Instituto Eduardo Torroja

# EL CODIGO MODELO SISMICO DEL CEB

P. E. Pinto

Prof. Dr. Ing. Facultad de Arquitectura, Roma (Trad. José I. Alvarez Baleriala, Dr. Ing. de Caminos)

409-8

# Nota de la Redacción

Aun cuando la Sección de CUADERNOS DE IN-FORMES no publica habitualmente trabajos de autor, hemos considerado pertinente, en esta ocasión, incluir en dicha Sección un comentario sobre el Código Modelo Sísmico del CEB, como continuación a la publicación del texto del citado Código en CUADERNOS de los n.ºs 372 373 y 374 de INFOR-MES.

#### INTRODUCCION

Durante la segunda mitad de los años 70, el intercambio internacional de ideas sobre la ingeniería sísmica había producido un acuerdo de base de los especialistas de la investigación y del ejercicio de la profesión sobre la oportunidad de ordenar de forma sistemática los conceptos generales, los métodos de análisis y las reglas de detalle estructurales que, no siendo de ninguna manera revolucionarias, no obstante representan en esta época un estado de los conocimientos que no figura todavía en la mayoría de los Códigos en vigor.

La adopción de esta tarea por parte del CEB constituyó, sin substraer-le mérito alguno, una solución casi obligada dada su vocación y sus rélaciones cosmopolitas. Su competencia confirmada y siempre renovada en el ámbito de las estructuras de hormigón así como en el tratamiento avanzado de los problemas de seguridad, convertían al CEB en el candidato natural para llevar a cabo esta iniciativa.

El primer paso dado fue la organización de un Simposio Internacional, celebrado en Roma en mayo de 1979, que tenía como fin hacer hincapié sobre el estado de los conocimientos sobre las «estructuras de hormigón sometidas a acciones sísmicas», y establecer las bases para la redacción de un documento complementario al Código Modelo CEB-FIP para estructuras de hormigón.

El interés y el éxito suscitado por el Simposio dieron lugar a la constitución de un grupo de trabajo encargado de la redacción del documento; este grupo estaba compuesto por diecinueve miembros de diferentes países, desde Nueva Zelanda a América del Norte y del Sur, pasando por Japón y Europa.

Asegurados, de esta manera, la experiencia y el consenso internacionales, la actividad del grupo se desarrolló intensamente durante tres años, produciendo tres ediciones sucesivas del documento de las que la tercera, contenida en el *Boletín de Información n.º 160* fue aprobada como definitiva durante la 68.ª Sesión Plenaria del CEB celebrada en Praga en octubre de 1983. El texto de este Boletín, que se complementa con el n.º 160 bis que contiene varios ejemplos de aplicación numérica, ha sido publicado recientemente con su redacción oficial definitiva, como Anexo Sísmico al Código Modelo. (*Informes de la Construcción n.º 372, 373 y 374*).

# ALGUNOS PUNTOS SOBRESALIENTES DEL NUEVO CODIGO SISMICO

Si se pretendiera, en la exposición que sigue, guardar un cierto orden lógico de presentación, no seria inútil anticipar de forma resumida algunos de los aspectos que, en su conjunto, proporcionan al nuevo Código su carácter original.

En primer lugar, se deja al proyectista en libertad para elegir entre diversas relaciones resistencia/ductibilidad para la construcción que desea realizar. Es decir que, si esta última ha sido adecuadamente concebida, proporcionada y analizada para controlar que efectivamente se forman los mecanismos estables de disipación de energía y, sobre todo, si se respetan ciertas reglas bastante elaboradas relativas a los detalles de armado, las acciones sísmicas de cálculo podrán verse reducidas con respecto a las que serían de aplicación en el caso en que aquéllas no se respetaran. Esta flexibilidad permite no sólo una mejor adaptación a las condiciones particulares del proyecto, sino que, igualmente, obligan al proyectista a considerar siempre la resistencia sísmica de una obra como el resultado de una combinación adecuada de resistencia y de capacidad de deformación inelástica.

La presencia de un capítulo dedicado a efectuar una definición detallada de la acción sísmica refleja también una intencionalidad precisa: informar al usuario del Código sobre la naturaleza física del fenómeno y
sobre las ventajas y los límites de una posible representación analítica
del mismo, en vez de prescribir acciones convencionales «equivalentes» que no serían fáciles de explicar y, lo que es más grave, que podrían incluso conducir a una aplicación poco afortunada. Por otra parte, se ha realizado un esfuerzo especial para clarificar y explicar el
significado de los parámetros que definen el movimiento del suelo en
términos de intensidades y de frecuencias, y del efecto de la acción
sísmica, definida a través de la respuesta de una estructura elástica
(espectro de respuesta elástico) ante la acción sísmica de cálculo, obtenida reduciendo el valor del espectro anterior en función de la capacidad disipativa propia de cada tipo de construcción.

Otro aspecto innovador del código es la lógica en la presentación de su contenido. Esta lógica ha venido evolucionando desde hace varios años dentro del CEB y, en líneas generales, pretende la mejora semántica de los textos normativos. Uno de los medios para alcanzarlo es abandonar el carácter a veces exclusivamente prescriptivo de los códigos actuales, para obtener sistemas normativos igualmente «cerrados» pero más «tendentes a justificar» el cumplimiento de los objetivos del proyecto y de los medios para alcanzarlos.

El esquema lógico de los nuevos Códigos se basa en los cuatro puntos siguientes. Primero se presentan los objetivos del proyecto (tipo y orden de magnitud de la protección de la construcción) en función de la acción considerada, seguido de los criterios de proyecto. Estos, que son, asimismo, de naturaleza cualitativa, establecen los medios a utilizar (concepción de la estructura, proporciones relativas entre los elementos, forma de las ecuaciones de verificación, etc.) y, reciprocamente, aquello que es necesario excluir para alcanzar los objetivos mencionados. La tercera parte agrupa todos los algoritmos (métodos de análisis, reglas de dimensionamiento, etc.) que se refieren al caso considerado y cuya validez teórica puede ser demostrada, mientras que, en la cuarta parte, se incluyen todas las reglas complementarias (p. ej. los detalles de armado) que posiblemente sean difíciles de demostrar desde un punto de vista teórico, por ser de origen puramente empírico, pero de las que la experiencia ha demostrado que poseen una eficacia que a veces resulta esencial.

#### **EXIGENCIAS FUNDAMENTALES**

#### Estado límite último

Deberán garantizarse la integridad y la capacidad portante vertical después de un sismo, dentro de los límites del nivel de fiabilidad elegido por el Código, para la estructura en su conjunto así como para cada uno de sus elementos, tanto en aquellas zonas elegidas específicamente para resistir la acción sísmica como, eventualmente, en aquellas otras zonas unidas solidariamente a las anteriores, pero que no tienen una función sismorresistente determinada.

# Estados límites de servicio

La obra en su conjunto, incluyendo todos sus elementos constitutivos, estructurales o no, debe poseer el nivel de protección contra las pérdidas económicas directas o indirectas, provocadas por los sismos, que se juzgue óptimo.

Las formulaciones anteriores poseen tales implicaciones que hacen del problema sísmico un caso bastante particular, y merecen ser subrayadas.

En primer lugar es preciso considerar aquí el estado límite último como una verdadera situación de colapso y no como aquélla en la que se alcanza una mera plastificación de las secciones. Esto implica que el proyecto y el cálculo deben considerar a la estructura como un todo, en lugar de una simple colección de elementos y secciones, y permitir el control de los posibles mecanismos que se formen en ella con objeto de eliminar aquéllos que sean desfavorables. En los casos ordinariois no se impone esta necesidad porque la formación de un mecanismo no representa más que un suceso cuya probabilidad es despreciable.

A primera vista, el término «estado límite de servicio» puede parecer poco apropiado si se considera el carácter «excepcional» del fenómeno sísmico. En realidad, este estado límite tiene por objeto la optimización económica del proyecto: el nivel de protección óptimo es el que minimiza el costo total que es la suma de los costos de construcción más las pérdidas previsibles (actualizadas), causadas por los posibles sismos a sufrir por la estructura durante su vida útil. Una vez más se señala que se trata de un concepto que no tiene ninguna razón para intervenir en las situaciones de carga corrientes.

# **CRITERIOS DE PROYECTO**

En la exposición que sigue se pretende llamar la atención sobre dos puntos de mayor interés: los niveles de ductilidad y el «formato» de la verificación de la seguridad.

En lo que concierne a la relación resistencia/ductilidad, el nuevo Código permite, en general, escoger entre tres posibilidades:

- nivel I: se trata del nivel propio de las construcciones concebidas siguiendo las reglas del Código Modelo del CEB al aplicarles un sistema de fuerzas horizontales suplementario. Deberán cumplirse además un pequeño número de disposiciones constructivas destinadas a eliminar los focos de fragilidad desde un punto de vista macroscópico;
- nivel II: las reglas de cálculo, y los detalles constructivos están concebidos especialmente para permitir que la estructura se deforme plásticamente de forma cíclica alternada sin pérdida de resistencia y sin peligro de roturas frágiles;
- nivel III: se trata del nivel más sofisticado: en él se prevén los procedimientos de cálculo capaces de conducir a la formación de mecanismos estables y altamente disipativos de energía y, asimismo, las reglas de detalle de armado de los elementos que permiten alcanzar la ductilidad requerida.

Es claro que a niveles de ductilidad mayores corresponden acciones sísmicas de cálculo menores.

Por regla general, las acciones de cálculo y el resto de los parámetros de proyecto deberán calibrarse de forma que se obtenga una seguridad aproximadamente igual en cualquiera de los tres niveles.

En cualquier caso para el nivel I, como las acciones sísmicas son relativamente elevadas, es razonable contemplar su adopción en el caso de obras de importancia modesta, tanto desde el punto de vista estático como económico. Por el contrario, la elección entre uno de los dos niveles superiores, deberá venir determinada, en principio, únicamente sobre la base de la tecnología disponible y de las condiciones particulares de cada proyecto. Conviene subrayar, de todas formas, que el nivel III conduce a un control más completo y más detallado de todo el proceso de construcción, lo que conduce a una protección verdaderamente más eficaz al presentarse condiciones excepcionales, tales como anomalías en las frecuencias propias del movimiento del suelo, efectos de amplificación de locales difíciles de cuantificar, etc. Esto permite afirmar que el nivel III deberá ser el preferido cuando existan motivos para estimar que algunos de los datos del proyecto se alejan de forma notable de los que constituyen la base sobre la que se ha calibrado el Código. Una solución adecuada a veces pudiera ser combinar la adopción de las fuerzas de cálculo previstas para el nivel II (más elevadas) con las disposiciones constructivas del nivel III (más detalladas).

Las expresiones a adoptar para la verificación de la seguridad en la situación sísmica no presentan diferencia formal alguna con las que el Código Modelo prevé para las otras situaciones: los dos criterios fundamentales, es decir, por una parte la utilización de coeficientes parciales que afectan a las acciones y a las resistencias, y por otra la verificación por secciones, de forma individual, se mantienen.

En realidad, si en cuanto al primer punto las diferencias se trasladan de hecho a los valores de los coeficientes parciales, la verificación sección por sección, aún constituyendo un modo de operar, adquiere el estatus de un verdadero análisis del sistema estructural. La importancia de este último punto merece ser subrayada con algunos ejemplos.

La cualidad principal de una construcción sismorresistente satisfactoria es, como se sabe, su capacidad de disipar de forma estable, durante su respuesta dinámica, una parte considerable de la energía que le transmite el mismo. Para alcanzar este objetivo deberán cumplirse numerosas condiciones: las zonas que plastifiquen (fuentes de disipación de energía) deberán estar bien distribuidas por toda la estructura (aumentando así la disipación total); los elementos plastificados deben ser, al mismo tiempo, aquéllos que posean mayor capacidad de disipación de energía y, a la vez, jueguen un papel no crítico en el equilibrio general de la estructura (estas dos condiciones conducen a favorecer la plastificación de las vigas en lugar de la de los soportes); los mecanismos que conducen a roturas frágiles (poco «disipativas» de por sí y capaces de impedir la disipación de energía en otros elementos) deberán evitarse...

La contribución del nuevo Código a alcanzar estos objetivos consiste en prever procesos de cálculo que aseguren una determinada jerarquía entre las respectivas resistencias de los diversos elementos, de forma que se realicen los mecanismos deseados.

Los ejemplos siguientes han sido elegidos entre muchos de los existentes.

#### Resistencia de las vigas al esfuerzo cortante

Para evitar esta forma de rotura no dúctil, el esfuerzo cortante de cálculo se evalúa considerando la viga isostática sometida a cargas verticales y a momentos en los extremos, en el supuesto de que éstos alcanzan sus *valores últimos reales* (y no los valores resultantes del análisis estructural), pudiendo ser mayorados por un «factor» apropiado (en el caso del nivel III) para compensar la reducción debida a la utilización de valores de cálculo para las resistencias.

# Resistencia relativa entre vigas y soportes en el entorno de los nudos de unión

El objetivo es salvaguardar los soportes tanto como sea posible porque estos elementos son capaces de disipar menos energía que las vigas y sobre todo porque resultan ser elementos más críticos para el equilibrio global. Los momentos de cálculo en las secciones de los soportes en los nudos deberán obtenerse a partir de los valores que proporcione el análisis, aplicado a estos últimos un coeficiente de mayoración tal que la suma de los momentos de las secciones de los soportes sea superior a la correspondiente de las secciones de las vigas en el mismo nudo. Esta regla basta para garantizar, en la mayor parte de los casos, que la plastificación de las vigas precede a la de los soportes (haciendo imposible esta última).

# CALCULO Y DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL

# El «formato» de la acción sísmica de cálculo

Siguiendo una tendencia casi universal, la acción sísmica se define por medio de un espectro de respuesta elástica, reducido de forma apropiada por un factor que tiene en cuenta el comportamiento inelástico; el espectro de respuesta elástico proporciona, por definición, la aceleración absoluta máxima alcanzada por un oscilador simple sometido a un movimiento sísmico del suelo adoptado como referencia por su intensidad y su contenido en frecuencias. Se puede demostrar que un espectro de respuesta elástica equivale al conocimiento de una familia de posibles acelerogramas, que poseen todos las mismas características de frecuencia y de intensidad, y que dan lugar a una respuesta máxima igual a las coordenadas del espectro. La generalidad de este modo de representación de la acción sísmica se completa por el hecho de que se presta igualmente bien para definir a la acción sísmica en forma de una «acción estática equivalente».

El «formato» adoptado por el CEB es el siguiente:

$$R(T) = I.A.S.\alpha. \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\beta} \cdot \frac{1}{K} > I.A.\alpha. \frac{1}{K}$$

siendo:

T: el período de vibración propio de la estructura;

l: el «factor de importancia», que modula la acción de cálculo en función del grado de protección que se desee asegurar a la estructura, teniendo en cuenta su destino;

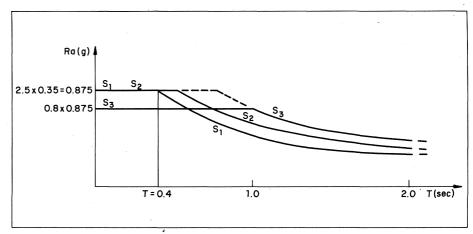
A: aceleración máxima eficaz del suelo, caracterizada por un período medio de retorno dado y, por esta causa, variable en función de la sismicidad de cada zona.

S: factor que tiene en cuenta las condiciones mecánicas y estratigráficas del suelo, que pueden dar lugar a importantes amplificaciones de la aceleración en la superficie (1 < S < 1.5):

α: factor de amplificación entre la excitación y la respuesta, variable aleatoria cuyo valor medio es aproximadamente igual a 2,5;

 $T_2$ ,  $\beta$ : parámetros que definen la forma del espectro;

K: «factor de comportamiento» (inelástico) que depende de la tipología estructural (estructura porticada, apantallada o mixta) y del nivel de ductilidad elegido (2 < K < 5).



Espectro de respuesta para A = 0.35, I = 1, K = 1.

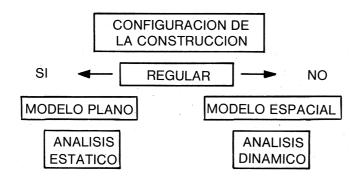
# Análisis estructural estático o dinámico

La experiencia alcanzada con numerosas aplicaciones numéricas y, sobre todo, la constatación de los efectos de los sismos destructivos ha permitido desde hace años establecer:

- por una parte, que las estructuras bien concebidas desde el punto de vista de su «regularidad» en planta y en alzado no requieren sino análisis relativamente simples;
- por otra parte, que incluso la realización de cálculos complejos y cuidadosos no es siempre suficiente para descubrir y remediar los defectos iniciales de concepción.

La tendencia es pues evidentemente la de promover la buena concepción estructural, siguiendo las indicaciones cualitativas expuestas en los Comentarios, en tanto que el Código proporciona las reglas precisas cuantitativas para la verificación.

El esquema siguiente resume las diferencias en los métodos de análisis previstos para el Código según que las construcciones sean regulares o irregulares.



La formulación matemática del «concepto de regularidad» no se ha realizado sin dificultad, pues era necesario encontrar parámetros verdaderamente representativos cuya evaluación no fuera excesivamente laboriosa.

No es posible entrar aquí en los detalles de estas verificaciones, pero merece la pena mencionar dos parámetros que poseen un carácter innovador para los proyectistas europeos.

El primer criterio se refiere a la aptitud, considerada positiva, de una construcción para responder ante una excitación en cualquier dirección por medio de oscilaciones contenidas en un plano, sin excitar vibraciones de torsión. Esta aptitud se mide evaluando la relación entre la rigidez a torsión y la de traslación: se considera que la estructura posee esta aptitud si en todas las plantas un 15% de la raíz cuadrada de esta relación (que posee dimensiones de longitud), es superior a la distancia entre el centro de gravedad y el centro de rigidez.

El segundo criterio es igualmente ilustrativo; se refiere a la «regularidad» el alzado y prescribe que si, en una planta determinada, se presenta una diferencia positiva entre la resistencia horizontal total última realmente existente y la que se requiere por el cálculo, la relación entre ambas debe mantenerse constante en todas las plantas, con una variación admisible de + 20%. La intención de esta prescripción es evidentemente evitar la concentración de resistencia en determinadas plantas, que son susceptibles de provocar mecanismos de colapso locales en las plantas menos resistentes.

# Solicitaciones de cálculo para los elementos

Ya se ha mencionado antes que la verificación de la seguridad o, si se quiere, el dimensionamiento de los elementos, se efectúa sobre la base de solicitaciones que no coinciden en todos los casos con las que se obtienen del análisis elástico de la estructura (tanto si es estático como si es dinámico). Estas modificaciones se deben a diferentes razones. La primera (y la más importante) tiende a provocar la formación de los mecanismos que se desean y a evitar la de los mecanismos desfavorables. Conviene subrayar aquí que es ésta la razón por la que la resistencia al esfuerzo cortante se «sobredimensiona» de forma que es, prácticamente, puesta «fuera de juego» (en términos más «rigurosos»: de manera que la probabilidad de que se forme un mecanismo de rotura debido al esfuerzo cortante sea inferior en una determinada cantidad a la plastificación por flexión). Un segundo ejemplo de la misma naturaleza es el relativo a las pantallas estructurales acopladas, es decir a los sistemas formados por pantallas verticales sin huecos, unidas por dinteles que dejan huecos intermedios. Bajo la acción de las fuerzas horizontales, los esfuerzos de tracción-compresión autoequilibrados se transmiten de una pantalla a la otra por medio de los esfuerzos cortantes existentes en los dinteles a diversas alturas. Dado que el esfuerzo normal juega un papel preponderante en la ductilidad de las secciones flectadas, el Código prescribe, por ejemplo, que debe evaluarse el esfuerzo normal en las secciones de base de las pantallas sumando (con sus signos) los esfuerzos cortantes máximos de todos los dinteles superiores, en la hipótesis de que en todos ellos se ha desarrollado una rótula plástica en cada uno de sus extremos (caso límite más desfavorable).

Las solicitaciones obtenidas del análisis estructural pueden ser subsiguientemente modificadas para tener en cuenta la redistribución de los esfuerzos internos debida a la fisuración y al comportamiento inelástico y, en definitiva, para corregir los valores de los momentos flectores en los soportes que se obtienen de un análisis de tipo estático (coeficiente de amplificación dinámica). La necesidad de efectuar esta última corrección proviene del hecho, demostrado por medio de numerosos estudios numéricos, de que los puntos de momento nulo en los soportes, en régimen dinámico, pueden alejarse considerablemente de la posición dada por el análisis estático.

#### **DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS**

Estas prescripciones, basadas en la experiencia o en consideraciones teóricas de naturaleza cuantitativa, ocupan una extensión considerable del Código, lo que indica suficientemente bien la importancia que se les concede.

Su enumeración pura y simple, incluso sin realizar una ilustración detallada de las mismas sería desproporcionada en función de los objetivos de esta exposición. Su presentación se realizará, por tanto, mencionando sus principales categorías.

Las indicaciones cubren, con un grado de severidad creciente con el nivel de ductilidad, los siguientes puntos:

- dimensiones y proporciones a respetar entre los diversos elementos;
- límites superiores e inferiores de las cuantías de armaduras longitudinales normales en vigas y soportes;
- delimitación de las zonas «críticas» (plastificación prevista, o posible) en las vigas, los soportes, las pantallas estructurales...;
- la cuantía mínima y la disposición de las armaduras trasversales de zunchado en las zonas críticas;
- las reglas de anclaje y de recubrimiento de las armaduras.

#### **OBSERVACIONES FINALES**

Los últimos años se han caracterizado por un desarrollo decisivo del intercambio de conocimientos entre especialistas en el diseño sismo-rresistente y, en consecuencia, en la aparición de Códigos más completos y más racionales que los anteriores.

El Código del CEB posee diversos aspectos originales:

- surge de una Asociación Internacional y testifica un esfuerzo de armonización de formas de pensar y de prácticas que, a menudo, no difieren sino en sus aspectos formales;
- conserva el carácter de Código Modelo, lo que le confiere mayor generalidad y flexibilidad que un Código Nacional;
- ha sido establecido a instancias del propio CEB y, por ello, su estructura lógica ha sido adaptada a los más recientes avances en el enfoque probabilista de la seguridad estructural;
- siendo uno de los Códigos publicados más recientemente, se beneficia de la tendencia actual de éstos de proporcionar al usuario no sólo las reglas que éste debe respetar, sino también la información necesaria para una mejor comprensión de sus motivaciones y de su alcance.