

DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS AMORTIGUADOS: VERIFICACIÓN mediante análisis dinámico

MANUEL AGUIRRE GÁNDARA

INTRODUCCIÓN

La ref [1] versa sobre un método sencillo para diseñar edificios de concreto reforzado con estructura elástica amortiguada. Se infiere que tal estructura, por estar diseñada para permanecer elástica dentro del más amplio intervalo posible de distorsiones de entrepiso, debe ser capaz de resistir sismos con pocas posibilidades de sustentar daños estructurales. El intervalo de distorsiones antes referido abarca hasta 0.006, valor que coincide con uno de dos máximos permitidos por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, RCDF-93 [2].

La estructura con la que se ilustró el método propuesto en la ref [1] se muestra esquemáticamente en la fig. 1. En el presente trabajo se efectúa el análisis dinámico de esta misma estructura bajo el efecto simulado de la componente nortesur del sismo de El Centro (California), de 1940, cuyo registro de aceleraciones y espectro de respuesta se presentan en las fig. 2 y 3 respectivamente.. Se trata de una estructura con periodo natural de vibración cercano a un segundo, susceptible de ser fuertemente excitada por el sismo en cuestión, de tal manera que se somete a prueba severa la validez del método sencillo de diseño.

Con referencia a la estructura de la fig. 1, la tabla 1 contiene valores del peso por entrepiso W_i , el cortante lateral V_i , el desplazamiento máximo elástico de entre-

Figura 1

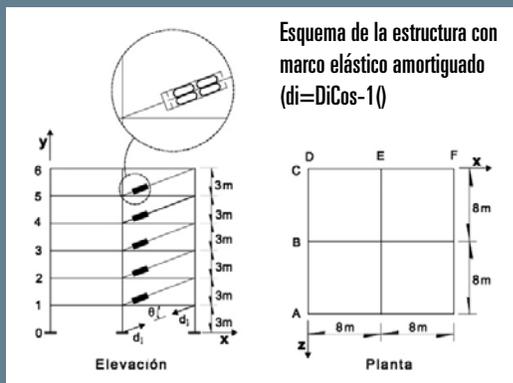


Figura 2

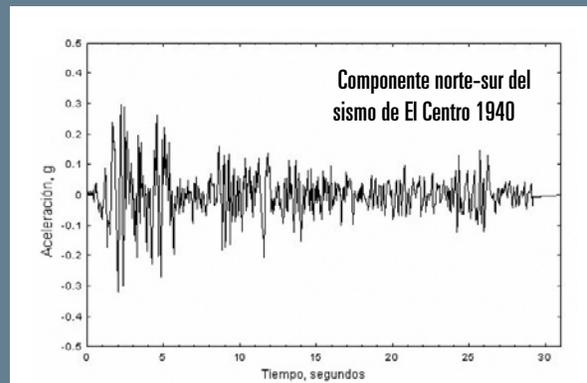


Figura 3

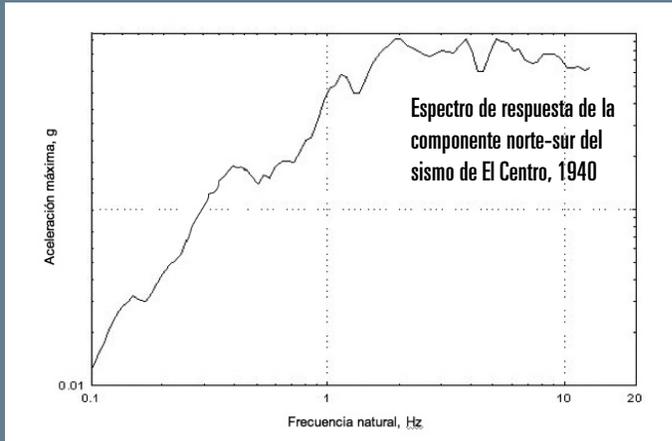


Tabla 1 Valores extraídos de la Ref 1

Nivel i(1)	W_i , ton(2)	V_i , ton(3)	δ_i , cm(4)	N_i (5)
6	300	53.0	1.38	16
5	400	112	1.56	32
4	400	159	1.75	46
3	400	195	1.90	56
2	400	218	1.92	64
1	400	230	1.82	66

piso (i ocurrido ante una carga sísmica igual a 1.4 veces V_i , y el número de disipadores óvalo N_i instalados en cada entrepiso), valores todos ellos que se obtienen de la ref[1] para facilitar su consulta en relación con el análisis dinámico que se presenta a continuación.

ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis dinámico se hace paso-a-paso en hoja de cálculo, abarcando los primeros

seis segundos del sismo (intervalo muy dentro del cual ocurren los niveles máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento), con un modelo de la estructura que cubre solamente el comportamiento elástico de la misma, y con el modelo matemático (tri-lineal) de los disipadores de energía propuesto en la ref [3].

La tabla 2 contiene valores de las masas m_i , rigideces k_i , y fuerzas disipadoras D_i utilizados en el análisis dinámico, el cual se efectúa específicamente en relación con un marco estructural plano, representativo de cualquiera de los seis marcos A, B, C, D, E y F que conforman la estructura. Se señala que las fuerzas disipadoras D_i actúan en un plano horizontal, y que $m_i = W_i / (3g)$, $k_i = (1.4V_i) / (3(i))$, y $D_i = (N_i / 3)F_i C_o s$, (donde F_i es la fuerza ejercida por cada uno de varios disipadores óvalo colocados a lo largo de la diagonal implementada en cada entrepiso. El ángulo de la diagonal respecto al plano horizontal es $(=20.56)$ y la aceleración de la gravedad $g = 980.7 \text{ cm/s}^2$.

La fig. 4 muestra un modelo del marco plano representativo de la estructura, al cual se le considera como un marco con base estacionaria en donde el efecto del movimiento del suelo está representado mediante las fuerzas sísmicas efectivas $m_i \ddot{U}_g$ [4]. La fig. 5 exhibe los diagramas de cuerpo libre de las masas, donde U_i es el desplazamiento de piso, \ddot{U}_i la aceleración de piso, y \ddot{U}_g la aceleración del suelo [4]. Utilizando el principio de D'Alembert, que permite manejar las fuerzas de inercia $m_i \ddot{U}_i$ como fuerzas aplicadas, se considera la condición de equilibrio dinámico de las masas, de donde resultan las siguientes ecuaciones:

Modelo del marco estructural representativo

Figura 4

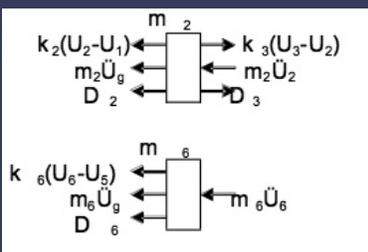
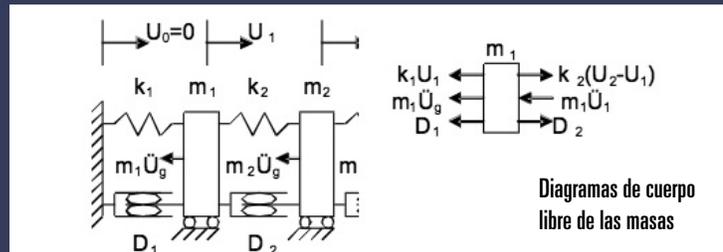


Figura 5



$$m_1\ddot{U}_1+m_1\ddot{U}_g+k_1U_1-k_2(U_2-U_1)+D_1-D_2=0 \quad (1)$$

$$m_2\ddot{U}_2+m_2\ddot{U}_g+k_2(U_2-U_1)-k_3(U_3-U_2)+D_2-D_3=0 \quad (2)$$

$$m_3\ddot{U}_3+m_3\ddot{U}_g+k_3(U_3-U_2)-k_4(U_4-U_3)+D_3-D_4=0 \quad (3)$$

$$m_4\ddot{U}_4+m_4\ddot{U}_g+k_4(U_4-U_3)-k_5(U_5-U_4)+D_4-D_5=0 \quad (4)$$

$$m_5\ddot{U}_5+m_5\ddot{U}_g+k_5(U_5-U_4)-k_6(U_6-U_5)+D_5-D_6=0 \quad (5)$$

$$m_6\ddot{U}_6+m_6\ddot{U}_g+k_6(U_6-U_5)+D_6=0 \quad (6)$$

Sustituyendo valores en las ecuaciones 1 a 6, y despejando las aceleraciones de piso, se obtiene:

$$\ddot{U}_1=-\ddot{U}_g-433.6U_1+389.6(U_2-U_1)-0.1515F_1+0.1469F_2 \quad (7)$$

$$\ddot{U}_2=-\ddot{U}_g-389.6(U_2-U_1)+352.1(U_3-U_2)-0.1469F_2+0.1285F_3 \quad (8)$$

$$\ddot{U}_3=-\ddot{U}_g-352.1(U_3-U_2)+311.8(U_4-U_3)-0.1285F_3+0.1056F_4 \quad (9)$$

$$\ddot{U}_4=-\ddot{U}_g-311.8(U_4-U_3)+246.3(U_5-U_4)-0.1056F_4+0.07344F_5 \quad (10)$$

$$\ddot{U}_5=-\ddot{U}_g-246.3(U_5-U_4)+131.8(U_6-U_5)-0.07344F_5+0.03672F_6 \quad (11)$$

$$\ddot{U}_6=-\ddot{U}_g-175.7(U_6-U_5)-0.04896F_6 \quad (12)$$

La integración de las ecuaciones 7 a 12 se realiza numéricamente paso-a-paso en hoja de cálculo, empleando la siguiente fórmula de recurrencia:

$$U_{s+1}=2U_s-U_{s-1}+\ddot{U}_s(t)^2 \quad (13)$$

de donde se obtienen, entre otros resultados, los desplazamientos de piso U_i así como los de entrepiso $U_i - U_{i-1}$.

La integración antes referida requiere determinar las fuerzas F_i para cada paso, las cuales se calculan individualmente por entrepiso, a partir del modelo matemático del disipador óvalo proveniente de la ref [3] y tomando en cuenta tanto la magnitud como el sentido del desplazamiento al que están sujetos los disipadores en cada entrepiso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

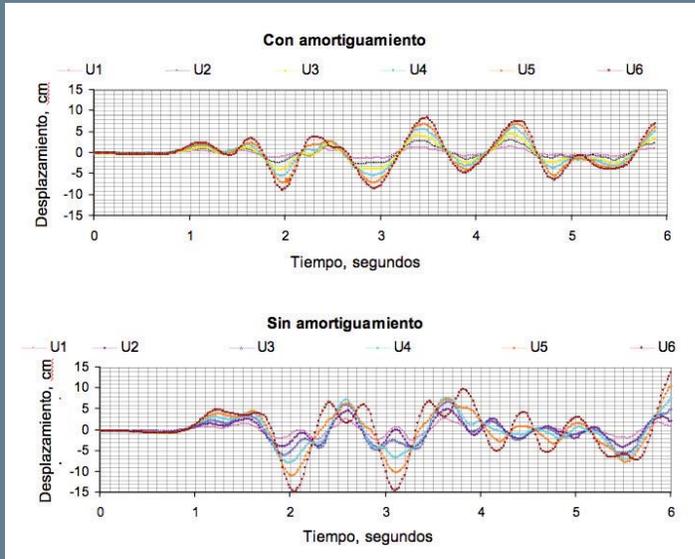
Los resultados iniciales del análisis dinámico se presentan en las figuras 6 y 7. La fig. 6 muestra los desplazamientos de piso de la estructura con amortiguamiento y sin éste. Comparando estos resultados de una manera muy general, se puede decir que

el amortiguamiento tiende a hacer un poco más «ordenada» la oscilación de la estructura, la cual exhibe un periodo fundamental de aproximadamente un segundo. El último nivel de la estructura amortiguada tiene un desplazamiento

Tabla 2 Valores para parámetros utilizados en el análisis dinámico

Nivel i(1)	m_i , kg-s ² /cm(2)	k_i , kg/cm(3)	D_i , kg(4)
6	102.0	17,920	4.994 F_6
5	136.0	33,500	9.998 F_5
4	136.0	42,400	14.36 F_4
3	136.0	47,890	17.48 F_3
2	136.0	52,990	19.98 F_2
1	136.0	58,970	20.60 F_1

Figura 6

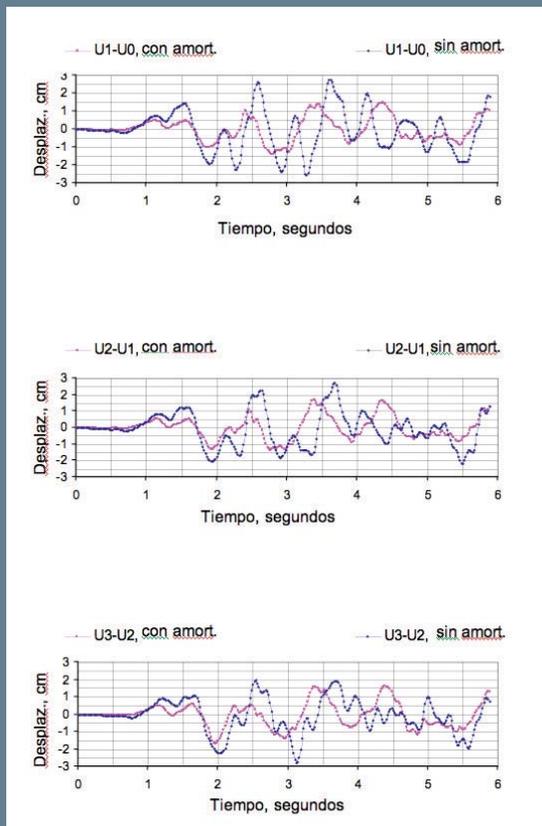


Desplazamientos de piso de la estructura.
El amortiguamiento es: N1=66, N2=64,
N3=56, N4=46, N5=32, N6=16

cercano a nueve cm, comparado con 15 cm para el mismo nivel de la estructura no amortiguada. Debe señalarse que los desplazamientos de piso de esta última no son reales sino estimados suponiendo que la estructura mantiene comportamiento elástico o lineal (estrictamente, cualquier desplazamiento de entrepiso $U_i - U_{i-1}$ cuyo valor rebasa el (i indicado en la tabla 1 implica comportamiento no-lineal).

Las fig. 7 se refiere a los desplazamientos de entrepiso de la estructura amortiguada y la no amortiguada; al igual que se señala en el párrafo anterior, éstos últimos no son reales, sino estimados. Se aprecia en esta figura que la estructura amortiguada, exceptuando el quinto y sexto entrepisos, muestra un comportamiento elástico; en el caso de estos dos entrepisos, el desplazamiento rebasa al máximo elástico indicado en la tabla 1 en un 21% para el quinto entrepiso, y en un 45% para el sexto. A fin de impedir el comportamiento inelástico de estos dos entrepisos, se procede por tanteos a modificar juiciosamente¹ el número y distribución de los disipadores, quedando estos como sigue: N1=66, N2=64, N3=56, N4=52, N5=46 y N6=30. Bajo estas nuevas condiciones, se vuelve a hacer el análisis dinámico de la estructura ante el mismo temblor. La fig. 8 muestra los nuevos desplazamientos de entrepiso, todos éstos elásticos como se puede corroborar comparándolos con los que aparecen en la tabla 1.

Figura 7-A



CONCLUSIONES

Se está conciente de que los primeros seis segundos del temblor que se utiliza para el análisis son sólo la quinta parte de la duración total del sismo, pero se cree que

Desplazamientos de entrepiso.
El amortiguamiento es: N1=66, N2=64, N3=56,
N4=46, N5=32, N6=16

Figura 7-B

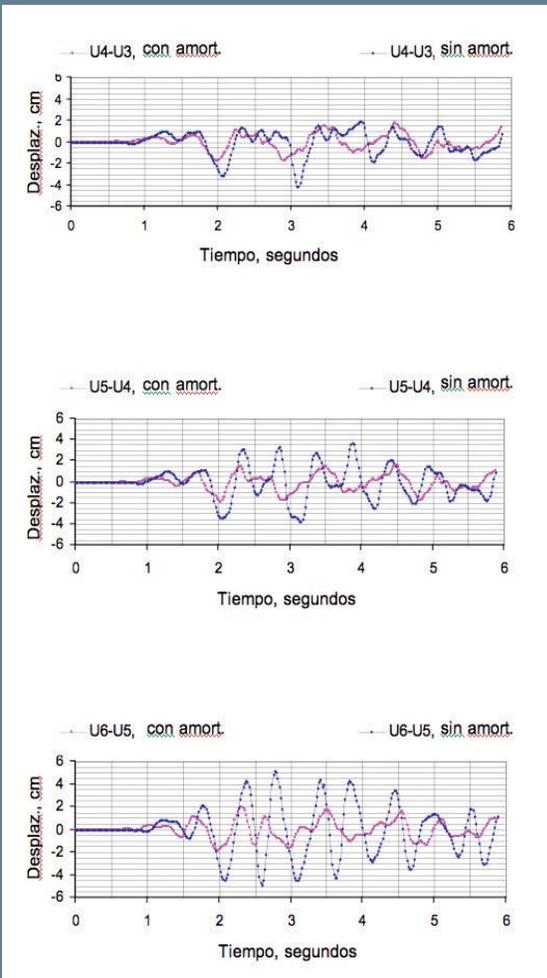
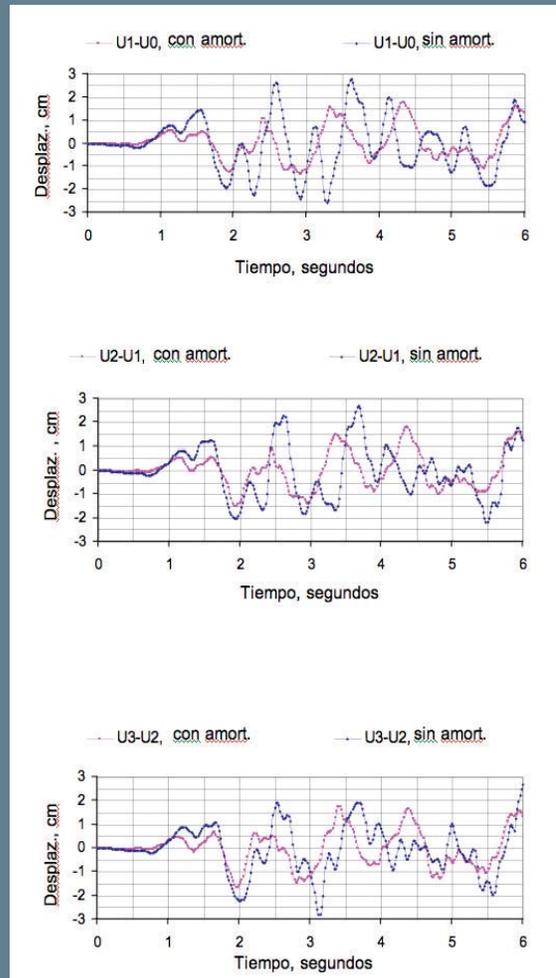


Figura 8-A



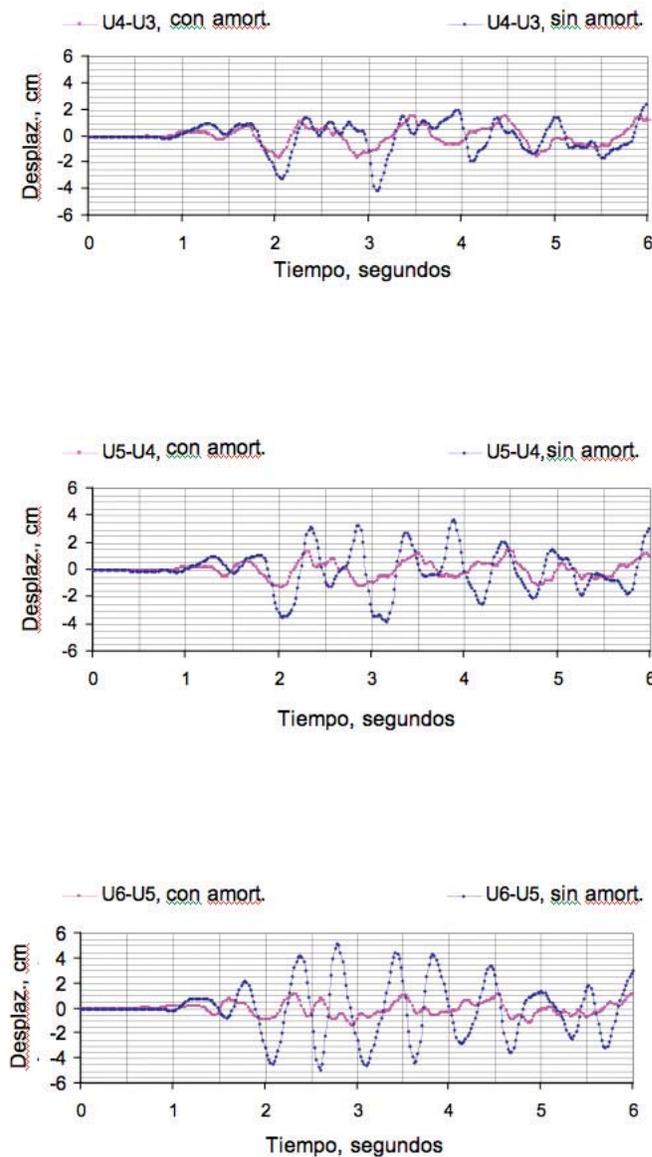
son suficientes para ilustrar el uso del análisis dinámico como ayuda para verificar y, en su caso, modificar el número y la distribución de los disipadores en la estructura. No obstante, sería mejor utilizar el temblor completo para hacer el análisis; esto apunta a la necesidad de automatizar el proceso, tarea que queda pendiente de abordar y que permitirá también averiguar el comportamiento de la estructura ante otros sismos reconocidamente fuertes.

Con base en los resultados presentados aquí, el método sencillo para diseñar edificios de concreto reforzado con estructura elástica amortiguada (ref [1]) es

aceptable y práctico para determinar, como primera aproximación, el número y distribución de los disipadores en la estructura. Es recomendable someter la estructura a análisis dinámico, ya que éste permite corroborar si dicha primera aproximación es suficiente, o si se requiere hacer modificaciones al número de disipadores incorporados en la estructura, con el fin de que ésta tenga comportamiento puramente elástico y, por consiguiente, sea capaz de resistir sismos con poca posibilidad de sustentar daños estructurales. La estructura diseñada según esta metodología debe resultar económicamente viable siempre que se tomen en cuenta los ahorros que

Desplazamientos de entrepiso.
El amortiguamiento es:
N1=66, N2=64, N3=56,
N4=52, N5=46, N6=30

Figura 8-B



*Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

El tanteo juicioso se basa en reconocer que la distorsión en el quinto y sexto entresijos respectivamente es 1.21 y 1.45 veces la distorsión elástica máxima posible. Luego, una aproximación al número de disipadores necesario para obtener distorsión elástica en estos entresijos resulta de multiplicar el número de disipadores original por $(1.21)^2$ y $(1.45)^2$ para el quinto y sexto entresijos respectivamente. El nuevo número de disipadores en el cuarto entresijo es simplemente el justo medio (número par) entre el del tercero y quinto entresijos.

REFERENCIAS

1. Aguirre M y Aguirre R, «Elástica o inelásticamente: He ahí el dilema». *Construcción y Tecnología*, ISSN 0187-7895, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, Vol. XIV, No.162, pp 12-17, nov 2001.
2. Departamento del Distrito Federal. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, RCDF-93, Diario Oficial de la Federación, 1993.
3. Aguirre M y Sánchez A R, «Structural seismic dampers». *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp 1158-1171, mayo 1992.
4. Chopra A K, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.

implica no tener que reparar daños a lo largo del ciclo de vida útil de la estructura.

RECONOCIMIENTOS

El autor agradece al Maestro Filiberto Gutiérrez Martínez instruirlo sobre el uso de la hoja de cálculo, además de su acuciosa ayuda para confeccionar algunas de las figuras. ☺