

EFECTO DE LOS TERREMOTOS EN LAS ESTRUCTURAS

*Eugenio OÑATE IBÁÑEZ DE NAVARRA
Juan MIQUEL CANET*

Introducción

El prestigioso ingeniero mejicano Esteva ha resumido perfectamente en una frase las ideas fundamentales que hay que tener en cuenta en el diseño de estructuras frente a terremotos. Dice Esteva que "El arte del diseño sísmico de estructuras implica conseguir tipologías estructurales que se caractericen por una óptima combinación de propiedades, tales como resistencia, rigidez y capacidades de absorber energía y de deformarse dúctilmente. Estas propiedades les permitirán responder a terremotos frecuentes y moderados sin sufrir daños significativos y a terremotos excepcionales y muy severos sin poner en peligro su propia estabilidad, su contenido y la seguridad de sus ocupantes. El logro de dichos objetivos implica mucho más que la aplicación de requisitos reglamentarios; exige la comprensión de los factores básicos que determinan la respuesta sísmica de las estructuras, así como el ingenio necesario para diseñar estructuras que tengan las características adecuadas (ver referencia 1)".

Vemos pues que, según Esteva, un buen diseño sísmico que minimice los efectos del terremoto sobre una estructura, sólo es posible combinando unos buenos conocimientos de ingeniería sísmica estructural, con un alto grado de intuición y experiencia en diseño de estructuras. En esta comunicación vamos a pasar revista brevemente a estos dos conceptos, comenzando con una somera exposición de las ideas fundamentales sobre cálculo sísmico de estructuras. A continuación veremos como factores tales como el tipo de terreno y el tipo de material de la estructura afectan en gran manera a la respuesta sísmica de la misma. Hablaremos de cuáles son los efectos físicos reales que producen los terremotos en estructuras de edificación, para terminar con unas ideas generales sobre diseño sísmico de estructuras y de reparaciones de estructuras afectadas por terremotos. El tema, como puede intuirse, es muy extenso, y recalcamos que aquí sólo pretendemos presentar una visión de conjunto con las ideas más importantes sobre el mismo. Asimismo, hemos intentado huir de los desarrollos matemáticos y presentar los conceptos exclusivamente desde el punto de vista físico, utilizando el mínimo número de expresiones y fórmulas matemáticas posible.

Conceptos básicos del análisis sísmico de estructuras

En la *fig. 1* se puede ver un esquema muy sencillo que muestra el proceso de actuación de un terremoto sobre una serie de estructuras. Las ondas sísmicas que se producen por movimientos de capas rocosas a una determinada distancia de la superficie se transmiten hacia la misma a través del terreno intermedio. Una vez en la superficie, dichas ondas producen vibraciones en la base de las estructuras que son la causa de los esfuerzos internos que provocan, en su caso, la rotura de las mismas. Las ondas sísmicas transforman sus propiedades al transmitirse a través del terreno. De hecho, se produce generalmente un fenómeno de amplificación de las ondas debido a dicha transmisión, del que hablaremos más tarde.

Para estudiar el efecto de un seísmo sobre una estructura particular es imprescindible hacer uso de lo que comunmente se denomina un «modelo de cálculo». Dicho modelo no es más que una idealización de la estructura y de su entorno que permita conocer el comportamiento del modelo bajo los efectos de las cargas sísmicas, utilizando métodos de cálculo conocidos. En la *fig. 2a* se presenta la idealización de una estructura y del terreno sobre el que apoya, mediante un modelo de elementos finitos. Vemos en la figura que tanto la estructura como el terreno quedan divididos en regiones, o elementos. A partir del estudio de cada uno de dichos elementos, utilizando las ecuaciones de la elasticidad y procediendo a ensamblar las contribuciones de cada elemento, se puede obtener la expresión del equilibrio del conjunto en forma de un sistema algebraico de ecuaciones resoluble por ordenador. Tener en cuenta el efecto del terreno en el modelo de cálculo puede ser costoso y, de hecho, en la práctica se suelen utilizar modelos más simplificados, en los que simplemente se modeliza la estructura bajo la acción del terremoto incidiendo sobre su propia base. Dichos modelos, tal como se muestra en la *fig. 2b-2d* pueden ser más o menos complejos a base de elementos finitos (*fig. 2b*), barras (*fig. 2c*) o simplemente modelos de masas en un oscilador múltiple. Asimismo, en estos modelos simplificados, el efecto del terreno puede, no obstante, tenerse en cuenta por medio de condiciones de contorno especiales (tipo resorte) en los puntos de contacto de la estructura con su base (ver *figs. 2b y 2c*).

En estructuras de edificación son muy corrientes los modelos de osciladores de masas. En efecto, si se supone que los forjados de la estructura son mucho más rígidos que los pilares de la misma, es bastante aproximado asimilar la estructura a un oscilador con un número de masas igual al de forjados y con una rigidez de cada varilla del oscilador igual a la suma de las rigideces de los pilares de cada planta. Aparece aquí el concepto de «grados de libertad» de la estructura, que podemos definir como el número de movimientos de puntos de la estructura que hay que conocer para definir el movimiento de toda la estructura. En las estructuras de edificación es usual admitir que a efectos de diseño sísmico se consideran únicamente los movimientos de traslación de los nudos. Esto equivale, en el modelo de cálculo, a que el número de grados de libertad de cada modelo de osciladores de masas es igual al número de masas del mismo. En la *fig. 3a* se representa un modelo bidimensional de los grados de libertad y en la *fig. 3b* el mismo modelo, considerando asimismo el efecto de torsión del forjado, lo que da lugar a un modelo tridimensional de diez grados de libertad.

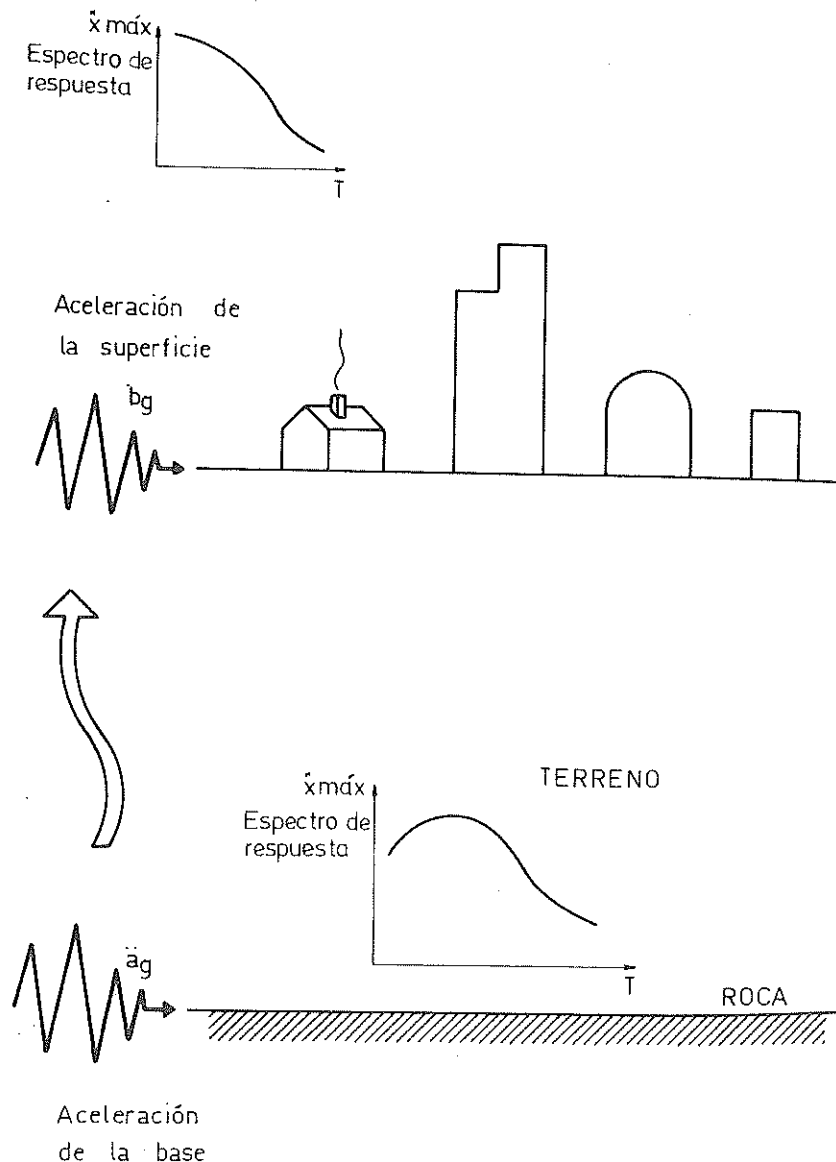
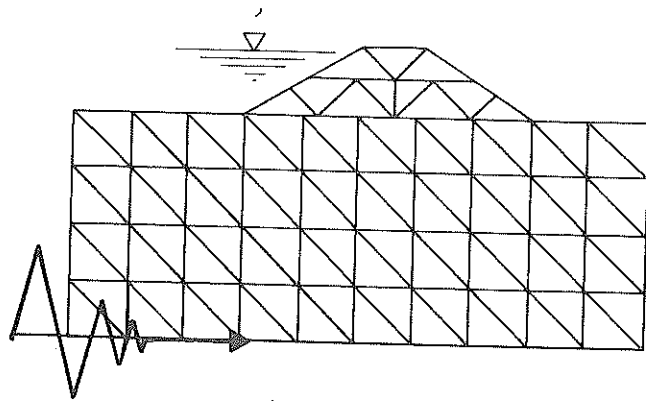
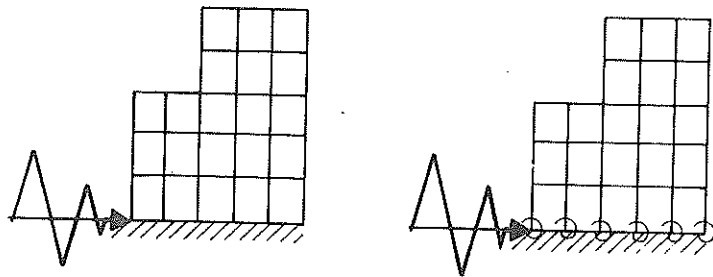


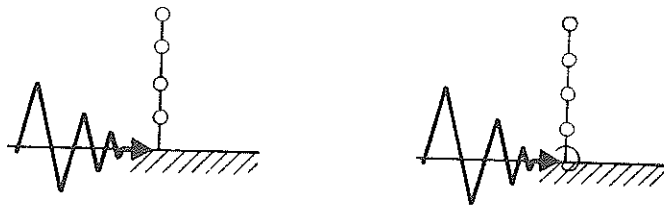
Fig. 1.— Esquema de la actuación de un terremoto sobre una serie de estructuras.



2a) Modelo de elementos finitos



2b) Modelos de barras



2c) Modelos de osciladores

Figura 2.- Modelos de cálculo

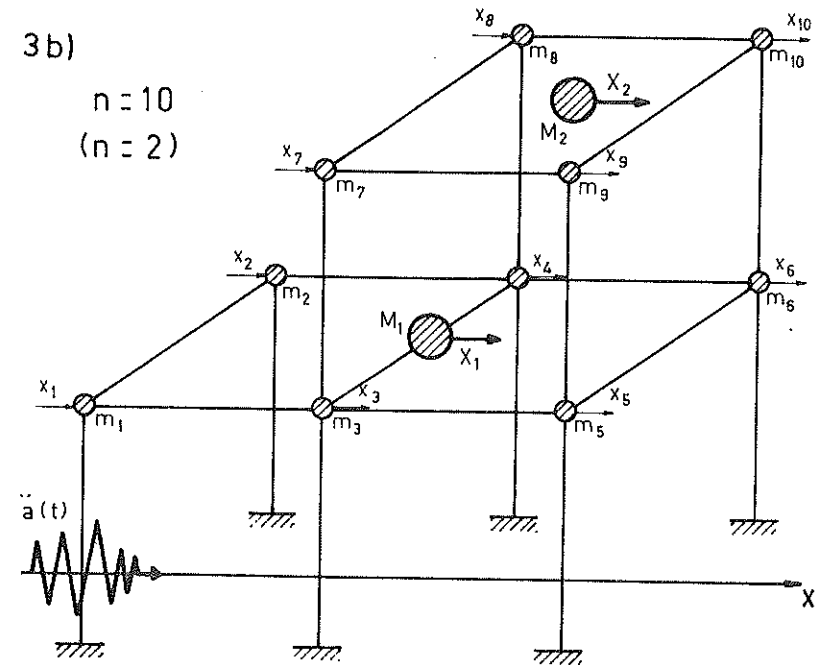
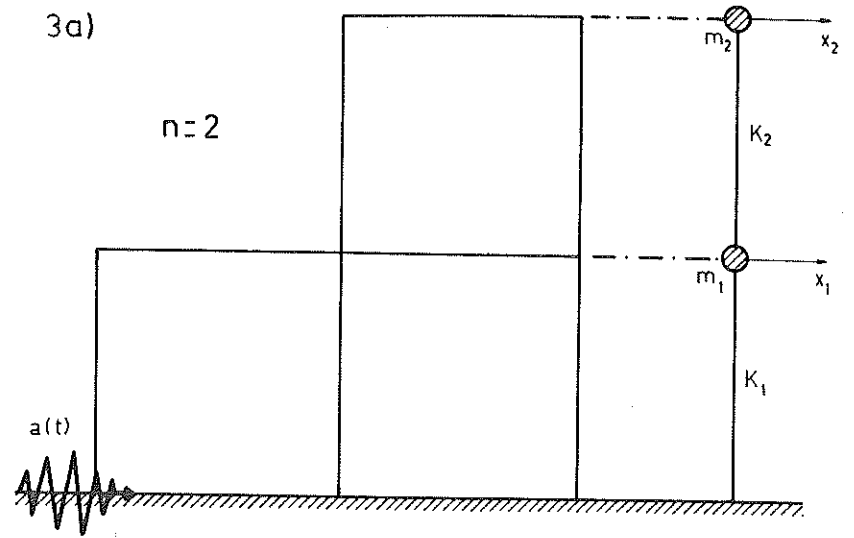


Figura 3.- Concepto de grado de libertad de una estructura.

Para tener una idea muy aproximada del cómo y porqué de los efectos de los terremotos sobre las estructuras, basta con estudiar con detalle una estructura sencilla de una sólo planta (como la casa que se ha representado esquemáticamente en la *fig. 4a*). Vamos a analizar el comportamiento de dicha estructura bajo un terremoto que actúa en una determinada dirección, mediante un sencillo modelo de cálculo de un sólo grado de libertad, compuesto de un oscilador simple de masa, m , igual a la masa del forjado y de rigidez, K , igual a la suma de las rigideces de los dos pilares de la estructura (ver *fig. 4b*). A partir de dicho estudio podremos sacar conclusiones generales de cómo afecta el terremoto a los elementos resistentes (vigas, pilares, forjado, muros de carga, etc) y no resistentes (tabiques, puertas, ventanas, etc.) de la estructura, que son fácilmente extrapolables al caso de estructuras más complejas.

Antes de seguir adelante es preciso introducir unas pequeñas nociones de equilibrio dinámico de un oscilador en movimiento. En la *fig. 5* se ha representado un esquema del movimiento del oscilador simple bajo la acción de un movimiento de aceleración en la base. El oscilador sufre dos tipos de movimientos, uno de traslación pura que no produce vibración de la masa y otro de oscilación de la masa con respecto a su base (ver *fig. 5*). Se supone, asimismo, que interviene un efecto físico que tiende a reducir la amplitud de las oscilaciones con el tiempo que se denomina «amortiguamiento» del oscilador, que se representa generalmente con la letra c . Estudiando el equilibrio de la masa oscilante se llega a la rápida conclusión de que las dos únicas fuerzas que actúan sobre ella son la fuerza elástica y la debida al amortiguamiento. Por la conocida Ley de Newton, el desequilibrio de fuerzas es igual a la masa por la aceleración de la misma y, por consiguiente, se puede escribir

$$F_e + F = -m\ddot{x}(t). \quad (1)$$

El signo menos aparece porque las fuerzas internas, de hecho, se oponen al movimiento. La fuerza elástica, como en el caso de un muelle, es igual a la constante de rigidez por el desplazamiento de la masa con respecto a su base, y la de amortiguamiento se toma igual a la constante c por la velocidad de la masa con respecto a la base. Así, de estas expresiones y de la *fig. 5* se deduce la ecuación

$$K x(t) + c \dot{x}(t) = -m (\ddot{x}(t) + \ddot{a}(t)), \quad (2)$$

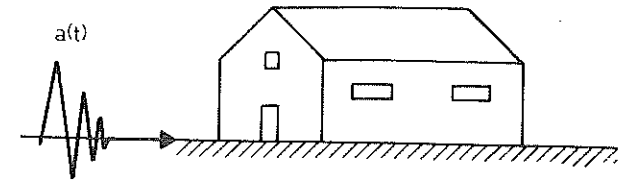
ó bien

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + K x(t) = -m \ddot{a}(t), \quad (3)$$

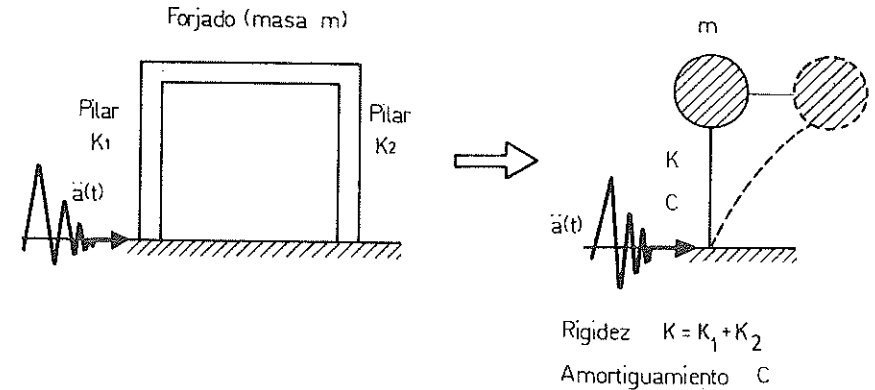
que es la ecuación diferencial de equilibrio sísmico del oscilador simple con amortiguamiento.

No vamos a entrar aquí en detalles de la solución de dicha ecuación diferencial, por otra parte perfectamente conocida y estudiada (2) – (6), sino más bien a tratar de extraer algunas conclusiones de tipo práctico aplicables dentro del contexto de este capítulo.

Una magnitud muy utilizada en cálculo sísmico de estructuras es la denominada «frecuencia natural» de la estructura. Para el sencillo modelo oscilatorio de

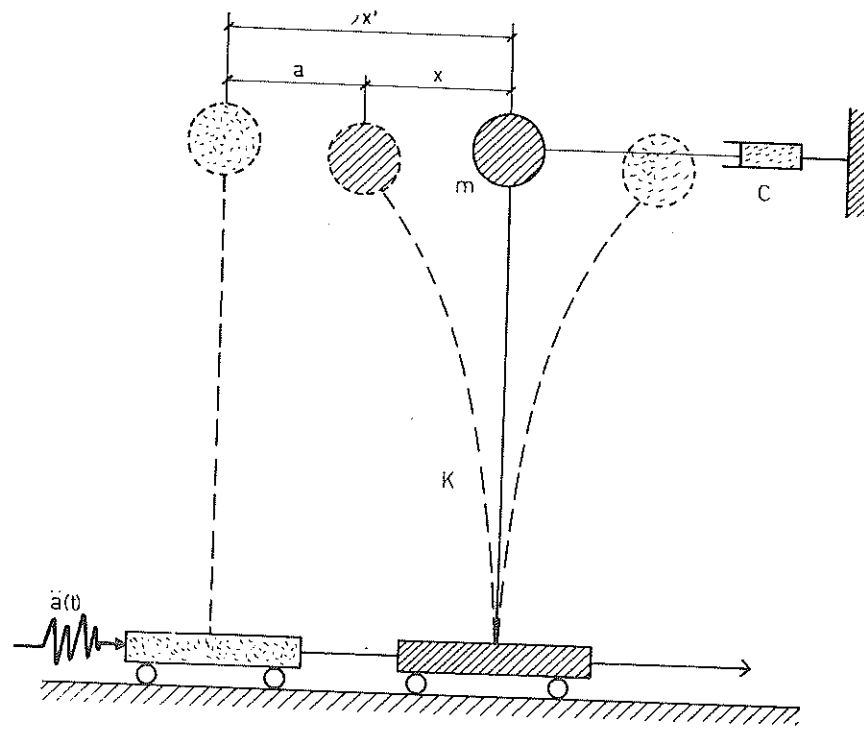


4a) Casa de una planta bajo la acción de un terremoto.

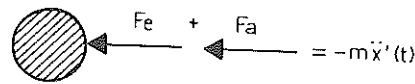


4b) Modelo de oscilador de 1 grado de libertad para la casa de la *fig. 4a*.

Fig. 4.- Modelo de cálculo sísmico para un edificio de una sola planta.



Ley de Newton



$$F_e = \text{Fuerza elástica} = Kx$$

$$F_a = \text{Fuerza amortiguamiento} = Cx$$

$$\ddot{x}' = \ddot{x} + \ddot{a}$$

$$m\ddot{x} + Cx + Kx = -m\ddot{a}$$

Figura 5.-

la estructura de la fig. 4a, cuya ecuación de movimiento es (3) se define la frecuencia natural, ω , como la raíz cuadrada del cociente entre la rigidez y la masa, así:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4)$$

y el período, T, como:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (5)$$

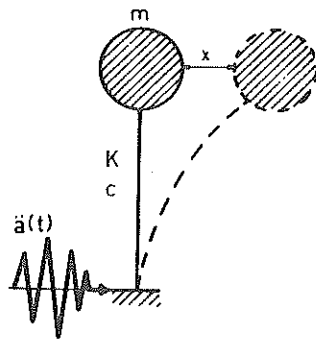
De las ecuaciones (4) y (5) deducimos que, cuanto más rígida sea la estructura (mayor rigidez, K), o más ligera sea (menor masa, m), mayor será la frecuencia natural y menor será el período. De igual forma, vemos que estructuras más flexibles tienen frecuencias naturales menores que las rígidas, etc. Estas sencillas conclusiones, extraídas de la observación del simple cociente de las ecuaciones (4) y (5), nos pueden ayudar a comprender fenómenos más complejos de la respuesta de las estructuras frente a terremotos. Imaginemos por un instante que la base de la estructura de la fig. 4a se mueve con una aceleración sinusoidal y que este movimiento es debido a un terremoto (ver fig. 6). La ecuación del movimiento es idéntica a (3), simplemente sustituyendo ahora el valor genérico de $\ddot{a}(t)$ por el de $b \sin \omega t$, donde b es la amplitud de la onda sinusoidal y ω la frecuencia de su oscilación. Sin entrar de nuevo en detalles, se demuestra fácilmente, integrando dicha ecuación, que el valor máximo del desplazamiento de la masa del oscilador, sometido a dicho movimiento, es (prescindiendo del efecto del amortiguamiento).

$$X_{\text{máx}} = D \frac{mb}{K} \quad (6)$$

donde $D = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2}}$ recibe el nombre de factor de amplificación.

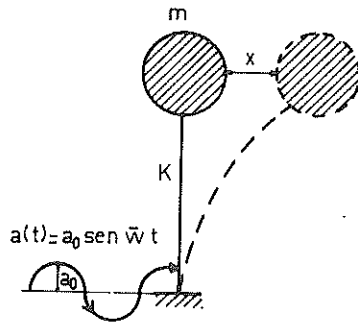
En la fig. 6 se ha representado el valor D en función del cociente entre la frecuencia natural de la estructura y la de la aceleración de movimiento de la base de la misma, $\frac{\omega}{\omega_n}$. Puede observarse que el valor de D tomaría teóricamente un valor infinito para $\omega = \omega_n$. En la práctica, dicho valor infinito se reduce a uno finito, pero grande, debido al efecto del amortiguamiento (líneas de $C \neq 0$ en la fig. 6). Dicha situación, en la que la frecuencia natural y la de la aceleración de la base coinciden, recibe el nombre de «resonancia».

Vemos, pues, que se puede extraer de lo anterior una conclusión evidente para uso práctico: si las aceleraciones que producen los terremotos en las bases de las estructuras fuesen de distribución sinusoidal, el efecto del terremoto sobre la estructura sería máximo cuando se produjera el fenómeno de resonancia. Esto nos permitiría dimensionar adecuadamente la rigidez y la masa de la estructura



Ecuación movimiento

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Kx = -m\ddot{a}$$



Desplazamiento máximo sin amortiguamiento

$$X_{\text{máx.}} = D \frac{m a_0}{K}$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{\bar{w}}{\omega})^2}}$$

$$\omega = \text{Frecuencia natural del oscilador} = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

$$\bar{w} = \text{Frecuencia de la excitación senoidal}$$

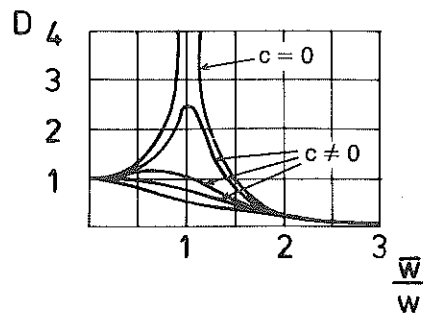


Figura 6.-

para que dicho fenómeno no se produjera. En la práctica, sin embargo, ocurre que la aceleración del terremoto no es exactamente sinusoidal. Por otra parte, las estructuras suelen ser más complejas que la sencilla de la fig. 4a y suelen asimilarse a osciladores de varios grados de libertad. (fig. 3). Pese a todo, el proceso de cálculo es análogo y la aceleración de la base de la estructura puede ponerse como suma de aceleraciones sinusoidales, y el movimiento de la estructura como suma de osciladores de un solo grado de libertad. Así, se sigue cumpliendo que la situación más desfavorable para la estructura es aquella en que las frecuencias de las aceleraciones sinusoidales de la base son coincidentes con la de los osciladores simples con que se analiza la estructura. En realidad, se demuestra que basta que coincidan las frecuencias más bajas para que se produzca una «pseudo-resonancia». Por tanto, el efecto es muy análogo al de la sencilla estructura de la fig. 4a y la conclusión generalizable de tipo práctico es que «una estructura será más segura frente a un terremoto concreto si su frecuencia natural (más pequeña) es lo más diferente posible de la frecuencia (más pequeña) del movimiento sísmico». Hemos tratado de resumir con palabras un fenómeno esencialmente de tipo matemático y razonablemente complejo.

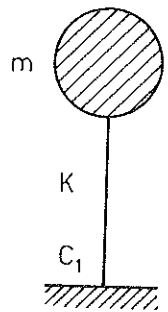
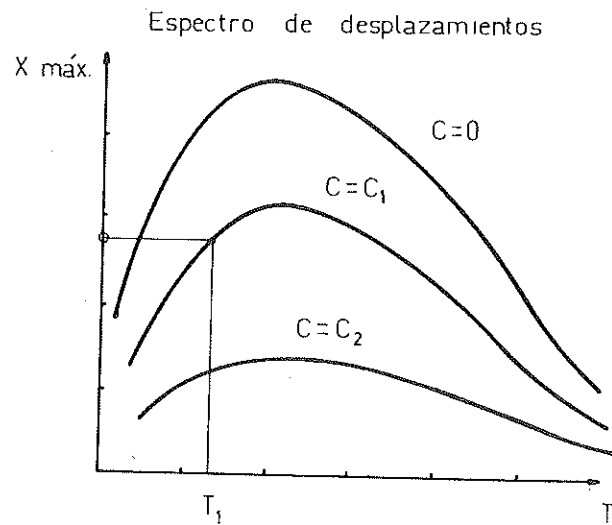
Volviendo a la sencilla ecuación diferencial de equilibrio dinámico del oscilador simple, se pueden extraer de la misma otras conclusiones generales de gran interés práctico. Así, si, por ejemplo, la distribución de aceleraciones, $\ddot{a}(t)$, fuese conocida, se podría resolver la ecuación diferencial, utilizando métodos matemáticos, y encontrar la expresión del desplazamiento, velocidad y aceleración de la masa oscilante, en función de las propiedades físicas del oscilador y del tiempo. Es decir,

$$\begin{aligned} x &= f(T, c, t) \\ \dot{x} &= f(T, c, t) \\ \ddot{x} &= f(T, c, t) \end{aligned}$$

Dichas expresiones son características del terremoto con aceleración $\ddot{a}(t)$ y, para un valor determinado de las propiedades del oscilador (representadas por el período, T , y el amortiguamiento c), se puede encontrar el valor máximo de x , \dot{x} y \ddot{x} . Dichos valores máximos variarán, naturalmente, según tomemos otros T y c . Representando dichos valores máximos en forma de gráfica, en función de T y c , se obtiene lo que se denomina «espectro de respuesta» de desplazamientos, velocidades o aceleraciones, según sea el valor máximo de x , \dot{x} , o \ddot{x} el que consideremos. Estos gráficos (o «espectros») son muy útiles para establecer de una manera rápida cual es la respuesta máxima del oscilador al terremoto característico de dicho espectro. La manera de proceder es sencilla y se resume en los siguientes pasos:

- Cálculo del período $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}$ y del amortiguamiento c del modelo de oscilador en cuestión.
- Entrar en un espectro correspondiente con T y c y calcular $X_{\text{máx.}}$, $\dot{X}_{\text{máx.}}$ y $\ddot{X}_{\text{máx.}}$.

Dicho esquema está representado en la fig. 7.



Etapas del cálculo

- a) Cálculo $T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$
- b) Entrar en gráfico del espectro correspondiente con T_1 , C_1 y obtener $X_{máx.}$ etc.

Fig. 7.—Etapas de cálculo utilizando el espectro de respuesta.

Los espectros de respuesta, cuya idea esencial se ha resumido en las líneas anteriores, son muy utilizados para calcular la respuesta de las estructuras a terremotos cuyo «espectro» es conocido, o asimilable a uno conocido. Así pues, las ordenadas del espectro nos dan un índice del efecto del terremoto sobre la estructura. La misión del proyectista estriba en diseñar estructuras cuyos parámetros físicos sean tales que se encuentren, en lo posible, en la zona de ordenadas bajas del espectro.

Efecto del terreno

El terreno sobre el que se asientan las estructuras tiene una influencia decisiva en la respuesta de las mismas a terremotos. De hecho, es imposible olvidarse del efecto del terreno en la respuesta sísmica de las estructuras, ya que es generalmente un factor fundamental y decisivo en el comportamiento de las mismas. El tema, naturalmente, es, en sí, amplio e intervienen en el mismo diversos factores que, obviamente, sería imposible detallar aquí. No obstante, hay una serie de ideas básicas que enlazan con el apartado anterior y que se pueden explicar de forma sencilla.

La primera idea es la del efecto *amplificador* del terreno con respecto a las ondas sísmicas. Sucede que las ondas que se producen en las capas internas del terreno pueden sufrir una amplificación al ser transmitidas hacia la superficie. Este efecto de amplificación se puede explicar de forma sencilla aludiendo al concepto de resonancia antes comentado. Si idealizamos al terreno como un modelo de osciladores, se pueden aplicar exactamente los mismos razonamientos sobre amplificación de la respuesta sísmica antes mencionados. Así, se deduce que el terreno amplificará aquellas oscilaciones cuyas frecuencias más bajas sean coincidentes con las frecuencias más bajas del terreno. Esto se traduce en que las ordenadas del espectro de respuesta del terremoto en cuestión serán *mayores* si el movimiento se mide en la superficie del terreno, que si se miden en el punto de origen de las ondas sísmicas. Este fenómeno, no obstante, es prácticamente inalterable puesto que poco se puede hacer para influir sobre el mismo. Pese a todo, es interesante tener una idea clara sobre el fenómeno, y sobre cual es la razón de que se produzca. (ver fig. 1).

El tipo de terreno tiene una gran importancia sobre la respuesta sísmica de las estructuras. En la fig. 8a se ha representado un espectro de respuesta de aceleraciones (normalizado), obtenido para el mismo terremoto sobre tres tipos de terrenos: roca, terreno duro y terreno blando. Las conclusiones que se extraen de dicha figura son evidentes. En terrenos «duros» son recomendables las estructuras de períodos dominantes altos (menores ordenadas espectrales), es decir, estructuras muy flexibles (k pequeño). Por el contrario, en terrenos blandos son adecuadas las estructuras rígidas, de períodos bajos. Vemos, pues, que el concepto del espectro de respuesta nos permite extraer interesantes conclusiones sobre el distinto efecto de un mismo terremoto sobre una estructura, en función del terreno donde esté cimentada y de las características de la misma.

Otro efecto importante del terreno es el de «giro» de la estructura. Si la cimentación de la misma no ha sido cuidada, se puede producir el efecto de que toda la estructura gire sobre su base, produciéndose el vuelco de la misma. Este

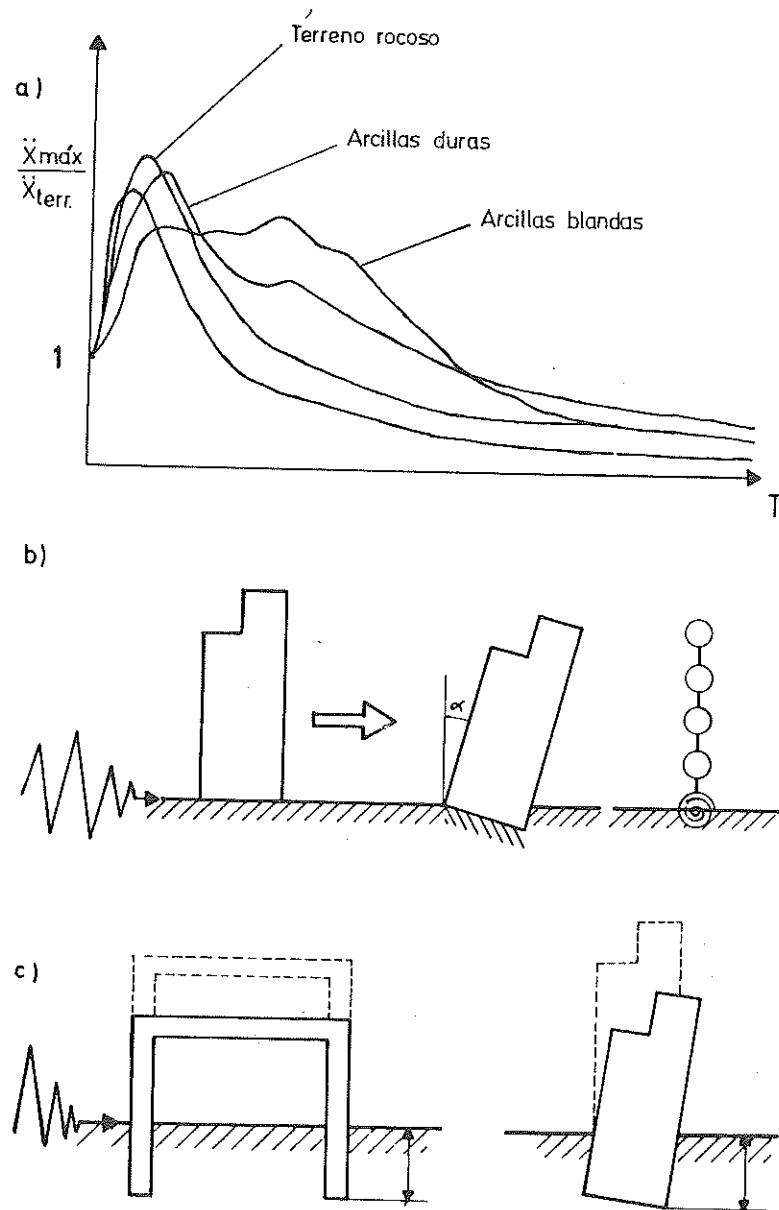


Fig. 8.- Efectos del terreno

efecto puede tenerse en cuenta en los cálculos, mediante un modelo de cálculo adecuado, más o menos complejo (ver fig. 8b). Finalmente, hay otro factor a tener en cuenta con relación a este tema y es el efecto de pérdida de rigidez interna del terreno por las oscilaciones sísmicas. Este es un fenómeno complejo, que en la terminología especializada recibe el nombre de "licuefacción". En definitiva, se traduce en que las tensiones que mantienen en contacto las partículas del terreno se relajan hasta alcanzar un valor nulo. En dicho momento, el comportamiento del terreno es completamente análogo al de unas "arenas movedizas", provocando el hundimiento parcial de la estructura en bloque (fig. 8c).

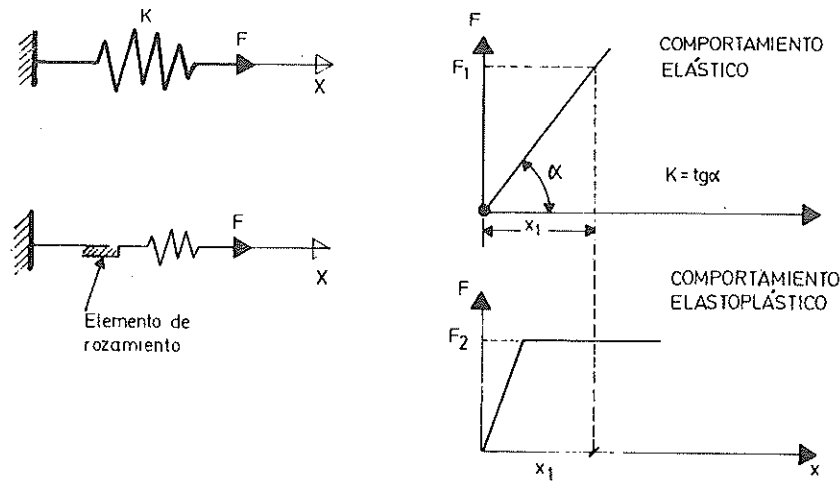
Efecto de la ductilidad

Es bien conocido, para los especialistas en cálculo de estructuras, que el comportamiento de los materiales que componen las estructuras no es perfectamente elástico. De hecho, los materiales más comunes (hormigón y sobre todo acero) presentan un comportamiento que se conoce comunmente con el nombre de elasto-plástico y que se traduce en que los distintos componentes estructurales (vigas, pilares) dejan de comportarse elásticamente por encima de un cierto valor de las cargas actuantes, a partir del cual las deformaciones de la estructura aumentan en gran valor para pequeños incrementos de dichas cargas. Un caso de comportamiento elastoplástico puro se muestra en la fig. 9, donde se observa que para un determinado valor de la carga, F_2 , las deformaciones aumentan indefinidamente a carga constante. Esta capacidad de deformación a menor carga se denomina con el nombre genérico de «ductilidad». En general, interesan edificios lo más dúctiles posibles, pues desarrollan menos fuerzas internas para obtener la misma deformabilidad. La ductilidad se manifiesta con la aparición de zonas plastificadas (o zonas donde se supera la carga límite elástica).

En el diseño hay que tomar precauciones para que dichas rótulas se formen en los puntos adecuados, de forma que se consiga la máxima ductilidad de la estructura. El efecto de la ductilidad puede tenerse en cuenta en el cálculo de forma sencilla, reduciendo las ordenadas del espectro de respuesta por un «coeficiente de ductilidad», que no es más que el cociente entre las cargas elástica y plástica necesarias para obtener el desplazamiento máximo de la estructura deseado (ver fig. 9). De esta manera, al reducir las ordenadas del espectro, se disminuyen los efectos del terremoto sobre la estructura, con lo que el diseño de la misma puede ser menos severo que en el caso de no considerar la ductilidad.

Daños más corrientes de los terremotos

Hablar de daños de los terremotos en las estructuras en forma resumida es problemático debido a la amplitud del tema. No obstante, y pretendiendo únicamente dar unas ideas generales, se pueden clasificar los daños más corrientes en: «daños en «componentes estructurales» y en «componentes no estructurales». Con el mero objeto de que sirva de referencia se citan algunos de dichos daños como:



Factor de ductilidad $M = \frac{F_1}{F_2}$

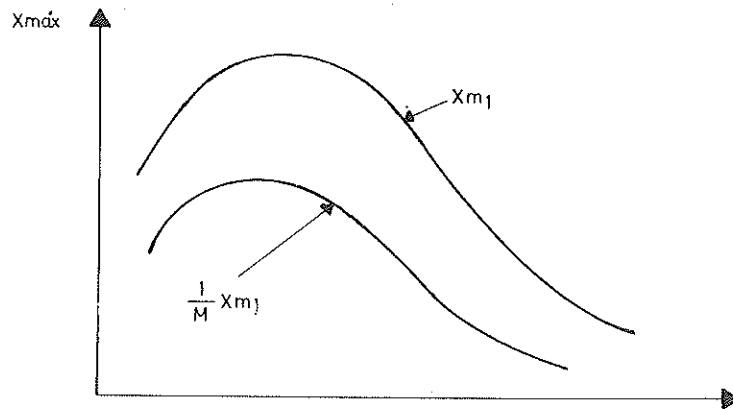


Fig. 9.- Efecto de la ductilidad

- Agrietamientos de acabados y muros (estructurales y no estructurales).
- Formación de zonas plásticas en pilares.
- Agrietamientos en vigas.
- Rotura parcial ó total de componentes estructurales y no estructurales.
- Pérdidas en anclajes de pretensado.
- Desconchamiento de recubrimientos, fachadas, etc.
- Rotura de tuberías, chimeneas, etc.
- Rotura de falsos techos, escaleras, etc.
- Colisión contra construcciones vecinas por exceso de flexibilidad de la estructura.

Recomendaciones para el diseño estructural

En general, el diseño estructural óptimo para resistir un terremoto debe combinar una máxima *resistencia* de la estructura con una *rigidez* adecuada, teniendo en cuenta los diversos factores citados anteriormente, y con un cierto grado de *ductilidad*. En la consecución de dicho diseño influyen decisivamente la forma de la estructura, el tipo y distribución de los elementos estructurales y la adecuada distribución de masas. Asimismo, contribuyen a disminuir el riesgo la sencillez, uniformidad y simetría de la estructura.

Como norma general, en zonas de alto riesgo sísmico no son recomendables estructuras de diseño arquitectónico avanzado. No obstante, un análisis refinado, cuidando los detalles importantes, puede permitir diseños originales y funcionales.

En el diseño estructural sísmico hay que hacer una clara diferenciación entre el diseño de la estructura a nivel global, incidiendo en los detalles de tipología y conjunto de la estructura, y el diseño de los diferentes elementos estructurales a nivel de detalle. Ambos conceptos tienen un alto grado de importancia en el comportamiento sísmico de las estructuras y exigen conocimientos claros y precisos de las normas a seguir en cada caso.

Así, las recomendaciones más comunes sobre diseño estructural a nivel global pueden resumirse en las siguientes:

- a) Sencillez de la estructura. Permite entender claramente la forma mediante la cual resiste las cargas sísmicas.
- b) Puesto que el movimiento del terreno puede ocurrir en cualquier dirección, la estructura debe tener rigidez y resistencia en dos direcciones ortogonales.
- c) La distribución simétrica en plantas de elementos estructurales evita torsiones importantes de cuantificación difícil. Hay que cuidar la posición estructural de muros de medianera, escaleras, huecos de ascensor, etc.

- d) Debe tenderse a una forma regular en plantas y en elevación.
- e) Es esencial la uniformidad de resistencia y rigidez de las diferentes partes de la estructura.
- f) Hay que cuidar la cimentación, para evitar deformaciones relativas importantes entre el suelo y la estructura.

En general, existe una cierta controversia entre la utilización de estructuras esencialmente a base de pórticos (gran flexibilidad y ductilidad) o a base de muros portantes y pórticos (gran rigidez). En cada caso, hay que observar el espectro de respuesta para atenerse a las sencillas reglas comentadas anteriormente. Recordemos (apartado 3) que, en general, estructuras rígidas son adecuadas en terrenos blandos y estructuras flexibles son más convenientes en terrenos duros. Asimismo, el aprovechamiento de la ductilidad está limitado por el control de los desplazamientos laterales de la estructura y hay que cuidar que esté asegurada una rigidez lateral mínima.

Un aspecto fundamental del diseño sísmico de estructuras es el diseño de elementos estructurales. Hay que tener en cuenta siempre dos puntos esenciales: que las diferentes secciones individuales de las piezas sean capaces de desarrollar la ductilidad necesaria y que, asimismo, la estructura como conjunto pueda desarrollar los mecanismos previstos que le permitan disipar la suficiente energía sin llegar al colapso.

En otras palabras, la admisión de una cierta ductilidad, tanto a nivel de elementos estructurales, como de la estructura como conjunto, incrementa las condiciones de diseño estructural, del dimensionamiento de elementos estructurales y de detalles constructivos. Interviene, por tanto, la evaluación económica como factor decisivo del diseño: mayor rigidez de la estructura va asociada a un mayor costo en materiales y mayor ductilidad a un mayor costo en control y cálculos.

Existe toda una normativa de recomendaciones a seguir en el diseño de elementos de estructuras de hormigón o metálicas que afectan a la elección de materiales, diseño de vigas, pilares, unión vigas-pilares, placas, muros de carga, etc. Entrar en detalles de todos ellos aquí sería largo y, en nuestra opinión, fuera de lugar. El lector interesado en el tema pueden encontrar mayor información en la referencias 1 y 5. No obstante, como idea general se puede afirmar que las estructuras metálicas presentan mejores características de disipación de energía que las de hormigón y, asimismo, un mejor comportamiento frente a terremotos importantes. Como contrapartida, el coste asociado a la construcción de dichas estructuras es generalmente algo mayor.

Sucede con frecuencia que terremotos de poca importancia afectan ostensiblemente a elementos «no estructurales» (tabiques, puertas, ventanas, equipos, etc.), dejando intacto el armazón resistente de la estructura. Este efecto puede reducirse, e incluso evitarse, si se toman las precauciones adecuadas. Detalles, como revisar la inercia de cada elemento para evitar su rotura o volcamiento, o la mera comprobación de holguras para que existan ciertos movimientos permitidos, son indispensables para evitar que dichos elementos sufran daños importantes.

Los elementos arquitectónicos de cierta importancia merecen, en ocasiones, un tratamiento especial. Las opciones más usuales que se manejan para garanti-

zar su seguridad frente a terremotos es desligarlos completamente de la estructura principal o, bien, ligarlos a la estructura, pero limitando cuidadosamente los desplazamientos máximos. Al desligar el elemento, hay que prever su estabilidad a efectos del terremoto u otros agentes externos como viento, etc. Asimismo, debe preverse el aislamiento térmico y acústico, su estanqueidad, y otros factores como aspecto estético, holguras, etc.

En muchas estructuras dañadas por terremotos se plantea la disyuntiva de efectuar o no reparaciones de los daños causados. La reparación de estructuras dañadas precisa un análisis muy detallado de la estructura para no alterar, ni de forma global, ni local, sus propiedades resistentes. La reparación de elementos resistentes en forma aislada es peligrosa, pues si se aumenta excesivamente su rigidez puede desequilibrar la estructura, con lo que podrían quedar descompensadas otras zonas de la misma. Como punto final, añadiremos simplemente que es muy interesante tratar de aprovechar la experiencia de errores constructivos en estructuras ya afectadas por terremotos, para estructuras que estén en zonas sísmicas semejantes. Esto, naturalmente, es difícil si las estructuras están ya construidas, pero es un dato sumamente valioso para estructuras que constituyan proyectos futuros.

REFERENCIAS

1. *Design of earthquakes resistant structures*, Capítulo 3, Londres, Editado por E. Rosenblueth, Pentech Press, 1980.
2. CLOUGH, R.W. and PENZKEIN, J., *Dynamics of structures*, McGraw-Hill, 1975.
3. NEWMARK, N.M. y E. ROSENBLUETH, *Fundamentos de ingeniería sísmica*, Méjico, CECSA, 1976.
4. *Cálculo dinámico en Ingeniería Civil*, Madrid, Editado por el colegio de Ingenieros de Caminos, 1973.
5. DOWRIK, D.J., *Earthquake resistance design*, McGraw-Hill, 1977.
6. BIGGS, A., *Introduction to structural dynamics*, McGraw-Hill, 1964.