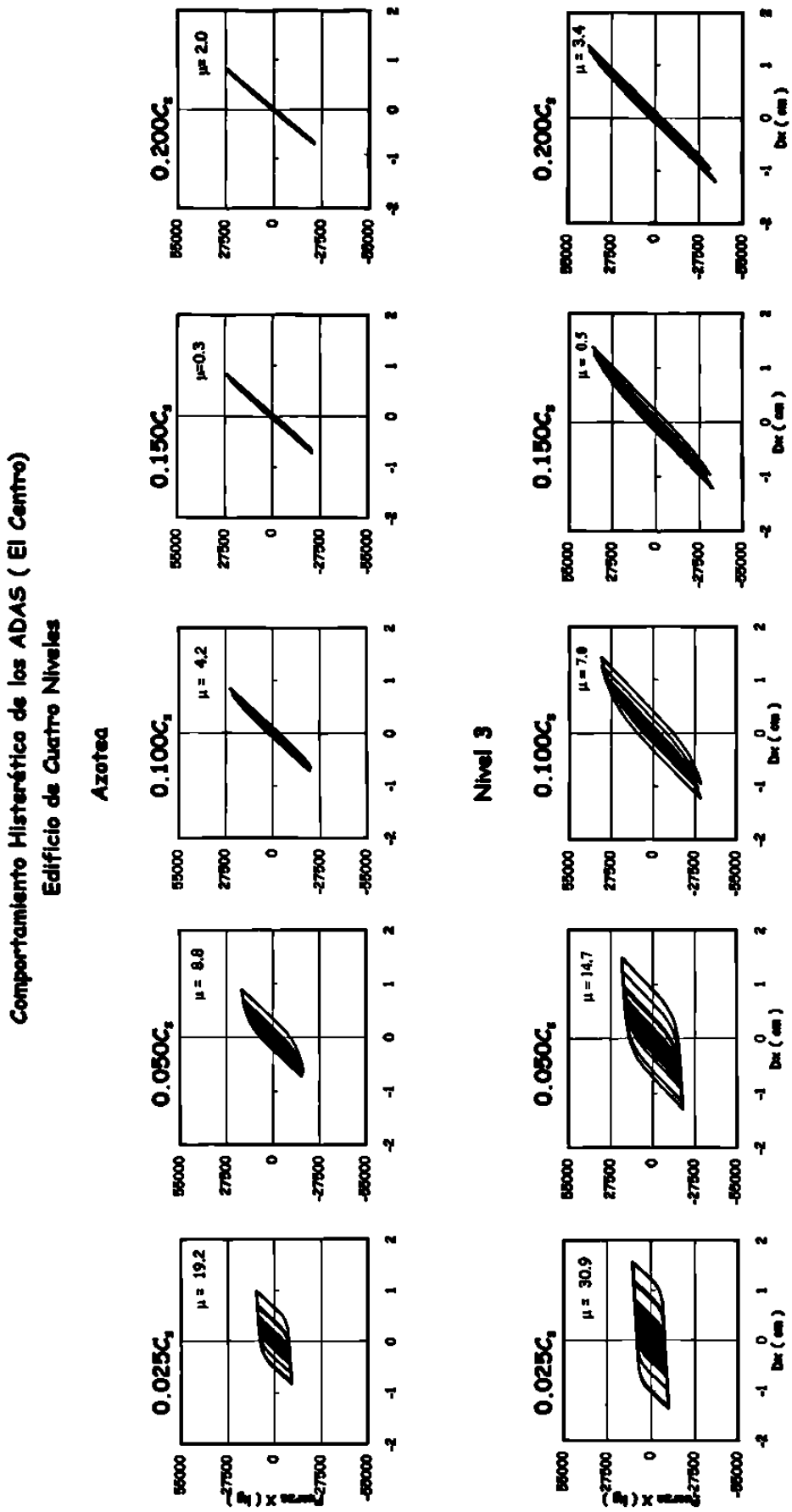

Fig. 6.59 Ciclos histeréticos en niveles superiores (El Centro); K_{ADAS} = 25 %.

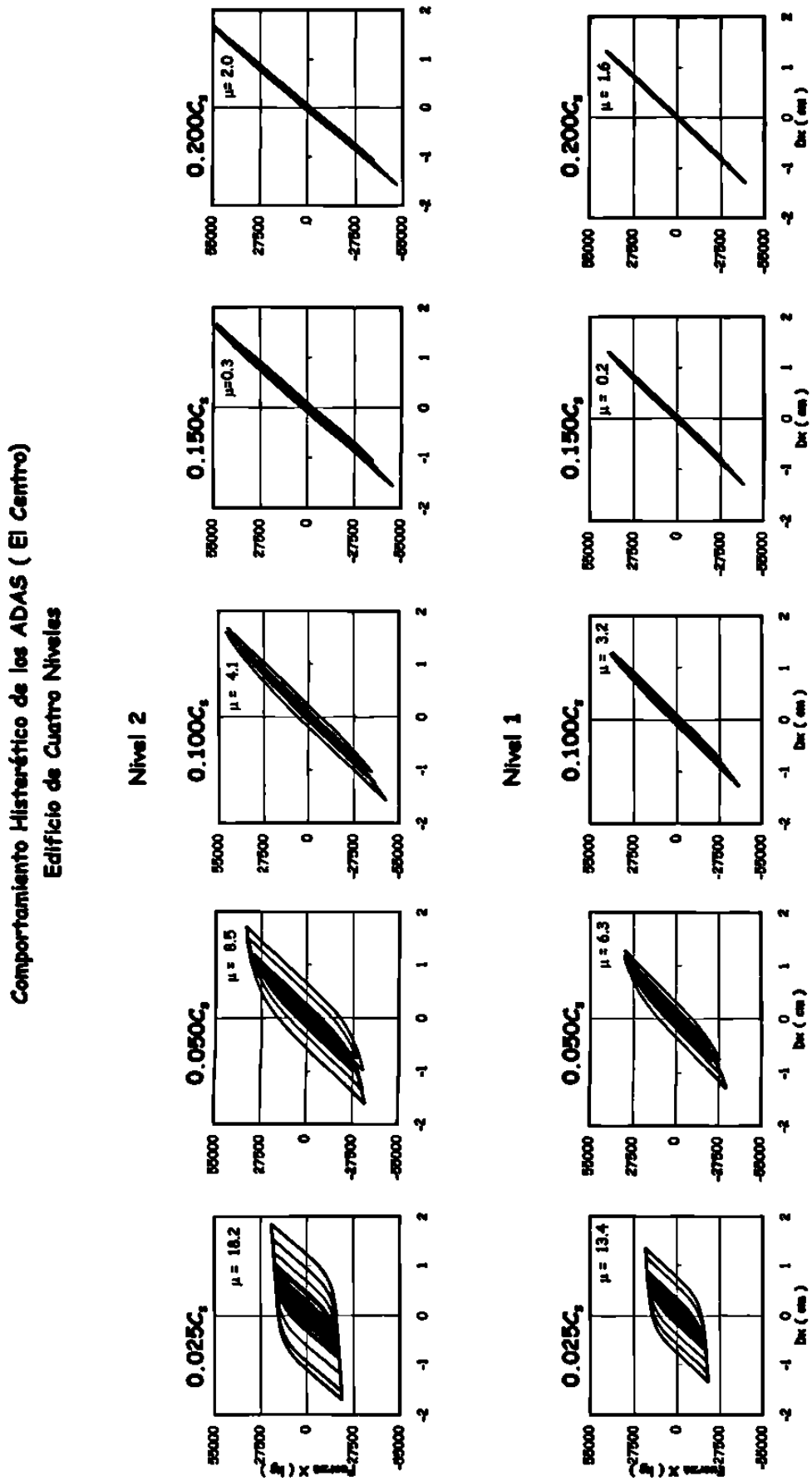

Fig. 6.60 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro); K_{ADAS} = 25 %.

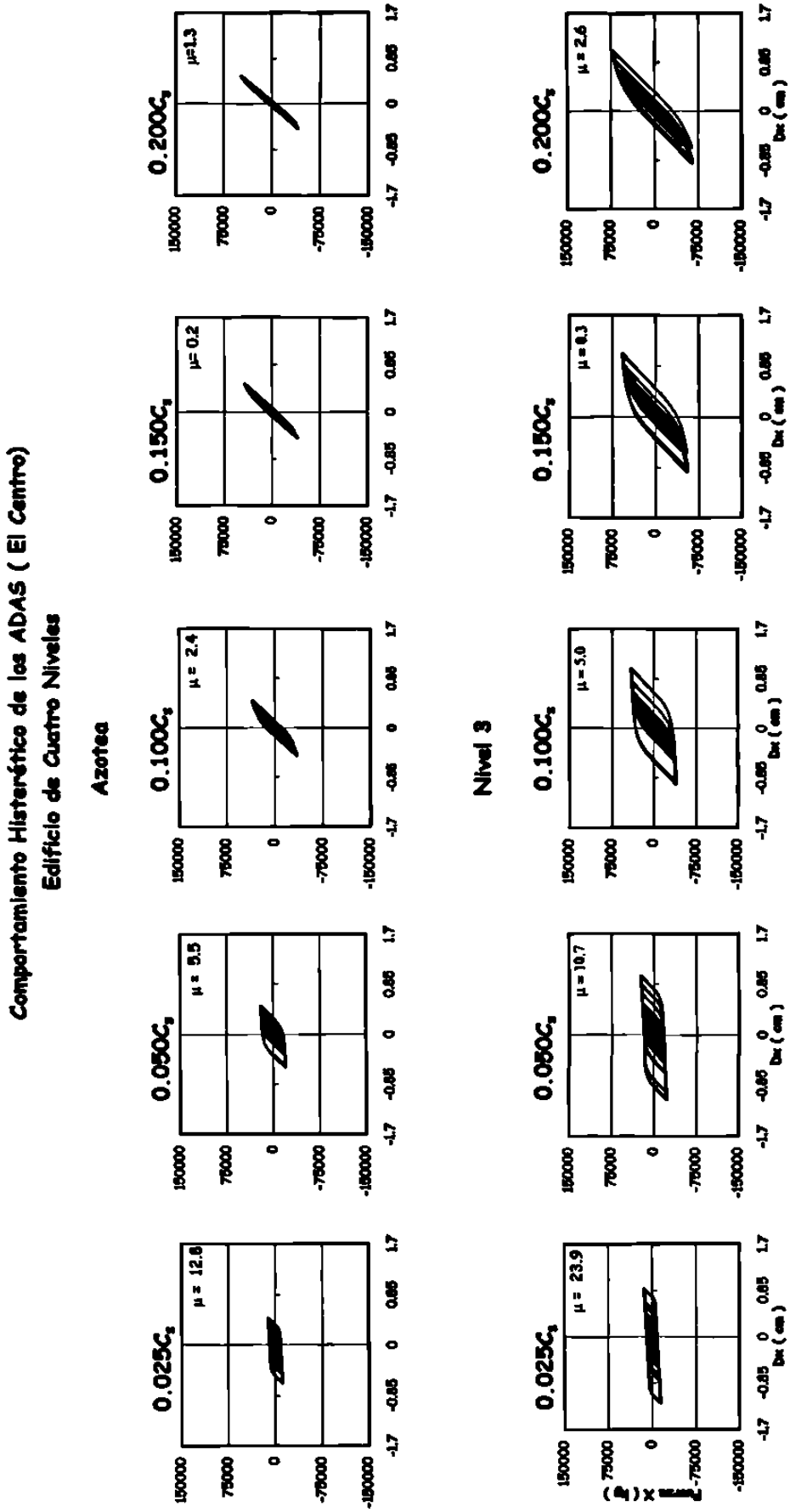

Fig. 6.61 Ciclos histeréticos en niveles superiores (El Centro); K_{ADAS} = 50 %.

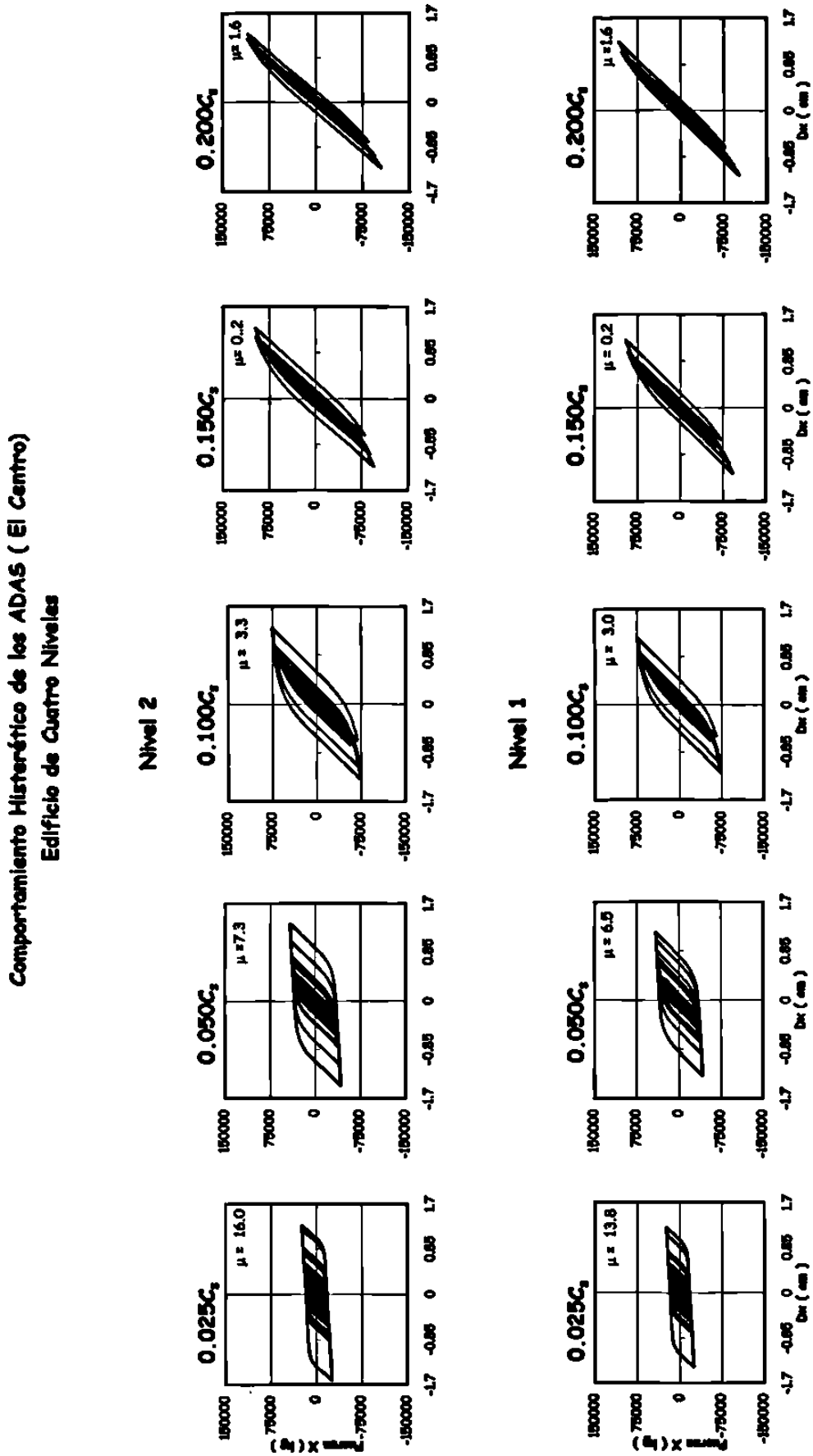

Fig. 6.62 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro); K_{ADAS} = 50 %.

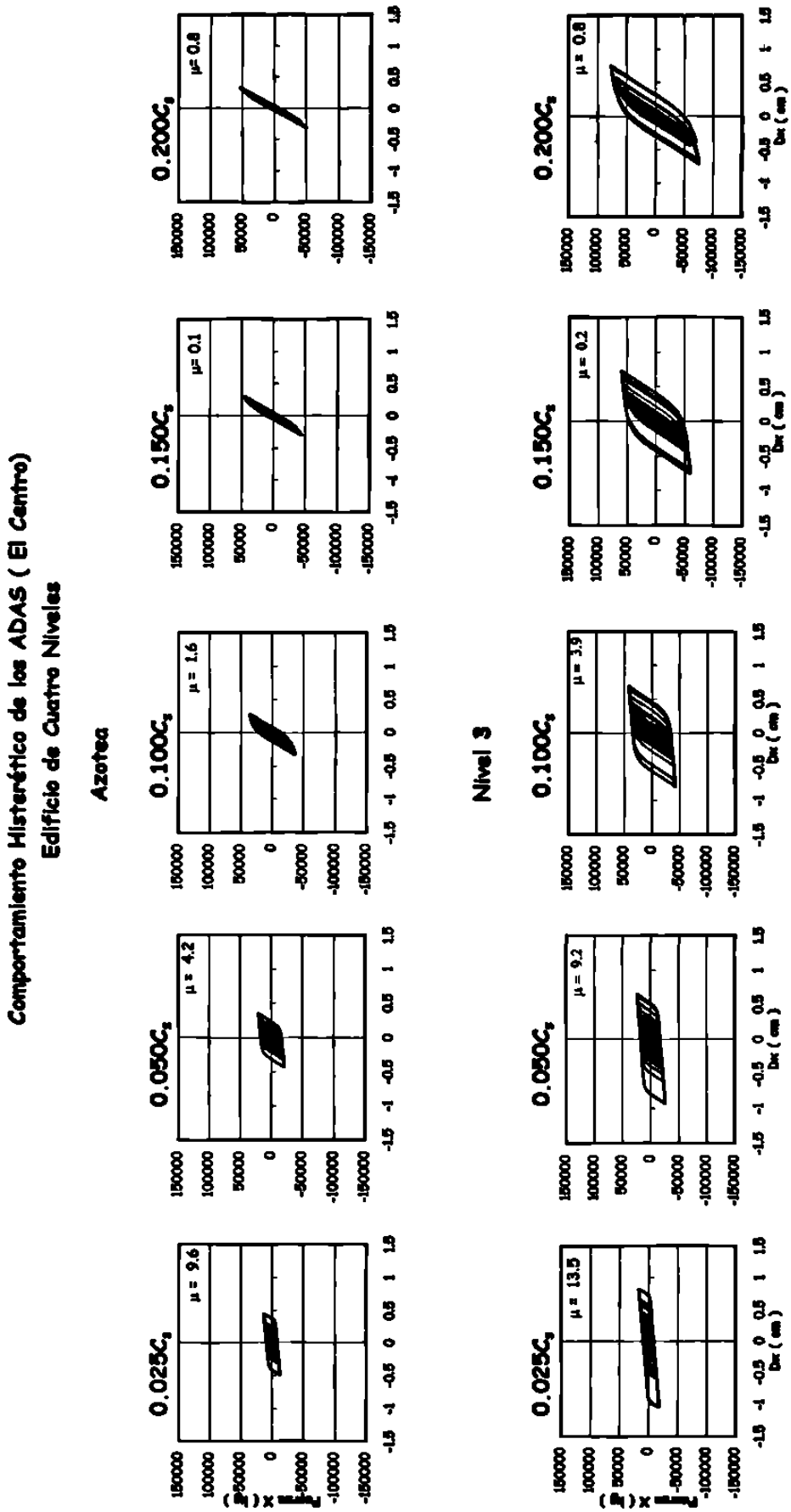

Fig. 6.63 Ciclos histeréticos en niveles superiores (El Centro); K_{ADAS} = 75 %.

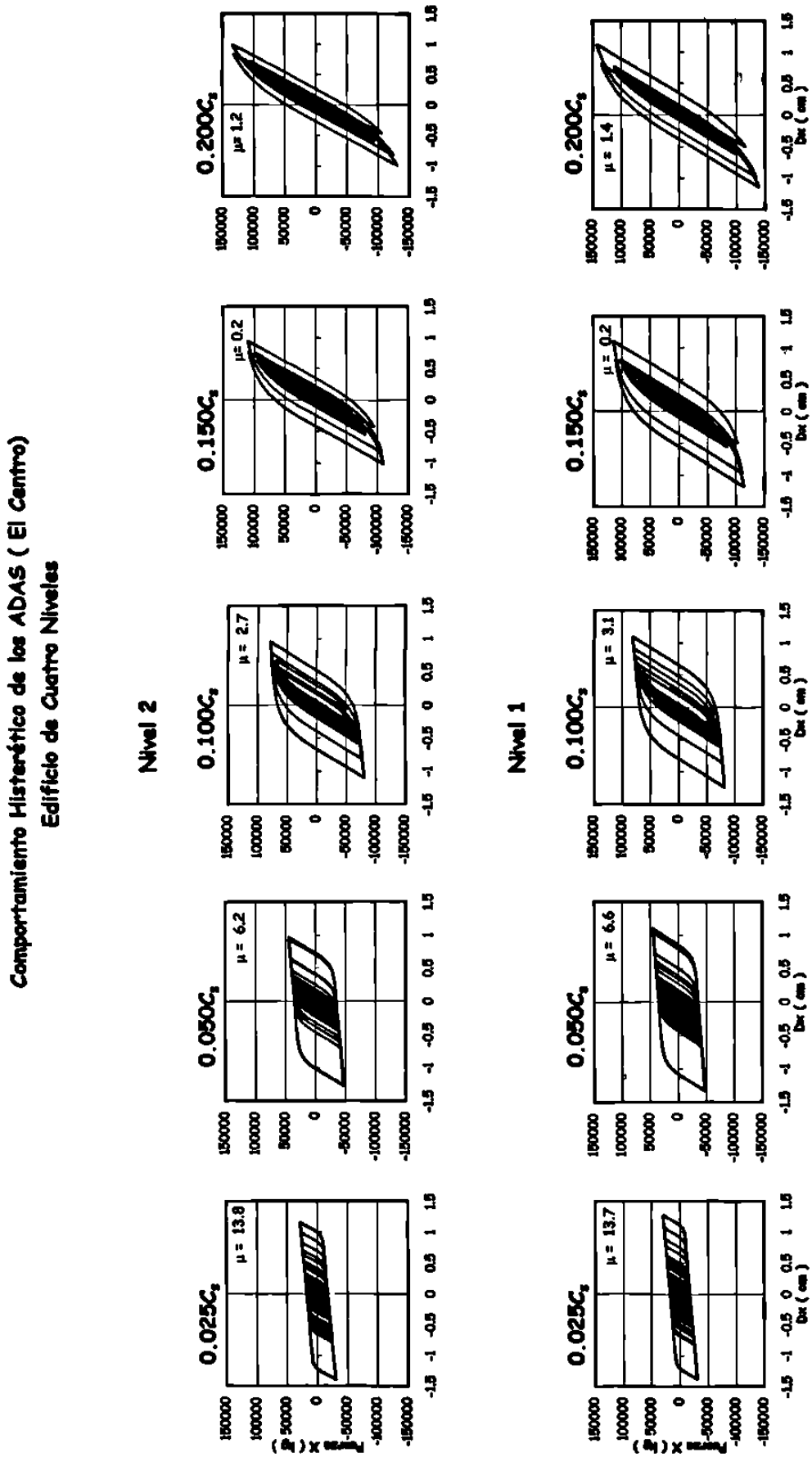

Fig. 6.64 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (El Centro); K_{ADAS} = 75 %.

Para el caso en que los marcos toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, las curvas histeréticas de las figuras 6.59 y 6.60, muestran que el mayor trabajo realizado por los ADAS es en el nivel tres del edificio, luego en el dos, en el cuatro y, finalmente, en el uno. Según se aprecia en las figuras, a menor umbral de cedencia mayor ductilidad en los ADAS, sin embargo, el límite de fluencia de $0.025C_s$ presenta ductilidades mayores que las que realmente se pueden alcanzar en este tipo de dispositivos, por lo que con este umbral de cedencia no es posible físicamente conseguir las curvas histeréticas que se muestran en las gráficas. No así las del umbral de cedencia de $0.050C_s$, en el cual se presentan ductilidades cercanas a 15, las cuales sí pueden alcanzarse por los ADAS.

Cuando los marcos toman la mitad de la rigidez lateral, el nivel en el que se presenta más ductilidad es el nivel uno, según se aprecia en las figuras 6.61 y 6.62, ahora es únicamente el umbral de $0.025C_s$, el que manifiesta ductilidades mayores, que rebasan las que se pueden alcanzar físicamente, así que se alcanza el mejor comportamiento, con el umbral de cedencia de $0.050C_s$.

En el caso en que los ADAS toman el 75 % de rigidez lateral, los lazos histeréticos se muestran más estables y en ningún momento se alcanzan ductilidades mayores que 14, según se aprecia en las figuras 6.63 y 6.64, de manera que, la mayor cantidad de energía disipada por histéresis se tiene cuando el límite de fluencia de los ADAS es $0.025C_s$. Se puede decir que todos los límites de fluencia presentan un comportamiento satisfactorio.

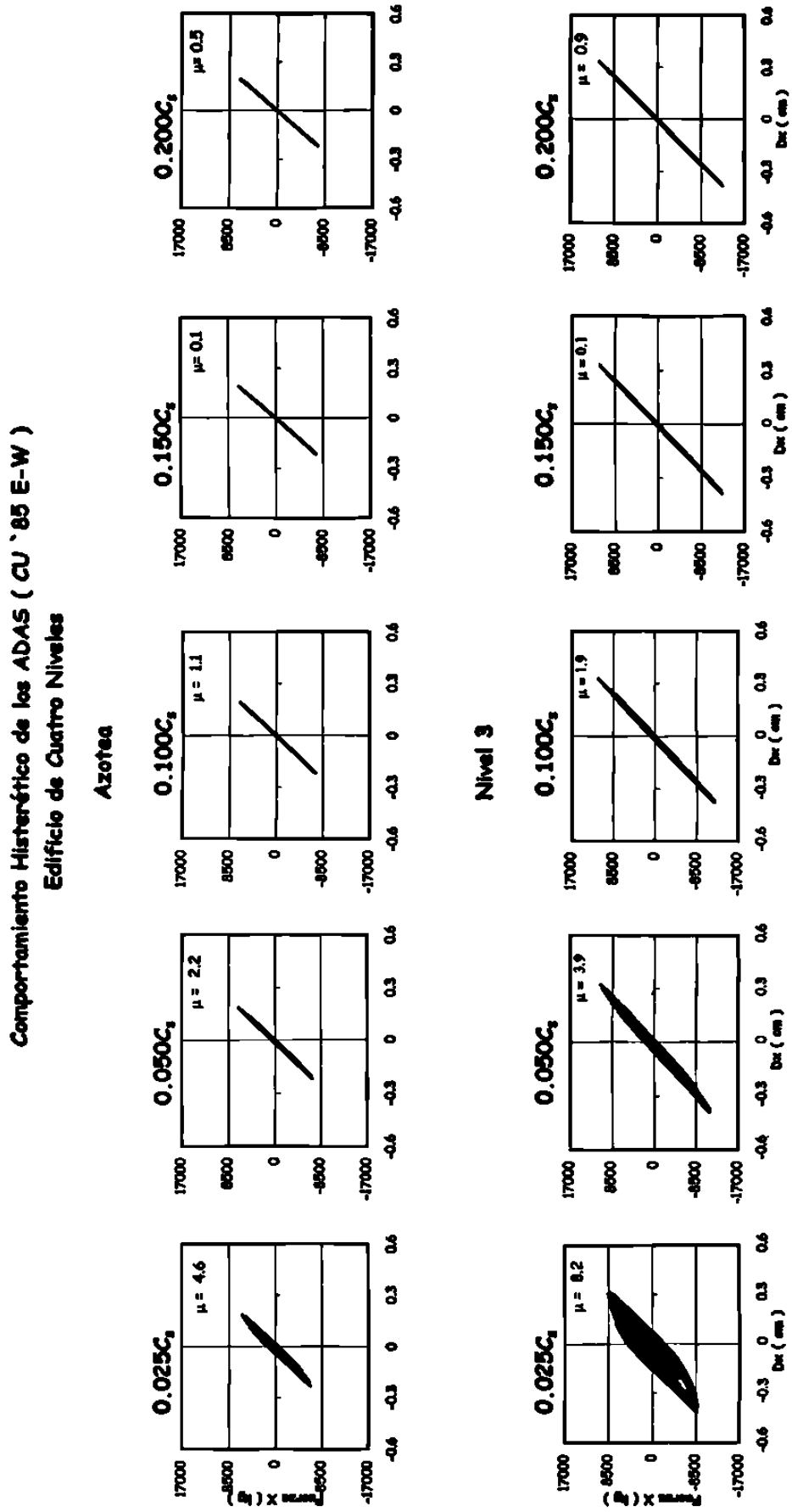

Fig. 6.65 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU `85(E-W)); K_{ADAS} = 25 %.

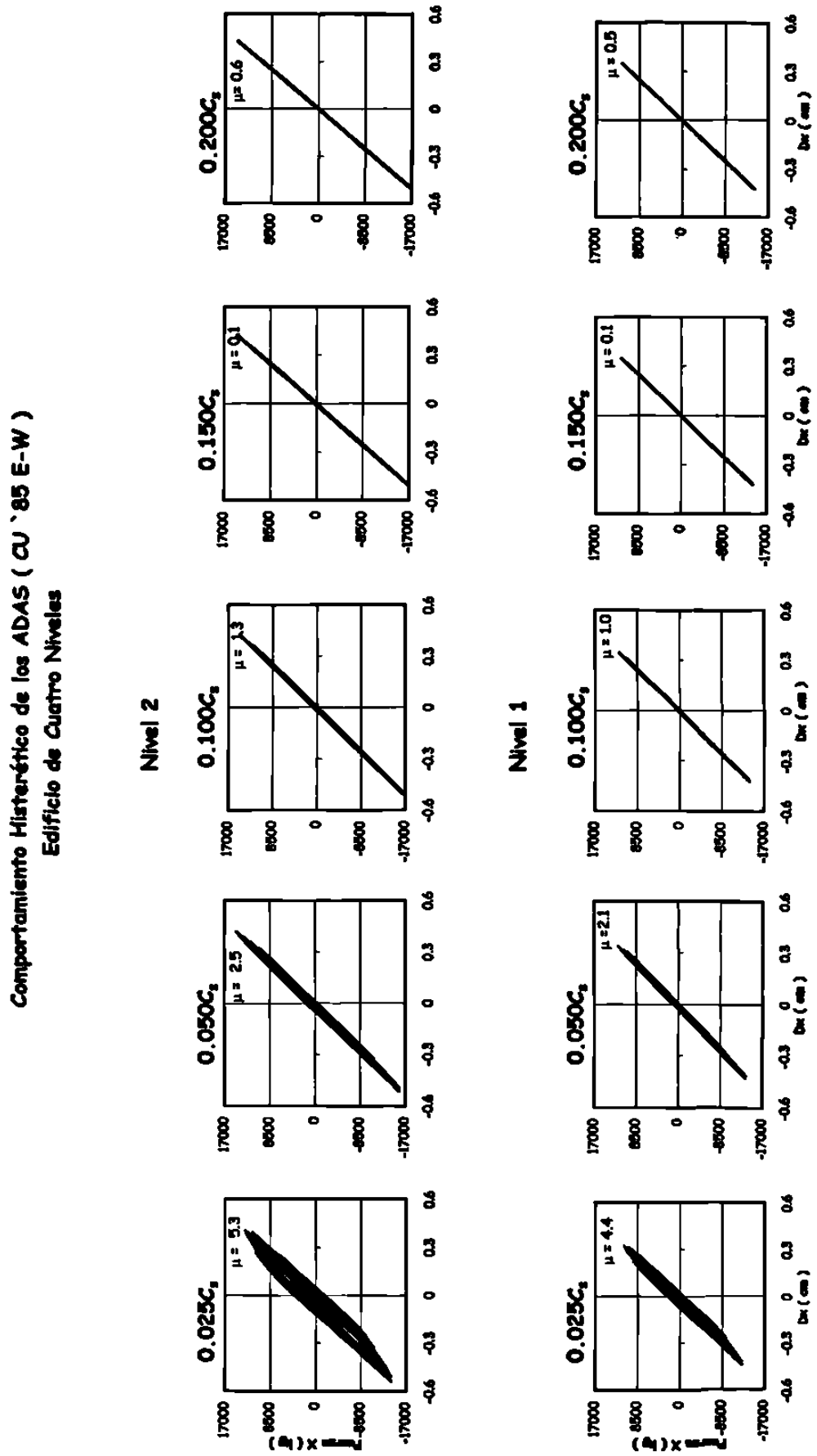

Fig. 6.66 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (CU `85(E-W)); K_{ADAS} = 25 %).

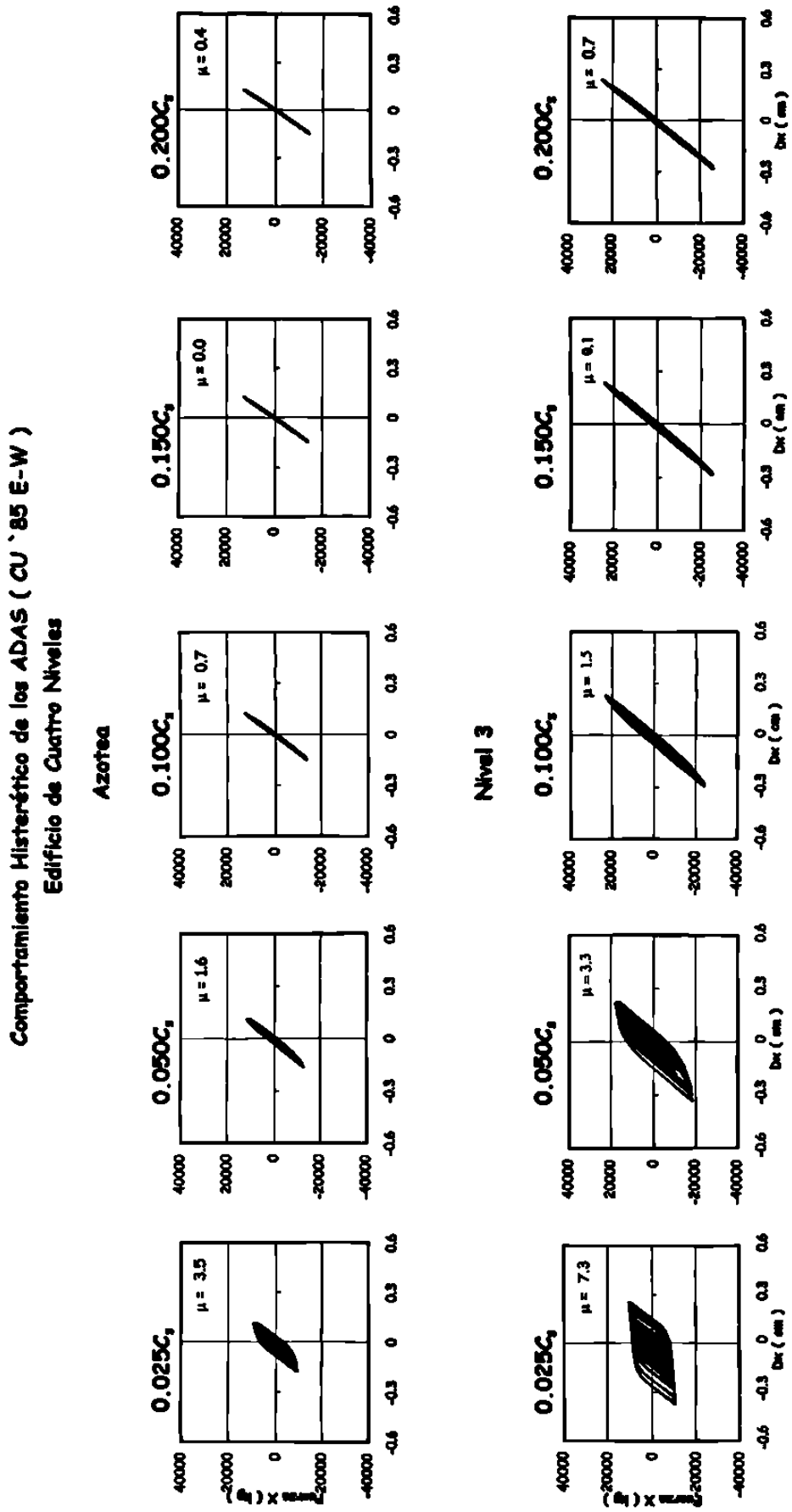

Fig. 6.67 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU `85(E-W)); K_{ADAS} = 50 %.

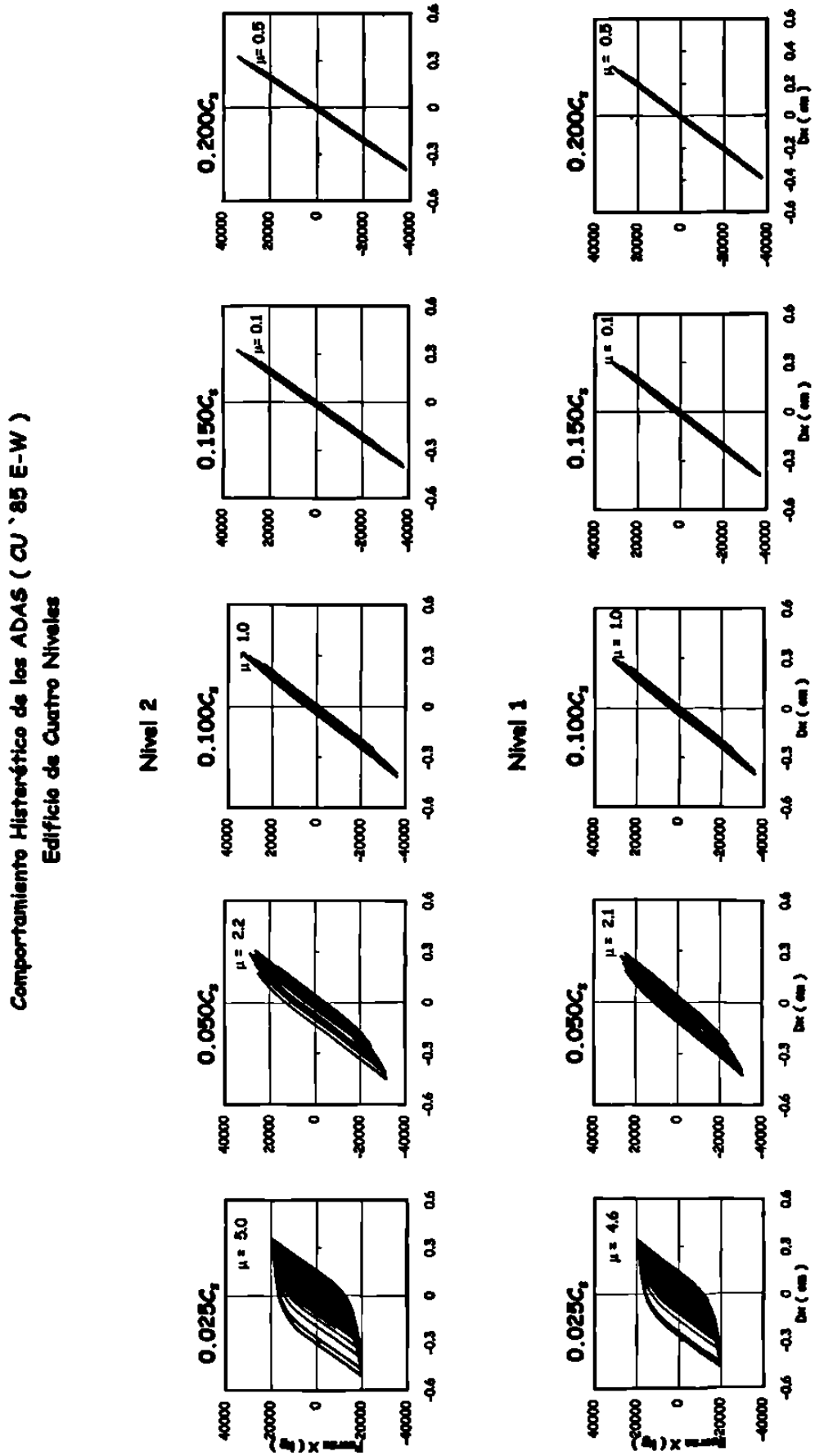

Fig. 6.68 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (CU '85(E-W)); K_{ADAS} = 50 %.

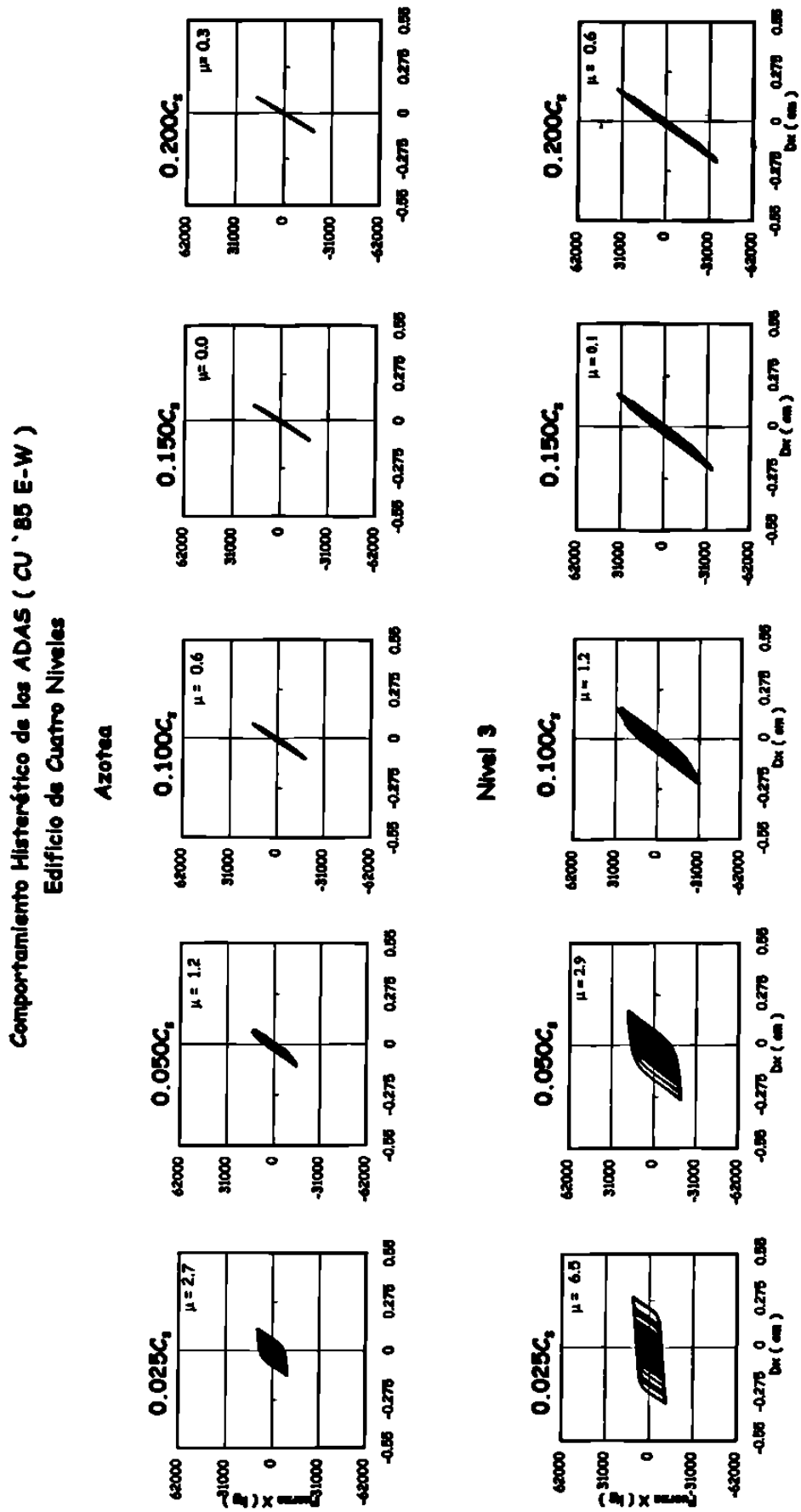

Fig. 6.69 Ciclos histeréticos en niveles superiores (CU '85(E-W)); K_{ADAS} = 75 %.

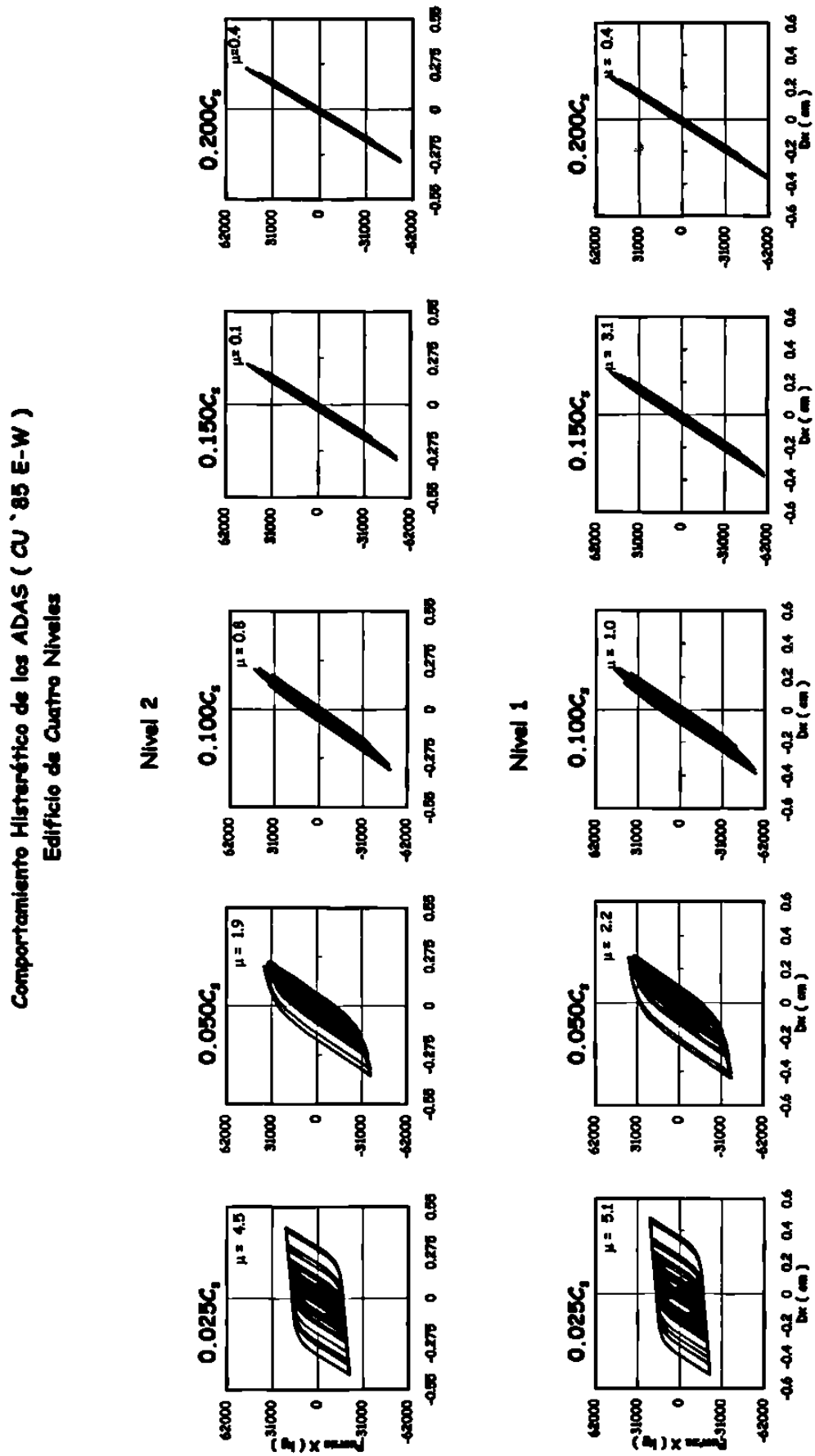

Fig. 6.70 Ciclos histeréticos en niveles inferiores (CU `85(E-W)); K_{ADAS} = 75 %.

Las curvas histeréticas de los disipadores, cuando el porcentaje de rigidez lateral tomada por los ADAS es igual al 25 por ciento, se aprecian en las figuras 6.65 y 6.66, en las que se observa que sólo para los dos umbrales de cedencia más bajos se desarrollan ductilidades de más de dos, en los dispositivos histeréticos, así que puede decirse que los otros umbrales de cedencia no se comportan de una manera deseable para conseguir que se disipe energía por comportamiento no-lineal. Según lo visto en cuestión de energías, es posible afirmar que, para esta proporción de rigideces, el mejor comportamiento se obtiene con el umbral de cedencia más bajo, que es $0.025C_s$.

Si se analizan las figuras 6.67 y 6.68, en las cuales se presentan las curvas histeréticas del caso en que los marcos toman la mitad de la rigidez lateral, es posible notar que las mayores ductilidades se presentan en el nivel inferior, sin embargo para los tres umbrales de cedencia mayor, las ductilidades alcanzadas no son de más de uno, es decir, que los disipadores se comportan linealmente y la energía que se consigue disipar por comportamiento histerético no es la suficiente como para considerar el empleo de estos dispositivos en el edificio, el límite de fluencia con mayor disipación de energía por los ADAS es el de $0.025C_s$, pero, hay que recordar que este umbral de cedencia tiene la particularidad de que la energía que entra al sistema, comparada con el lineal, es dos veces mayor; aunque, según lo observado en cuestión de energías disipadas, para este caso se presenta la menor cantidad de energía disipada por amortiguamiento modal,. así que, si bien es cierto que entra más energía al sistema, esta energía que entra se disipa por comportamiento histerético y no

por el amortiguamiento propio de la estructura, por lo que es posible afirmar que es precisamente con este umbral de cedencia que se tiene un mejor comportamiento del edificio en caso de sismo.

Los lazos histeréticos que muestran el comportamiento de los ADAS, cuando los dispositivos disipadores toman el mayor porcentaje de rigidez lateral, se aprecian en las figuras 6.69 y 6.70, las que muestran que únicamente los dos umbrales de cedencia más bajos presentan ductilidades, y que éstas no son mayores que 7, en ningún nivel. Lo que puede traducirse como un comportamiento deseable para los dispositivos disipadores de energía. Sin embargo, cabe mencionar que, según lo observado en cuestión de energías, es precisamente con estos dos límites de fluencia de los disipadores que se obtiene una mayor cantidad de energía de entrada al sistema y que, de acuerdo con lo observado en energías disipadas por amortiguamiento modal, también son estos dos umbrales de cedencia los que más energía disiparon de esa forma; además de que, en ningún momento, el porcentaje de energía disipada por histéresis es más del 30 por ciento, lo que hace suponer que el empleo de disipadores no es conveniente en esta estructura.

6.8 Análisis general de la respuesta

En este apartado se pretende, sin llegar a establecer conclusiones definitivas, redondear lo observado en el comportamiento del edificio para sus diferentes proporciones de rigidez lateral y umbrales de cedencia para cada uno de los sismos estudiados.

En el caso del sismo del Centro, el mejor comportamiento para el caso en que el marco toma el mayor porcentaje de rigidez lateral, de acuerdo con lo observado para cada uno de los parámetros de comportamiento estudiados, es posible afirmar que el mejor comportamiento se obtiene cuando el umbral de cedencia es $0.050C_s$, ya que, a pesar de que la energía de entrada es mayor, es también mayor la cantidad de energía que se disipa por comportamiento histerético. Los desplazamientos no varían en más del 6 por ciento y en cortantes tanto para valores absolutos como valores en rms, los valores reportados son menores que los que se obtuvieron para el caso lineal.

Aunque los ADAS no disipan más del 30 por ciento de la energía de entrada, las ductilidades que estos presentan no exceden de 15, que puede considerarse que están dentro de los límites que se han observado en pruebas experimentales (Whittaker, *et. al.* 1989), caso que no pasa cuando el umbral de cedencia es $0.025C_s$, ya que entonces, según el análisis, éstas alcanzan valores de hasta 31.

Cabe mencionar que para ninguno de los casos estudiados los desplazamientos relativos obtenidos excedieron de 0.006, valor límite sugerido para evitar daños a la estructura según los códigos vigentes en nuestro país, entre ellos el Reglamento del Distrito Federal. (RCDDF, 1993)

En el caso en que la rigidez lateral que proporcionan los ADAS sea igual al 50 por ciento de la rigidez total, el mejor comportamiento se tiene cuando el umbral de cedencia es de $0.050C_s$. Es en este caso cuando más energía se

disipa por comportamiento histerético y los ciclos histeréticos para los ADAS alcanzan ductilidades no mayores que 11, que se toma como un comportamiento adecuado para los disipadores.

El desplazamiento absoluto máximo, pico a pico, no es mayor que el 7 por ciento del lineal, y en rms, este límite de fluencia presenta el menor de los desplazamientos; algo parecido pasa con los cortantes, si bien, es para $0.100C_s$ que se obtiene el menor cortante pico a pico. Si se observa el comportamiento general de la historia, puede decirse que éste es satisfactorio.

Cuando son los disipadores histeréticos los que proporcionan el mayor porcentaje de rigidez lateral del edificio, es posible afirmar que el mejor comportamiento se obtiene cuando el umbral de cedencia es $0.050C_s$, ya que la diferencia en energías disipadas por los ADAS no es mucha comparada contra la del umbral de cedencia menor; además, la ductilidad mayor obtenida no es más grande que 10, cosa que no pasa con el menor nivel de fluencia; así mismo, es para este caso que se presenta el menor desplazamiento observado en rms y en valores pico, el incremento con respecto al lineal, no es más del 18 por ciento.

En cuestión de cortantes, la historia muestra que el comportamiento global del edificio es satisfactorio, ya que no se presentan tantas crestas como para el umbral de cedencia menor.

En el caso del sismo de CU, de acuerdo con lo observado, para el caso en que los marcos toman el 75 por ciento de la rigidez lateral, es posible afirmar que el mejor comportamiento de la estructura se obtiene cuando el umbral de cedencia de los disipadores es $0.025C_s$; ya que, a pesar de que es mayor la cantidad de energía que entra al sistema, al compararlo con el lineal, también es el caso que menor cantidad se disipa por amortiguamiento modal y más energía se disipa por comportamiento histerético, lo que puede traducirse en menor daño a los elementos estructurales. De la mano con esta afirmación, está el hecho de que los desplazamientos absolutos, en valores pico, no se incrementan en más del 7 por ciento, al compararse con el comportamiento lineal, y que para los desplazamientos relativos, tanto en valores pico como en rms, no se observan cambios con respecto al comportamiento que presenta el modelo elástico.

Las ductilidades de los disipadores no son mayores que 9, lo que hace evidente que los disipadores están trabajando en el nivel recomendado.

En el caso en que la proporción de rigideces tomada por los marcos es la misma que toman los disipadores, es posible aseverar que el mejor comportamiento se obtiene para el límite de fluencia de $0.025C_s$ y que, si bien es cierto que según se aprecia en las gráficas de energía, es el sistema al que más energía entra, también es el que tiene menos energía disipada por amortiguamiento modal y, al mismo tiempo, es el que mayor porcentaje de energía disipa por comportamiento histerético.

Las curvas histeréticas de los disipadores muestran evidencias de que en ningún momento, la ductilidad alcanzada por los ADAS es mayor que 8, ductilidad que es posible alcanzar en una estructura real.

En lo que concierne a los desplazamientos, los valores absolutos, pico a pico, no tienen incrementos del 28 por ciento, con respecto al lineal y los valores en rms no muestran más que un incremento del 4 por ciento. Los desplazamientos relativos son prácticamente los mismos, así que, debido a que esta estructura disipa más energía por comportamiento histerético y menos por el amortiguamiento propio de la estructura, comparándola con la lineal, es posible afirmar que tendrá menos daño estructural que la elástica, al ser sometida a un sismo de las características del de análisis.

En cuanto al caso en que la mayoría de la rigidez lateral es proporcionada por los ADAS, la mejor respuesta se presenta con un umbral de cedencia de $0.050C_s$, debido a que, a pesar de que a este edificio entra más energía que al caso elástico, la energía disipada por amortiguamiento modal es menor y la energía disipada por histéresis es mucho mayor para el caso no lineal que para el lineal.

Al evaluar los porcentajes de energía disipada, este umbral de cedencia disipa alrededor del 60 por ciento d la energía total disipada por comportamiento no lineal de los ADAS y se observa que las ductilidades obtenidas para los dispositivos histeréticos no son mayores que 3.

Los cortantes en rms no se incrementan más del cuatro por ciento, comparado contra el caso lineal y los desplazamientos que se obtienen para el caso no lineal, en valores pico, se incrementan en un 47 por ciento; pero los valores en rms son prácticamente iguales, por lo que se puede decir que son más los beneficios obtenidos que los perjuicios que pudieran obtenerse, al adicionar mecanismos disipadores de energía al edificio.