

## ACELEROGRAMAS ANALÍTICOS EMPLEADOS PARA ESTIMAR EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS EN LA ZONA DEL LAGO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

*Raúl Guerrero Del Á.<sup>1</sup>, Eduardo Reinoso A.<sup>1,2</sup> y Mario Ordaz S.<sup>1,2</sup>*

### RESUMEN

Se presenta el análisis inelástico de un edificio de 12 niveles de concreto reforzado ubicado en terreno blando del valle de México. El dimensionamiento de los elementos estructurales se llevó a cabo con programas de cómputo de análisis elástico y el Reglamento de Construcciones para el DF. Mediante el análisis inelástico se obtiene el historial del daño global máximo en la estructura cuando se somete a un movimiento sísmico conocido. Se propone el uso de un acelerograma sintético para la zona del lago definido en términos de la etapa de máximas demandas del movimiento y de las características dinámicas del sitio, que representa el mismo daño global máximo que el obtenido con el registro sísmico real. Este acelerograma sintético, a pesar de su sencillez y corta duración, puede ser una herramienta útil en el análisis no lineal de estructuras.

### ABSTRACT

The inelastic analysis of a 12 story reinforced concrete building located over Mexico City lake-bed zone is presented. All structural elements were designed according to the building Code of the City. The history of the maximum structural damage for a given seismic motion was obtained. Due to the dynamic characteristics of the lake-bed zone it is possible to propose a sintetic accelerogram in terms of the strong ground motion duration, the period of the site and the expected maximum ground acceleration. This sintetic accelerogram yields the same damage patterns as the one obtained with the actual seismic record and may be a simple and powerful tool for inelastic design of structures.

---

Artículo recibido el 23 de enero de 1998 y aprobado para su publicación el 9 de julio de 1998. Se aceptarán comentarios y/o discusiones al artículo hasta cinco meses después de su publicación

*1 Evaluación de Riesgos Naturales, Calle Dos, N° 2, 2° piso, Col Acacias, 03230, México, DF  
E-mail: ernmexico@compuserve.mx*

*2 Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México, DF  
E-mail: ere@cem.iingen.unam.mx*

## INTRODUCCIÓN

El interés por integrar de alguna forma la duración del movimiento fuerte del terreno al análisis estructural se debe fundamentalmente al deterioro que sufren los edificios por el aumento del número y amplitud de ciclos de carga durante sismos importantes. El daño estructural depende de la historia de deformaciones que sufre la estructura antes y después de las máximas demandas del movimiento.

Con ayuda de los datos acelerográficos captados durante sismos recientes en estaciones ubicadas en la zona epicentral mexicana, se ha podido comprobar que ni la aceleración máxima del terreno ni los desplazamientos del terreno ni los espectros de respuesta están estrechamente correlacionados con los daños observados en obras civiles; sin embargo, en esos mismos sitios instrumentados, la duración es un parámetro bien correlacionado con los efectos de los sismos en las estructuras (Reinoso et al, 1996 y Guerrero, 1997).

Para estudiar los efectos de la duración del movimiento, se incluye en este trabajo un análisis inelástico de un edificio de 12 niveles de concreto reforzado sometido a un registro sísmico conocido. A partir de los resultados obtenidos, se plantea una expresión analítica que en función de la aceleración máxima del terreno, el periodo dominante del sitio y la duración del movimiento, genera el mismo comportamiento que el acelerograma real.

## CONCEPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

### Estructuración y geometría

El edificio tiene una estructura de concreto reforzado a base de trabes y columnas. Consiste en un sistema de 12 niveles, un sótano, un cajón de cimentación y pilotes de fricción; a su vez se forma por 4 marcos de 3 crujeas con claros libres de 6 metros en ambas direcciones ortogonales entre sí y la altura de los entrepisos es constante e igual a 3.5 metros. En la figura 1 se muestra la estructura en planta y elevación.

El sistema de piso está formado por una losa de concreto armado de 12 cm de espesor. Los elementos no estructurales, como son los muros divisorios, se proyectan en forma desligada de la estructura principal, aunque se tomaron como parte en la definición de las especificaciones de carga con un valor estimado de  $100 \text{ kg/m}^2$ . La magnitud neta de las cargas muertas y vivas de cada entrepiso fue de 530 y  $180 \text{ kg/m}^2$ , respectivamente, y para la azotea de 450 y  $70 \text{ kg/m}^2$ .

## ANÁLISIS Y DISEÑO

### Análisis elástico de la estructura

El edificio está localizado en la zona de lago de la ciudad de México y se destina a oficinas. De acuerdo con el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal

(RCDF) correspondería a una estructura tipo B construida sobre la zona III. El edificio es analizado con el método estático propuesto en las Normas Técnicas Complementarias para Sismo (NTCS) del mencionado reglamento, con un coeficiente de 0.4 y un factor de comportamiento sísmico  $Q = 4$ .

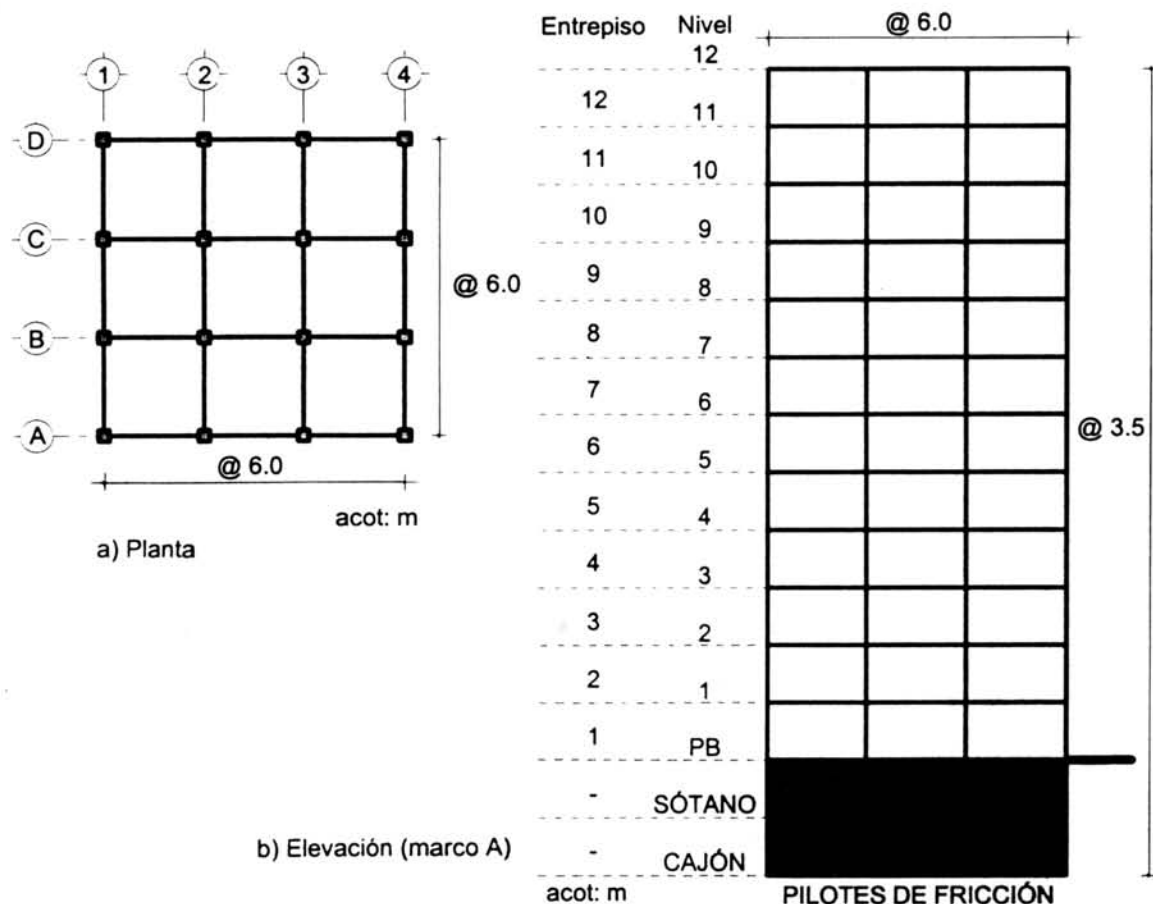


Fig 1. Geometría de la estructura

Para el cálculo de los elementos mecánicos en las trabes, el edificio se modeló en el programa SAP90 (Wilson y Habibullah, 1988) como un marco plano empotrado en su base. Los tamaños propuestos de columnas y trabes fueron los necesarios para que las deformaciones laterales de entrepiso debidas a la fuerza cortante resultaran no mayores que 0.012 veces la altura de entrepiso de acuerdo con el RCDF.

### Diseño de los elementos estructurales

Las resistencias a compresión del concreto y nominal a la fluencia del acero fueron de  $250 \text{ kg/cm}^2$  y  $4200 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente. Se procedió al diseño de las trabes apoyándose en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto (NTCEC) del RCDF, en su parte de marcos dúctiles.

Las columnas se diseñaron a flexocompresión en ambas direcciones (100 % del momento en una dirección y 30 % en la dirección perpendicular) y con una carga axial de diseño igual a la gravitacional que le correspondía por área tributaria para cada una, más la suma del cortante sísmico de las trabes. La figura 2 muestra las dimensiones y la distribución de los armados finales en los elementos estructurales y la tabla 1 proporciona algunas características de las secciones transversales de dichos elementos.

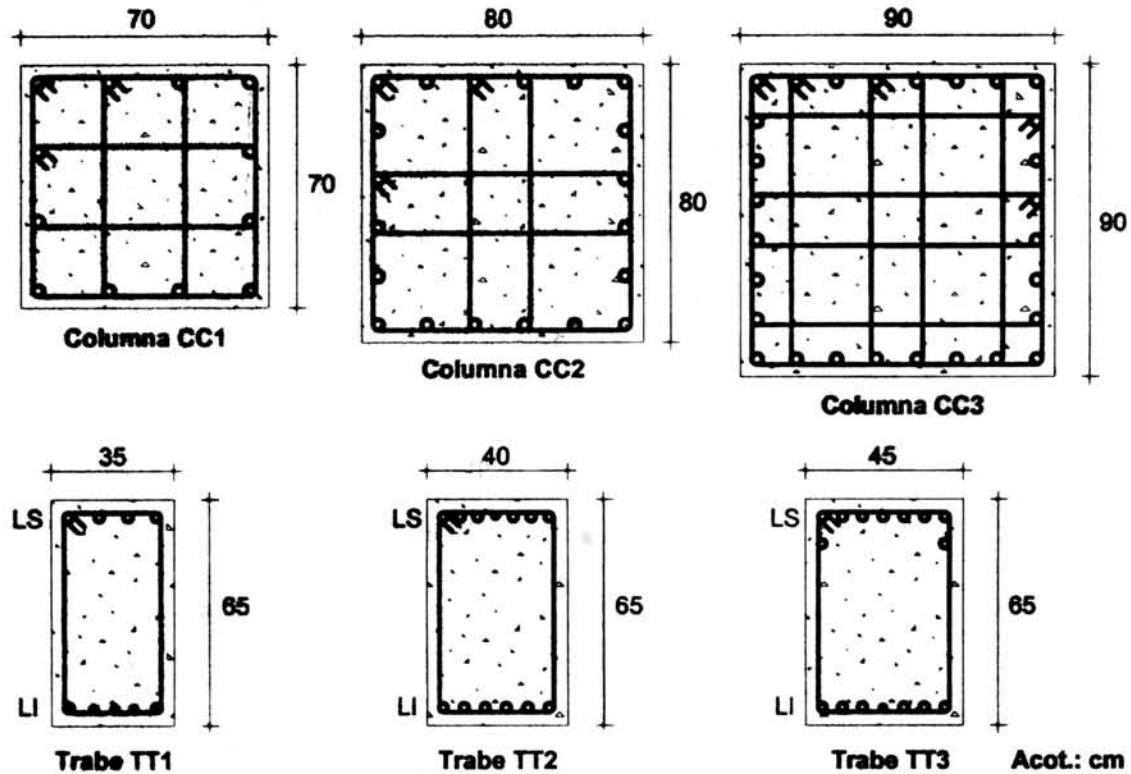


Fig 2. Dimensiones y distribución del armado en elementos estructurales

Tabla 1. Características generales de las secciones transversales de trabes y columnas

ELEMENTO	SECCIÓN (cm)	ARMADO	ESTRIBOS (sep. en cm)	ENTREPISO	NIVEL
CC1	70 x 70	12 # 10	# 4 @ 10	9 - 12	-
CC2	80 x 80	20 # 10	# 4 @ 10	5 - 8	-
CC3	90 x 90	28 # 10	# 4 @ 10	1 - 4	-
TT1	35 x 65	(LS) 4 # 8 (LI) 2 # 8 y 3 # 6	# 3 @ 10	-	9 - 12
TT2	40 x 65	(LS) 6 # 8 y 1 # 6 (LI) 6 # 8	# 3 @ 7	-	5 - 8
TT3	45 x 65	(LS) 7 # 8 y 2 # 4 (LI) 6 # 8 y 1 # 6	# 3 @ 6	-	1 - 4

Entre las características dinámicas del edificio se obtuvo una estimación del periodo fundamental de vibración bajo dos criterios: base rígida y con interacción suelo-estructura.

De esta última condición se propuso un piso ficticio en la base del cajón de cimentación, con propiedades calculadas a partir del apéndice 7 de las NTCS del RCDF considerando una profundidad del estrato arcilloso dentro del valle de México de 40 m y un periodo dominante del terreno ( $T_1$ ) igual a 2.0 segundos. El programa ETABS (Wilson y Habibullah, 1989) se empleó para el cálculo de dichos periodos considerando las secciones brutas de los elementos estructurales. Los valores fueron de 1.26 y 1.38 segundos para las condiciones de base rígida e interacción suelo-estructura, respectivamente.

### RESPUESTA INELÁSTICA

Procediendo a modelar la estructura para un análisis inelástico, considerando interacción suelo-estructura con un piso ficticio, se utilizó el programa de cómputo IDARC2D (Valles et al, 1996). Entre los resultados finales que proporciona el programa se incluye una evolución de la respuesta inelástica en el tiempo a través de un estudio de daño, tanto para elementos estructurales individuales como a un nivel global de la estructura. El criterio para evaluar el daño estructural en cada uno de los elementos que componen a la estructura se basa en el índice de daño de Park y Ang con algunas modificaciones al modelo original (Kunnath et al, 1992), y cuyo valor se expresa mediante la siguiente ecuación

$$DI = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} E_H \quad (1)$$

donde  $DI$  es el índice de daño del elemento estructural,  $\theta_m$  es la rotación máxima alcanzada durante la historia de cargas,  $\theta_u$  es la capacidad última de rotación de la sección,  $\theta_r$  es la rotación recuperable a la descarga,  $M_y$  es el momento de fluencia,  $E_H$  es la energía disipada en la sección y  $\beta$  es la constante del modelo que se interpreta como un parámetro que controla el deterioro de resistencia como función de la energía disipada, asignado como un valor de 0.1 para un deterioro nominal (Park et al, 1987). Asimismo, el programa recurre a expresiones adicionales para el cálculo del daño global,  $DI_{global}$ , que sufre la estructura (Valles et al, 1996). En la tabla 2, Park et al (1986) proporcionan información sobre la interpretación física del índice de daño global.

Tabla 2. Interpretación del índice de daño global (Park et al, 1986)

ÍNDICE DE DAÑO	GRADO DE DAÑO	ESTADO DE DAÑO	CONDICIÓN DE USO	APARIENCIA
0.00	Ninguno	Sin daño	Funcional	No hay deformaciones y sin agrietamientos
0.20-0.30	Ligero	Pocos daños		Agrietamientos moderados a severos
0.50-0.60	Menor	Daño reparable	Temporalmente funcional	Expulsión del recubrimiento
	Moderado Severo	Sin reparación		Pandeo del acero y exposición del núcleo confinado
> 1.00	Colapso	Colapso	No funcional	Pérdida de la capacidad a cortante y carga axial

Las siguientes condiciones se establecieron para el uso del programa IDARC2D

- a) Se realiza el análisis a un marco plano. El marco analizado es el exterior correspondiente al eje A de la figura 1.
- b) Una vez que se cuenta con las dimensiones y armados finales para los elementos estructurales, es necesario calcular el diagrama momento-curvatura para obtener su capacidad resistente; este diagrama puede ser calculado discretizando la sección transversal del elemento estructural en pequeñas fibras y fijando una curvatura, para después determinar la deformación en cada fibra considerando la compatibilidad de deformaciones. Teniendo como datos las curvas esfuerzo-deformación de los materiales se obtienen las fuerzas internas de la sección las cuales deberán cumplir el equilibrio de la misma; una vez conseguido ese equilibrio se calcula el momento correspondiente. El proceso se repite tantas veces como curvaturas se propongan hasta que la sección falla (*Rodríguez y Montoya, 1990*). Algunas hipótesis contempladas en el desarrollo del algoritmo se describe a continuación
  - Las secciones planas permanecen planas después de aplicado el momento.
  - La resistencia a tensión del concreto es ignorada.
  - Existe adherencia perfecta entre acero de refuerzo y concreto.
  - El valor de la carga axial es constante.
  - Se conoce la curva esfuerzo-deformación del concreto (*Scott et al, 1982*).
  - Se conoce la curva esfuerzo-deformación del acero (*Rodríguez y Botero, 1996*).A partir de esos diagramas se definen los puntos de capacidad y curvatura para los estados de agrietamiento, fluencia y último de cada elemento, los cuales se ingresan como datos para la ejecución del programa.
- c) Cuando un edificio está sometido a un movimiento sísmico algunos de sus elementos están sujetos a cambios importantes en la magnitud de la carga axial que se aplica sobre ellos, como por ejemplo las columnas externas. Cuando las columnas están sujetas a un incremento de carga axial de compresión es posible esperar que la resistencia a flexión de la sección transversal del elemento aumente, aunque de manera alterna la capacidad de deformación se ve afectada, conduciéndonos a fallas indeseables de tipo frágil. Ya que el programa no maneja la variación de carga axial por sismo a través de algún diagrama carga axial-momento y dado que el análisis que lleva a cabo el programa IDARC2D asigna, para cada diagrama momento-curvatura, un valor constante de carga axial, se define el cambio de capacidad a momento en función de la deformación como la condición más crítica de carga axial, resultando que la condición a compresión es la más importante en las columnas. Para las trabes se desprecia la condición de carga axial.
- d) El porcentaje de amortiguamiento viscoso considerado fue del 5 por ciento.



## MODELO HISTERÉTICO Y DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ

El modelo histerético incluido dentro de un programa de cómputo es parte fundamental para el desarrollo de cualquier análisis inelástico de una estructura. El programa IDARC2D incluye el modelo de Park de tres parámetros (*Park et al, 1987*).

Se definió la variación de la respuesta inelástica al cambio de la rigidez dentro de la estructura; para ello se propuso encontrar dicha respuesta suponiendo una degradación de rigidez nominal y severa. Estas dos condiciones son establecidas por el parámetro de degradación de rigidez (HC) definido en el algoritmo del programa IDARC2D (*Valles et al, 1996*).

La figura 3 muestra esquemáticamente la influencia del parámetro de degradación de rigidez (HC) sobre el comportamiento histerético. Para una condición de degradación nominal y severa, el valor de HC es igual a 2.0 y 0.5, respectivamente.



Fig 3. Influencia del parámetro de degradación de rigidez sobre el comportamiento histerético

## EVOLUCIÓN DEL DAÑO ESTRUCTURAL

El registro empleado para analizar el edificio es el del sismo del 19 de septiembre de 1985 en la estación SCT en la ciudad México. A partir de ese acelerograma, al que llamaremos acelerograma completo, se obtuvo la historia del daño global. En la figura 4 se aprecia que a partir de 20 segundos empieza a existir daño estructural para ambas condiciones de degradación de rigidez hasta alcanzar un límite máximo, poco antes de 65 segundos de haber comenzado el movimiento, manteniéndose constante por el resto del tiempo a pesar de haber aceleraciones del orden de un tercio de la máxima. Esto implica que la mayor parte del daño ocurre durante la etapa intensa, entre los 35 y los 65 segundos según la figura 4. La condición de degradación severa de rigidez presenta un índice de daño ligeramente mayor que la obtenida para una degradación nominal, 0.226 y 0.206, respectivamente.

Aceptando que la etapa intensa del registro es la que produce el daño en la estructura, procedimos a recortar dicho registro a tan solo 9.46 segundos (entre 55.22 y 64.68 segundos del acelerograma completo). Nuevamente el análisis inelástico es evaluado con el programa IDARC2D (figura 5). En este caso, al ser eliminados los datos de aceleración en los primeros 55.22 segundos, el crecimiento del índice de daño es a partir de ese instante, llegando, en tan solo unos cuantos ciclos, al mismo valor de daño

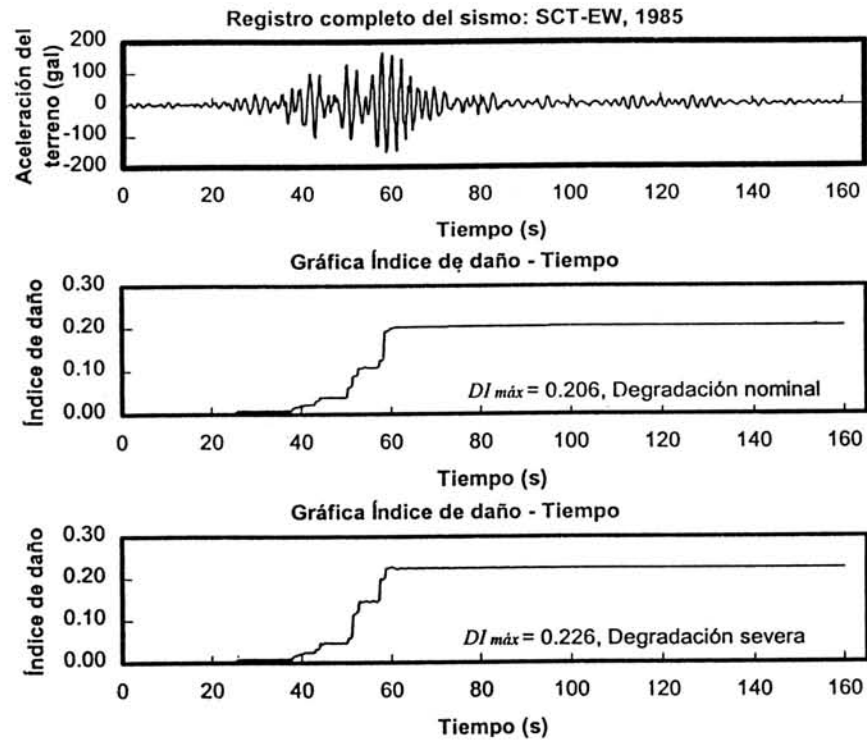


Fig 4. Evolución del daño global al someter el marco al acelerograma completo

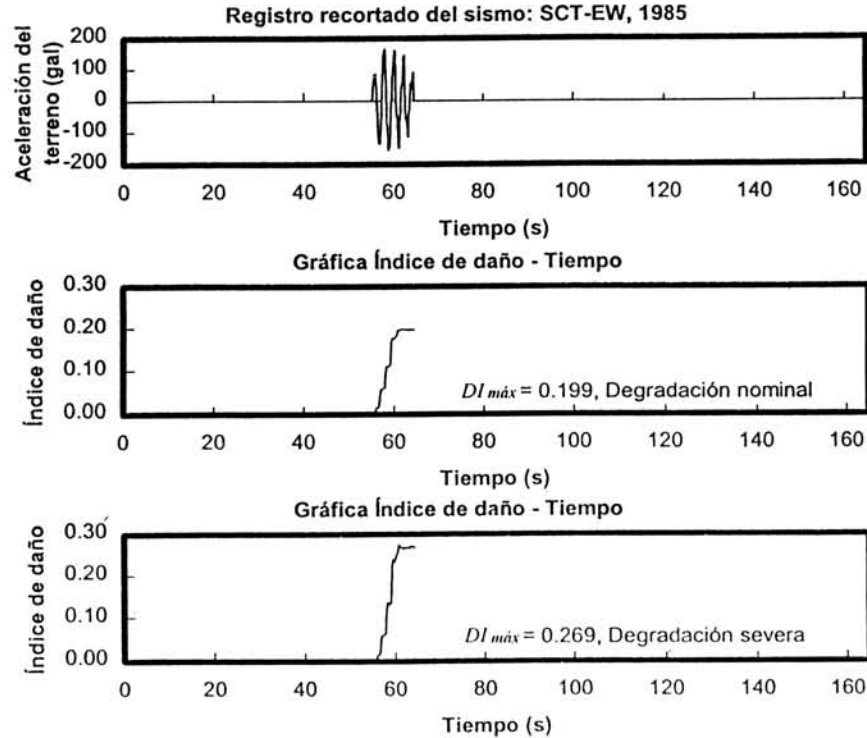


Fig 5. Evolución del daño global al someter el marco al acelerograma recortado



global que el acelerograma completo. Ello quiere decir que las aceleraciones de la etapa intensa del aelerograma (los 9.46 segundos mostrados en la figura 5) son suficientemente grandes para provocar el mismo daño global en la estructura que el daño provocado por el registro completo. La razón por la cual se obtienen los mismos valores de daño se puede deber a que éste depende sobre todo de la intensidad de la aceleración, que es la misma para ambos registros, y no tanto de una historia de aceleraciones que provoca el mismo agrietamiento y fluencia que el provocado por súbitas aceleraciones significativas.

De acuerdo con la figura 5, las diferencias entre ambos índices son de 3 y 19 por ciento con respecto a los valores calculados para el acelerograma completo y correspondientes a las condiciones de degradación de rigidez nominal y severa, respectivamente. El error calculado para la condición de degradación de rigidez nominal es pequeño, lo que indica una buena aproximación al daño máximo en la estructura; por otra parte, el error aumenta para la condición de degradación de rigidez severa, aunque en este caso presenta un valor más conservador del daño estructural resultando en una sobrestimación del mismo.

Con el criterio del acelerograma recortado y dada las comparaciones realizadas entre los valores máximos del índice de daño, resulta válido proponer un acelerograma simplificado con la misma duración y amplitud al recortado que simule el movimiento del terreno y obtenga una estimación del índice de daño máximo similar al movimiento real.

### Modelo del acelerograma sintético

Se propone una expresión matemática para la zona del lago del valle de México donde el movimiento es armónico y que intenta representar el efecto del acelerograma recortado. El planteamiento de esa expresión se realiza de una manera simple y se define de la siguiente forma (Guerrero, 1997)

$$A_s(t) = A_{\max} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{T_1}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi t}{T_2}\right) \quad \text{para } t \leq T_2 \quad (2)$$

donde  $A_s(t)$  es la aceleración del terreno en gal,  $A_{\max}$  es la aceleración máxima del terreno en gal dependiente de las características del sitio y el sismo en cuestión,  $T_1$  es el periodo dominante del terreno en segundos y  $T_2$  es la duración del movimiento en segundos.

El acelerograma sintético de la figura 6 está expresado en términos de una senoide que contiene el periodo dominante del suelo ( $T_1$ ) cuya amplitud es regulada por otra función del mismo tipo con otro periodo ( $T_2$ ) cuyo valor controla la duración del movimiento. La amplitud máxima del acelerograma sintético,  $A_{\max}$ , puede ser definido a partir de datos observados en registros acelerométricos o por medio de expresiones matemáticas derivadas de estudios sobre la estimación de movimientos fuertes del terreno originados por temblores mexicanos (Singh et al, 1987).

Se aplicó la ecuación 2 con los siguientes parámetros tomados del registro mostrado en la figura 4: el periodo dominante y la aceleración máxima del terreno calculados en 2 segundos y 168 gal, respectivamente. Los valores anteriores representan a  $T_1$  y  $A_{\max}$  en la expresión 2.

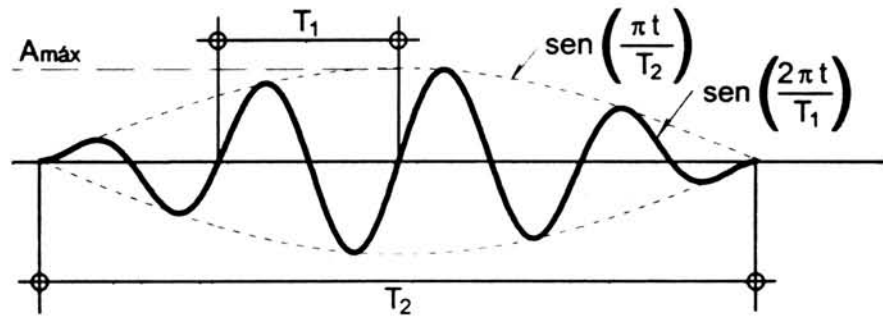


Fig 6. Modelo del acelerograma sintético

El valor de  $T_2$  está dado por una estimación de aquella duración en donde se hayan presentado las máximas demandas del movimiento, y dependerá en cierta forma de la serie de registros observados en el sitio de análisis. Basados en el acelerograma recortado analizado en este trabajo, se propone una duración de 8 segundos ( $T_2$  en la figura 6), que correspondería a 4 ciclos de movimiento.

Teniendo el valor de cada uno de los parámetros de la expresión 2, se procede a la generación del acelerograma sintético y una vez más es evaluado el comportamiento inelástico de la estructura mediante el programa IDARC2D. En la figura 7 se muestra el acelerograma sintético generado y la evolución en el tiempo del índice de daño global indicando sus valores máximos. Comparando estos últimos valores máximos del índice de daño con los obtenidos para el acelerograma completo, encontramos errores del orden de 14 % y 9 %, correspondientes a las condiciones de degradación de rigidez nominal y severa, respectivamente; como en el caso del acelerograma recortado, existe una subestimación del índice de daño máximo para la condición nominal de degradación de rigidez, así como una sobrestimación en el valor para la condición de degradación severa.

Con fines de observar la variación que representa el estimar la duración del acelerograma ( $T_2$  en la figura 6), la estructura es sometida a un segundo acelerograma sintético con un nuevo valor de la duración, propuesta en 10 segundos y equivalente a 5 ciclos del movimiento (un ciclo más que en el primer acelerograma sintético analizado). Los resultados de la figura 8 muestran la evolución del daño global para las dos condiciones de degradación de rigidez ya mencionadas, y cuyo comportamiento es semejante a la que se presenta en los análisis inelásticos realizados con los acelerogramas recortado y sintético, este último con duración de 8 segundos. De acuerdo con los valores máximos del índice de daño obtenidos a partir del acelerograma sintético con duración de 10 segundos, los errores calculados con respecto al acelerograma completo son del orden del 6 % y 16 % para las condiciones de degradación de rigidez nominal y severa respectivamente; para la primera condición nuevamente se presenta una subestimación del índice de daño máximo, mientras que la segunda lo sobrestima.

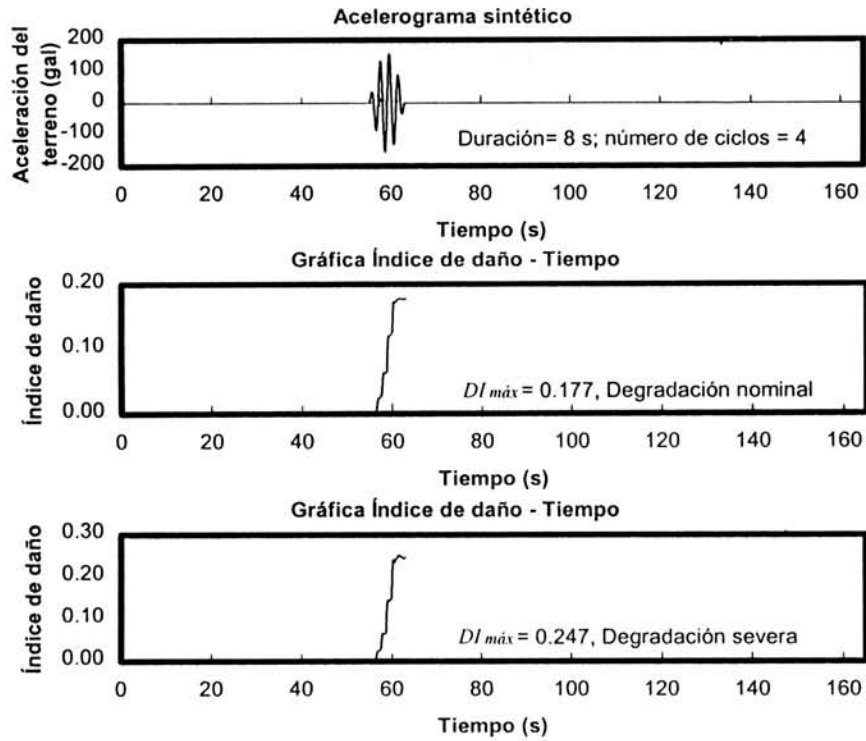


Fig 7. Evolución del daño global al someter el marco al acelerograma sintético

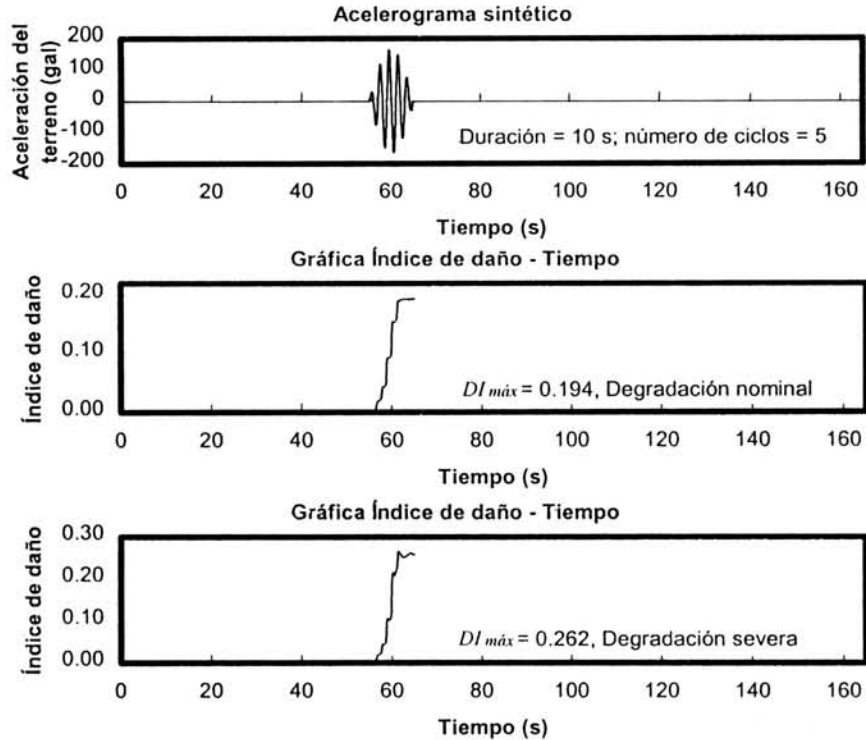


Fig 8. Evolución del daño global al someter el marco al acelerograma sintético

De manera general, la figura 9 presenta los estados de daño finales en el marco exterior en términos de agrietamiento y formación de articulaciones plásticas (fluencia) al someterlo a los acelerogramas completo, recortado y sintéticos, correspondientes a una condición de degradación de rigidez nominal. Se aprecian pocas diferencias por lo que es válido señalar que el estado de daño final puede ser estimado a partir del modelo planteado y considerando duraciones en donde se incluyan las máximas amplitudes de aceleración.

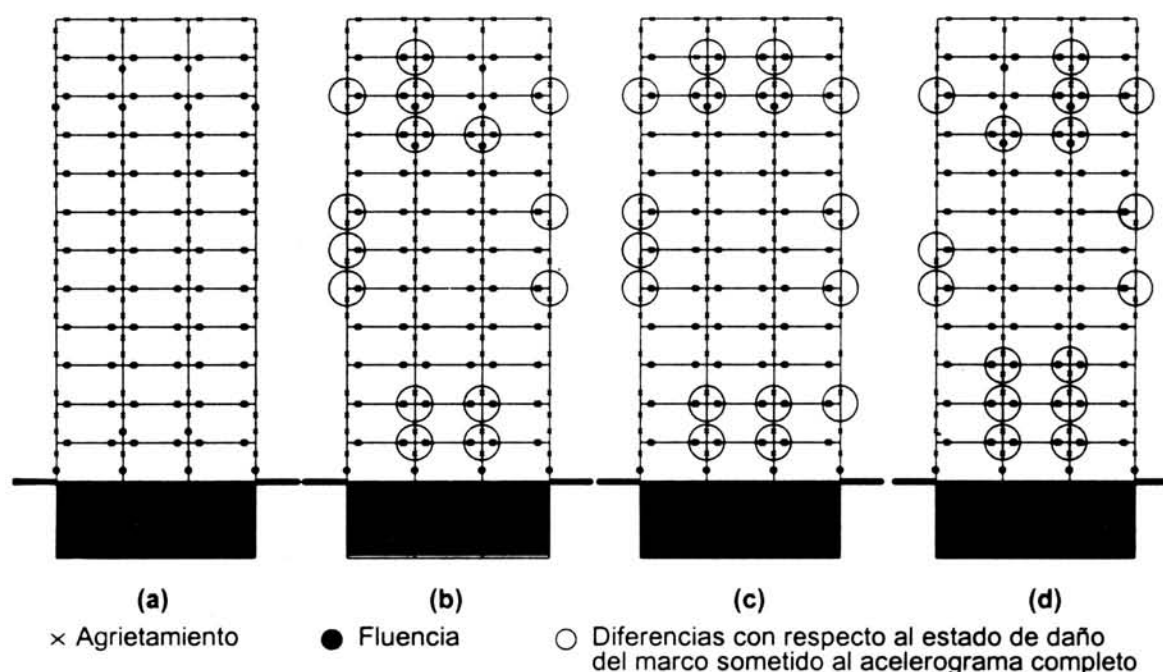


Fig 9. Estado final del daño en el marco en términos de agrietamiento (x) y formación de articulaciones plásticas (•)

- a) Acelerograma completo SC, 1985
- b) Acelerograma recortado SC, 1985
- c) Acelerograma sintético: 8 segundos, 4 ciclos
- d) Acelerograma sintético: 10 segundos, 5 ciclos

Para ilustrar de otra manera la eficiencia del acelerograma sintético, en las figuras 10 y 11 se muestran gráficas comparativas de las demandas de ductilidad y distorsiones de entrepiso para una condición de degradación nominal de rigidez. Los resultados indican una buena aproximación entre el análisis inelástico realizado en la estructura a partir de los acelerogramas completo y sintéticos, principalmente en los primeros entrepisos.

Como se observará en las figuras 10 y 11, los mejores resultados se obtienen comparando las gráficas que se derivan del análisis hecho con el acelerograma sintético que posee una duración de 10 segundos y 5 ciclos, reflejando con más confiabilidad los

efectos del movimiento real. El establecer duraciones muy pequeñas dentro del acelerograma sintético genera incrementos abruptos en la magnitud de las aceleraciones del terreno al inicio y final del mismo, lo cual puede ocasionar que el grado de daño en una estructura, estimado a partir de ese acelerograma, no sea representativo del daño real. Por lo anterior, la duración propuesta para el acelerograma sintético debe ser tal que el crecimiento en las amplitudes del mismo debe ser gradual desde el principio hasta llegar a alcanzar la aceleración máxima del terreno que se haya establecido previamente, y de la misma forma para el decremento de las amplitudes después de las amplitudes máximas.

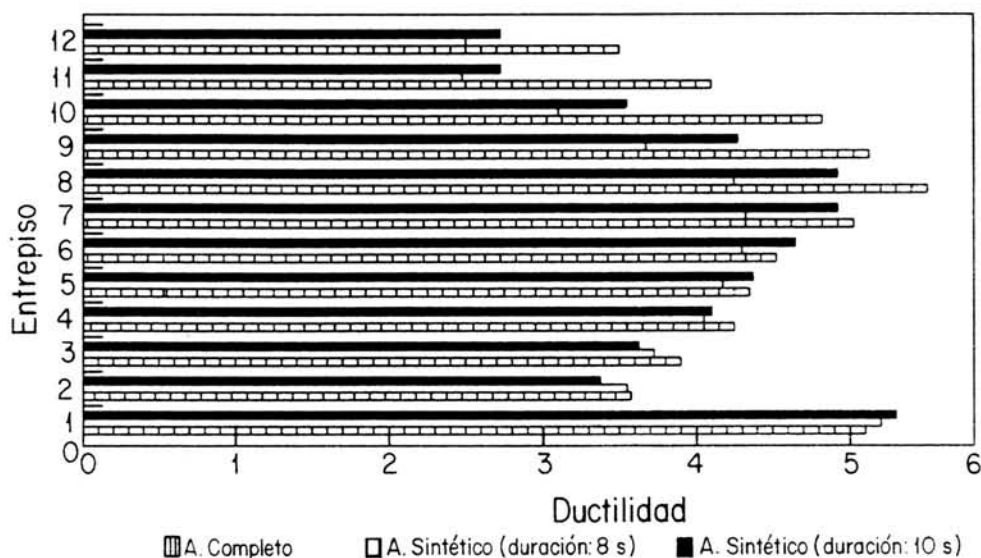


Fig 10. Demandas de ductilidad para una condición nominal de degradación de rigidez

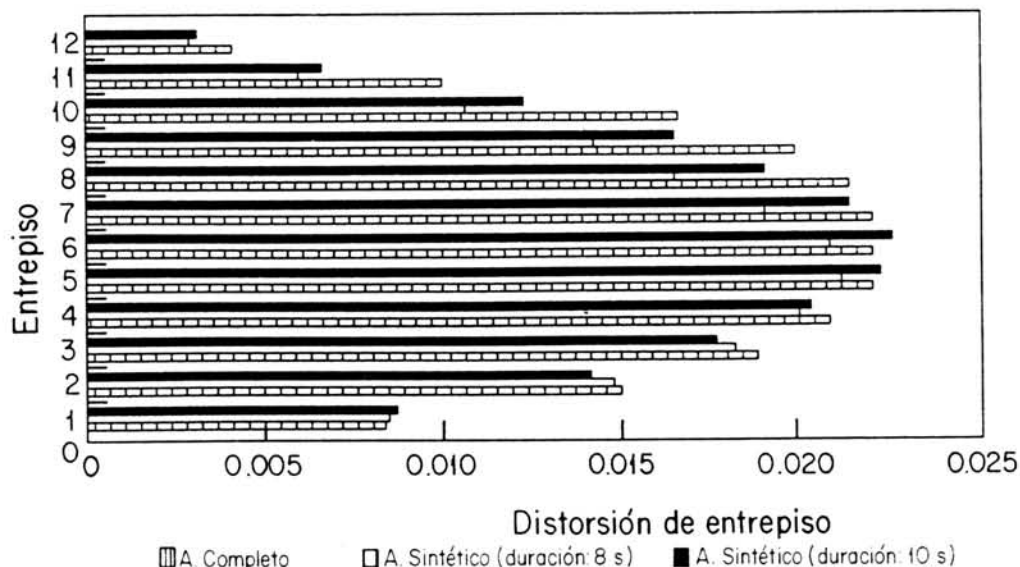


Fig 11. Distorsiones de entrepiso para una condición nominal de degradación de rigidez

Por otra parte, el acelerograma sintético puede ser también de gran apoyo para la estimación de espectros de respuesta elásticos como se muestra en la figura 12. Los espectros fueron calculados a partir de los cuatro acelerogramas empleados en los análisis inelásticos: el completo, recortado y los sintéticos.

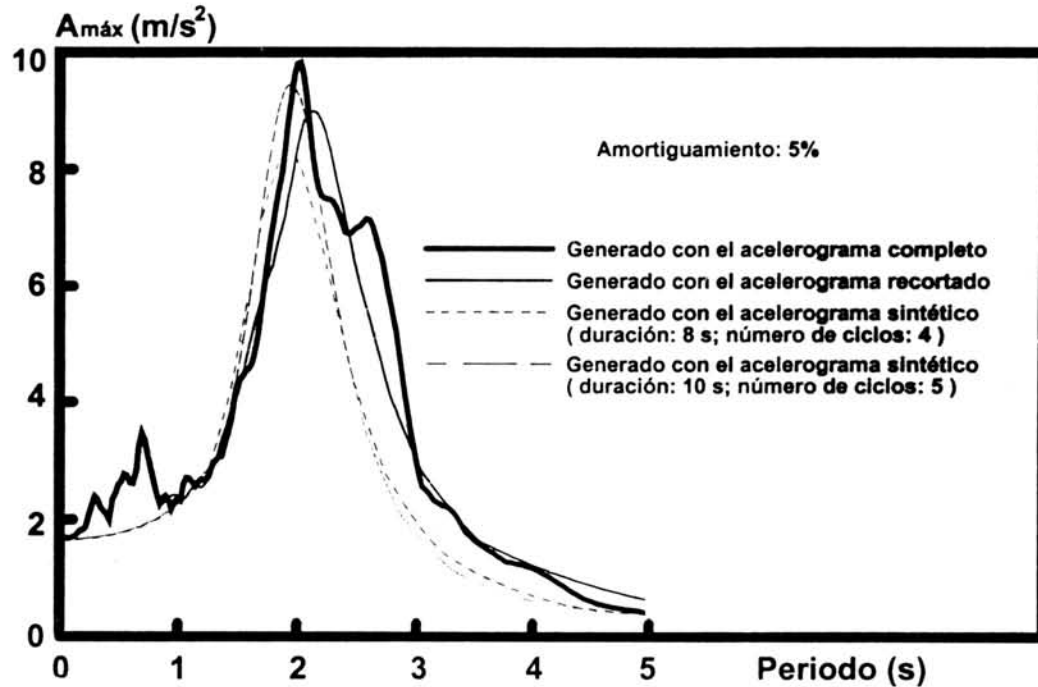


Fig 12. Espectros de respuesta en la estación SC para el sismo del 19 de septiembre de 1985. Componente este-oeste

### CONCLUSIONES

Se analizó el comportamiento inelástico de un edificio de concreto armado. Se obtuvo la historia del daño estructural global en el tiempo bajo dos condiciones de degradación de rigidez: nominal y severa. El análisis se realizó suponiendo a la estructura sobre terreno blando de la ciudad de México y empleando el acelerograma registrado en la estación SC para el sismo del 19 de septiembre de 1985. El acelerograma se manejó en dos formas: completo y recortado. Se logró representar en forma aproximada el daño global final en la estructura mediante unos cuantos pulsos del movimiento real, obteniendo valores máximos del índice de daño con variaciones razonablemente aceptables. El hecho de que un acelerograma tan recortado reproduzca los mismos daños que el completo es un resultado desconcertante. Por un lado puede ser que en realidad esos pulsos centrales son los responsables de la mayor parte del daño; pero por otro, puede ser que los métodos de análisis, aún los no lineales con degradación como los empleados en este trabajo, no sean suficientemente completos para modelar estructuras reales.



Se propuso un modelo matemático simplificado (acelerograma sintético) que representa el daño global final causado por el acelerograma completo y la variación del índice de daño en el tiempo al igual que el acelerograma recortado. Definiendo correctamente el valor de los parámetros que intervienen en esa expresión (aceleración máxima del terreno, periodo dominante del sitio y duración del acelerograma), el acelerograma sintético es una herramienta de simple manejo.

Manteniendo constante la aceleración máxima del terreno y el periodo dominante del sitio dentro del modelo, se evaluó la estructura con dos acelerogramas sintéticos: el primero definido con 8 segundos de duración (4 ciclos de movimiento) y el segundo de 10 segundos (5 ciclos de movimiento); este criterio se planteó para mostrar la variación que se podría presentar al establecer la duración del acelerograma de forma distinta. Los resultados del análisis no lineal obtenidos a partir de los acelerogramas sintéticos muestran diferencias mínimas al compararse con los valores conseguidos al emplear los acelerogramas completo y recortado. A pesar de la similitud entre los resultados finales del daño global, el modelo del acelerograma sintético propuesto no resulta suficiente para representar en su totalidad el proceso de degradación estructural de un edificio. Lo anterior radica en que el acelerograma sintético es un buen estimador del daño global máximo que puede existir en un edificio ante un movimiento sísmico, relacionándose con la etapa de máximas demandas del movimiento; sin embargo, el daño global estructural comienza mucho antes de presentarse las aceleraciones máximas del terreno. Por lo tanto, se requiere un enfoque adicional para estimar en forma analítica una historia de daño global estructural que llegue a representar la historia de daño global real durante el movimiento fuerte del terreno.

Las diferencias que se presentan entre los valores del índice de daño máximo, para las distintas condiciones de degradación de rigidez, pueden estar asociados con algunos de los siguientes factores:

- a) El deterioro gradual antes de presentarse las amplitudes máximas del registro cuando la estructura fue evaluada con el acelerograma completo. Tal comportamiento no se presenta en los acelerogramas recortado y sintéticos.
- b) El contenido de frecuencias de la señal original, simplificándose con el periodo dominante del suelo para aplicarse al modelo matemático armónico propuesto.
- c) La duración estimada de los acelerogramas recortado y sintéticos donde se incluyen las máximas demandas del movimiento.

Como se observó en los valores obtenidos del índice de daño global máximo para las dos condiciones de degradación de rigidez considerando un mismo acelerograma analizado, los resultados no difieren demasiado uno de otro. Esto encuentra explicación por el estudio de un caso muy particular de sistema estructural y/o del acelerograma seleccionado. Esto indica que para tener un conocimiento más amplio acerca de la influencia del parámetro de degradación de rigidez es necesario abordar un estudio más exhaustivo en donde se consideren más modelos estructurales así como una serie de eventos sísmicos.

A pesar de la magnitud de los errores calculados y con fines de estimar el daño global en una estructura, los resultados son razonablemente satisfactorios. Por lo anterior,

una de las ventajas de emplear el acelerograma sintético es que resulta ser una buena alternativa para evaluar el comportamiento no lineal de una estructura y es capaz de representar información obtenida con el acelerograma real. Por otra parte, resulta en cierta forma práctico el definir el acelerograma sintético debido a los parámetros que se emplean en él como son: aceleración máxima del terreno, el periodo dominante del sitio y la duración del movimiento; asimismo, el lapso definido del acelerograma sintético se refleja en la reducción del número de cálculos computacionales comparados con los que se realizarían con cualquier acelerograma real.

Dentro de las desventajas que se le podrían atribuir al acelerograma sintético sería que al evaluar el comportamiento inelástico de una edificación no considera el posible daño estructural antes y después de las máximas amplitudes del movimiento, lo cual se traduce en una simplificación de la estimación del daño estructural acumulado; comentario que tiene relación con la definición de la magnitud de la duración del movimiento para tomar en cuenta la etapa de máximas demandas. Por otra parte, el definir al acelerograma sintético como un movimiento armónico con periodo igual al periodo dominante del sitio descarta los posibles efectos que generaría al emplear un acelerograma real cuyo contenido de frecuencias es diverso; este aspecto se demuestra, por ejemplo, con la presencia de un aumento en la magnitud de la aceleración máxima del espectro de respuesta de la figura 12 empleando el acelerograma real y comparándolo con los acelerogramas sintéticos para un periodo cercano a 0.8 segundos.

Cabe destacar que los análisis realizados en este trabajo permitieron derivar conclusiones preliminares sobre la estimación del daño estructural al presentarse un temblor. Sin embargo, resulta necesario extender este estudio tomando en cuenta otros sitios dentro del valle de México así como otros edificios para llegar a propuestas más generales.

### AGRADECIMIENTO

Este proyecto fue parcialmente patrocinado por la Secretaría General de Obras del DF. Los autores agradecen al Ing. Óscar Villagrán Guevara la información proporcionada para desarrollar parte de este trabajo.

### REFERENCIAS

- Guerrero, R.*, "Duración del movimiento durante sismos: implicaciones en la degradación estructural", Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, México, D.F., 1997.
- Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M. y Lobo, R.F.*, IDARC2D Version 3: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures, *Report No.NCEER-92-0022*, Nat. Center for Earth. Eng. Res., State University of New York at Buffalo, 1992.
- Park, T.J., Ang, H.S. y Wen, Y.K.*, "Damage-limiting aseismic design of buildings", *Earthquake Spectra*, May, 1986.

- Park, T.J., Reinhorn, A.M. y Kunnath, S.K., IDARC2D : Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall structures, *Technical Report NCEER-87-0008*, Nat. Center for Earth. Eng. Res., State University of New York at Buffalo, 1987.
- Reinoso, E., Guerrero del Ángel, R. y Ordaz, M. Duración del movimiento durante sismos: implicaciones en la degradación estructural, *X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Mérida Yucatán, 1, 357-366, 1996.
- Rodríguez, M. y Montoya, C., "Análisis de la resistencia y ductilidad de marcos de concreto reforzado", *Revista Ingeniería Sísmica*, No.39, México, D.F., 1990.
- Rodríguez, M. y Botero Palacio, J.C., "Aspectos de comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado considerando las propiedades mecánicas de aceros producidos en México", *Instituto de Ingeniería*, No.575, México, D.F., 1996.
- Scott, B.D., Park, R. y Priestley, M.J.N., "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates", *ACI Journal*, 13-27, ene-feb, 1982.
- Singh, S.K., Mena, E., Castro, R. y Carmona, C., "Empirical prediction of ground motion in Mexico city from coastal earthquake", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77, 1862-1867, 1987.
- Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C. y Madan, A., IDARC2D Version 4: A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of Building, Technical Report NCEER-96-0010, State University of New York at Buffalo, 1996.
- Wilson, E.L. y Habibullah, A., "SAP90 - A series of computer programs for the static and dynamic finite element analysis of structures. User's manual", *Computers and Structures, Inc.*, Berkeley, California, 1988.
- Wilson, E.L. y Habibullah, A., "ETABS, A User's manual", *Computers and Structures, Inc.*, Berkeley, California, 1989.