

LA INGENIERIA ESTRUCTURAL EN ZONAS SISMICAS



OSCAR DE BUEN LOPEZ DE HEREDIA*

RESUMEN

Se describen, en forma breve, las etapas que constituyen el proceso de diseño, haciendo énfasis en los aspectos en que la ingeniería estructural en las áreas de alta sismicidad difiere de la de zonas no sísmicas. Se estudian las solicitaciones principales que deben ser resistidas por las estructuras, y se discute por qué las acciones sísmicas difieren de las de otro tipo. Se hace ver que algunas estructuras diseñadas de acuerdo con el Reglamento de las Construcciones para el D. F. de 1987 no tienen el nivel de seguridad deseado. Se recalca la importancia de la colaboración de todos los que intervienen en el diseño y la construcción de las edificaciones. Se comentan los métodos con que se cuenta para el análisis y diseño sísmico, y se destacan sus limitaciones. Finalmente, se presentan conclusiones encaminadas a mejorar el diseño y la construcción de edificios en zonas sísmicas.

INTRODUCCION

El objeto de este trabajo es estudiar la manera en que la necesidad de resistir los efectos de los temblores de tierra influye en varias de las etapas básicas del proceso de diseño de las estructuras que se construyen en zonas sísmicas. Este problema es de capital importancia desde los primeros pasos del proceso e influye, en ocasiones, incluso en decisiones relativas a la zona en la que habrán de construirse nuevas instalaciones industriales, turísticas o de otros tipos. ¿Estuvieron, por ejemplo, bien escogidos los sitios donde se construyeron el desarrollo turístico de Ixtapa Zihuatanejo, o la planta siderúrgica Lázaro Cárdenas - Las Truchas? Desde el punto de vista de la ingeniería sísmica es evidente que no.

* Profesor de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Colinas de Buen, S.A. de C.V.

Sin embargo, en la mayoría de los casos no se pone en discusión el lugar donde se construirá una nueva edificación, así sea en una zona de alta sismicidad, como, por ejemplo, la Ciudad de México.

En este trabajo se considera que el lugar donde se levantará la nueva construcción está ya determinado: se erigirá en una zona sísmica y, aceptando esta realidad, se ha de obtener un edificio seguro, cuyo funcionamiento no se vea afectado seriamente por los temblores.

En la primera parte se describen, en forma breve, las diversas etapas que constituyen el proceso de diseño; después se discute cómo influye el sismo en las más importantes y de qué manera se han de incluir sus efectos en el proceso, recalcando los aspectos en los que la ingeniería estructural en áreas de alta sismicidad difiere de la de zonas en las que tal actividad no es significativa.

EL PROCESO DE DISEÑO

Se inicia con la identificación de una necesidad que requiere de algún tipo de construcción para ser satisfecha, y con la realización del estudio socio-económico que demuestre la factibilidad de esa construcción; la ingeniería estructural debe desempeñar un papel importante en estas primeras etapas.

El campo de la ingeniería estructural es muy extenso, pero aquí nos referiremos sólo a edificios urbanos de varios pisos, comerciales o para vivienda, que constituyen un porcentaje elevado de todas las construcciones y que son, además, hacia las que se ha dirigido la mayor parte del esfuerzo realizado por la ingeniería sísmica.

Tomada la decisión de construir, el siguiente paso consiste en elaborar un anteproyecto arquitectónico del edificio que incluya todos los aspectos, espaciales y funcionales, que llevaron a esa decisión. Desde esta etapa debe intervenir un equipo multidisciplinario que colabore con el arquitecto, quien debe tener muy en cuenta, desde que empieza a desarrollar sus ideas, las restricciones impuestas por las instalaciones y equipos que requiere la operación del edificio y por la necesidad de contar con una estructura, indispensable para dar forma a la construcción, crear los espacios que la constituyen y soportar, en forma segura y económica, las cargas y sollicitaciones de otros tipos que actuarán sobre ella durante toda su vida útil.

El arquitecto desempeña un papel predominante en la mayoría de las construcciones urbanas, como cabeza y coordinador del grupo interdisciplinario que es indispensable para desarrollar cualquier proyecto moderno de importancia, por lo que debe aceptar su responsabilidad como director de ese grupo. Han sido muy frecuentes los casos en que edificios con configuraciones escogidas por un arquitecto han sufrido daños por tener un comportamiento inadecuado

ante los temblores. Una vez elegida una configuración desventajosa desde el punto de vista de su respuesta sísmica, puede ser imposible obtener un edificio sano, aunque el diseño estructural se efectúe correctamente. No sólo el ingeniero estructural, sino también el arquitecto, deben estar familiarizados con los efectos que las características de los materiales, la configuración geométrica, la distribución de los elementos de carga y rigidez, y el sistema estructural, tienen sobre el comportamiento sísmico de los edificios. Y los dos deben estar conscientes de la responsabilidad que comparten.

El anteproyecto estructural está íntimamente ligado con el arquitectónico. En esta etapa se selecciona el material más conveniente, se elige el sistema estructural y se efectúa la estructuración, escogiendo las posiciones más adecuadas para las trabes, las columnas, los muros de rigidez y los contraventeos, buscando obtener una estructura capaz de resistir sollicitaciones dinámicas intensas, que cambian de sentido un buen número de veces durante cada temblor. Para lograr ese objetivo tiene que contarse con elementos rígidos y resistentes ante fuerzas horizontales, distribuidos de manera que no produzcan torsiones excesivas, y ha de lograrse un equilibrio adecuado entre la resistencia y la rigidez de cada uno de ellos. En las zonas no sísmicas la posición de los elementos estructurales obedece exclusivamente a la necesidad de transmitir las cargas verticales a la cimentación; el tener en cuenta este único factor al estructurar los edificios que se construirán en las zonas sísmicas es acercarse peligrosamente, desde el principio, a la casi seguridad de un fracaso.

En esta fase se toman algunas de las decisiones más importantes del proceso de diseño, y es aquí donde destacan la experiencia, el criterio y la intuición del ingeniero estructural; también es la etapa en que la interacción ingeniero estructural - arquitecto debe ser más estrecha. Ni éste debe imponer un proyecto basado exclusivamente en aspectos estéticos y funcionales, ni aquél puede encerrarse en consideraciones que tengan que ver sólo con la resistencia y rigidez de la estructura. Los aspectos económicos son también fundamentales pues pueden, incluso, hacer que se abandone un proyecto ya iniciado.

La elección del material está regida, en buena medida, por el costo de la estructura resultante. En los edificios de pocos pisos destinados a habitación la mejor solución es, sin duda, la constituida por una serie de losas de concreto reforzado, apoyadas en muros de carga, que son necesarios para limitar los pequeños espacios requeridos y proporcionan, al mismo tiempo y sin costo adicional, los caminos para que las cargas verticales lleguen a la cimentación y la resistencia y rigidez laterales que se requieren para soportar los efectos de los temblores. El comportamiento de las construcciones de este tipo ha sido en general satisfactorio; sin embargo, dejan de ser factibles cuando aumenta la altura del edificio o cuando se

necesitan, en todas o en algunas de las plantas, grandes espacios libres, sin muros divisorios.

No hay tampoco dudas respecto al superior comportamiento de las estructuras de acero, comparadas con las de concreto reforzado suponiendo, en ambos casos, que el diseño se ha hecho correctamente; sin embargo, al menos en nuestro medio, el alto costo del acero estructural hace que su uso sea comparativamente reducido.

Los anteproyectos no deben limitarse a la superestructura; han de incluir, también, la cimentación. Poco influye aquí, aparentemente, el arquitecto, a quien no le corresponde esa parte de la construcción, que ni se ve ni interfiere con la operación del edificio. Sin embargo, el tipo y características de la cimentación sí quedan, con frecuencia, determinadas por las decisiones del arquitecto, que dictan, en buena manera, cómo y en qué puntos llegan a ella las cargas que le transmite la superestructura.

Aquí, el principal colaborador del ingeniero estructural es el especialista en mecánica de suelos; para obtener resultados satisfactorios debe haber una estrecha colaboración entre ambos; sin embargo, aunque esta colaboración debe ser más fácil que con el arquitecto, pues los dos son ingenieros y persiguen el mismo fin, la seguridad y el comportamiento adecuado de la construcción no ha sido en el pasado tan fructífera como podría esperarse; también aquí hay una fuente de posibles problemas, de mucha importancia en zonas sísmicas, en las que la interacción terreno-cimentación-superestructura adquiere gran relevancia.

De entre varios anteproyectos factibles se escoge el más adecuado, el que, una vez desarrollado arquitectónicamente hasta el nivel de detalle necesario, se convierte en el proyecto definitivo.

En seguida se determinan las solicitaciones que habrá de soportar la estructura. Las cargas vivas dependen sólo del uso que se le dará al edificio, y no de las características de la construcción ni de dónde se encuentre, pero los incrementos en ellas con respecto a las de diseño, ya sea por sobrecargas, intencionales o no, o por cambio de uso, tienen más importancia en estructuras construidas en zonas sísmicas, pues no sólo crecen los efectos directos en las cargas verticales, sino también los de los sismos. Las cargas muertas son función de algunas propiedades de la estructura, cuyo peso propio constituye una de las más importantes, pero su determinación no difiere de manera significativa en las estructuras diseñadas para zonas sísmicas. En cambio, a diferencia de lo que sucede con los efectos del viento, que en las construcciones urbanas dependen, casi exclusivamente, de la forma y dimensiones exteriores, la respuesta sísmica de una estructura sí es función, en muy buena parte, de sus propiedades, de la relación, que guardan con las del terreno en que se desplanta y de las características de los temblores a los que se

verá sometida. Aquí, de hecho, radica una de las particularidades más importantes de la ingeniería estructural en las zonas sísmicas.

Determinadas las solicitaciones, se utiliza el análisis estructural para evaluar los efectos que ocasionan en la estructura.

La gran complejidad de la mayoría de las edificaciones obliga a simplificarlas drásticamente para poderlas analizar: no se analiza el edificio real, sino un modelo del mismo. La elección de un modelo satisfactorio, que incluya las características más significativas de la construcción, es básica para que el análisis tenga algún sentido; de nada sirven los métodos más elaborados y matemáticamente más exactos si el modelo no representa de manera adecuada a la construcción real, o si ésta no se efectúa de manera que se comporte como se supuso que lo haría al elaborar el modelo. La concordancia entre el modelo y la construcción es mucho más importante y, al mismo tiempo, difícil de lograr, en el análisis ante las fuerzas sísmicas que en el de la carga vertical, pues la interacción de elementos estructurales y no estructurales, la relación entre resistencias y rigideces, la configuración espacial de la construcción, y el comportamiento conjunto de cimentación y superestructura, tienen mucho más importancia en el primer caso que en el segundo.

El producto del análisis son los elementos mecánicos, los momentos flexionantes, las fuerzas cortantes y normales, y los momentos de torsión, que habrán de ser resistidos por cada uno de los miembros que constituyen la estructura y por la estructura completa. El diseño consiste en determinar sus dimensiones de manera que se obtengan resistencia adecuada y condiciones de servicio satisfactorias. Si no se logra alguno de estos objetivos, puede ser necesario realizar un nuevo análisis que incluya las dimensiones modificadas de los elementos estructurales.

El comportamiento adecuado ante los efectos sísmicos exige un diseño mucho más cuidadoso que el requerido para las cargas permanentes, que permita jerarquizar las posibles formas de falla, evitando fenómenos que ocasionen disminuciones drásticas en la resistencia y capacidad de absorción de energía de las construcciones. Desgraciadamente, se sabe mucho menos acerca de la respuesta de los elementos estructurales bajo solicitaciones dinámicas, del tipo de las que producen los sismos, que sobre su comportamiento cuando las cargas son estáticas.

Los resultados del diseño obligan, a veces, a modificar el proyecto arquitectónico lo que, a su vez, puede hacer necesarios nuevos análisis y diseños.

La última etapa del proceso es la elaboración de los documentos necesarios para transmitir sus resultados al constructor. Para ello

se preparan planos y especificaciones, de importancia capital, pues con ellos se efectúa la construcción, resultado final de todo el proceso.

También la construcción demanda un cuidado mucho mayor que en las zonas no sísmicas, sobre todo en lo relativo a los detalles de los que depende la supervivencia de una estructura sometida a sollicitaciones dinámicas intensas.

SOLICITACIONES

El objeto de una construcción urbana es crear espacios en los que se viva y se trabaje en condiciones adecuadas de seguridad y confort; para ello, la estructura debe tener la resistencia suficiente para soportar la combinación de sollicitaciones ocasionada por las cargas verticales y el viento o sismo y, además, tener la rigidez adecuada para que sus deformaciones, bajo esas sollicitaciones, no sean excesivas, con lo que se evita el pánico entre los ocupantes, al menos en temblores no demasiado intensos, se reducen a un mínimo los daños en los elementos no estructurales y en las instalaciones y se regulan los efectos de segundo orden, provenientes de la interacción de cargas verticales y desplazamientos horizontales, que pueden influir, de manera significativa, en la resistencia de estructuras flexibles.

Las cargas muertas se determinan generalmente con buena precisión; ésta disminuye al evaluar las cargas vivas, pero sigue siendo aceptable. En cambio, las incertidumbres relativas a las acciones accidentales, viento y sismo, principalmente, son muy grandes, pues se trata de fenómenos naturales que no pueden ser dominadas por el hombre. Sin embargo, los vientos intensos son frecuentes, y se sabe mucho sobre ellos, lo que permite determinar sus valores de diseño en forma confiable. No sucede lo mismo con los temblores de tierra, cuyas intensidades y características son por ahora, y quizá lo serán siempre, impredecibles.

La mayor parte de las incertidumbres acerca del diseño estructural en las zonas sísmicas, que hace que difiera por completo de todos los problemas restantes de diseño estructural, proviene del desconocimiento de las acciones máximas a las que puede verse expuesta la construcción. La determinación de las sollicitaciones que producen en un puente los vehículos que transitan sobre él puede ser complicada, y se presentan ciertas dificultades al evaluar sus efectos dinámicos; sin embargo, se conocen las características y el peso de los vehículos y si éste aumenta, porque se fabriquen camiones más largos y pesados, el puente se refuerza, se sustituye por otro más resistente, o se prohíbe que transiten por él vehículos que tengan características que no se consideraron al diseñarlo. ¡Ojalá pudiese hacerse algo semejante con los temblores de tierra!

La base del diseño sísmico de los edificios no la constituye el temblor más intenso que deberán resistir, que no se conoce, sino los sismos que han ocurrido, en el pasado, en el lugar donde se construirán; como la información cuantitativa que se posee en la mayoría de los países es muy limitada, de unas cuantas décadas a lo sumo, que son un instante en la vida de nuestro planeta, poco se sabe acerca del temblor de diseño.

Es como si los puentes se proyectasen para resistir, no los vehículos que se sabe transitarán sobre ellos, sino los obtenidos de un estudio probabilístico que proyectase a futuro la evolución de su peso y demás características, tomando como punto de partida las carretas de tracción animal que los atravesaban hace poco menos de cien años.

La ingeniería estructural en las zonas sísmicas se enfrenta con un problema que aparentemente no tiene solución: escoger sistemas estructurales, y dimensionar los elementos que los componen, para que resistan solicitaciones desconocidas, por medio de mecanismos de respuesta que tampoco se comprenden por completo.

La teoría que se considera más confiable en la actualidad para explicar las causas de los terremotos de gran magnitud es la llamada "tectónica de placas"; de acuerdo con ella, la mayoría de los temblores de tierra se origina a lo largo de las fronteras entre las placas que componen la corteza terrestre. Casi todos los sismos de gran magnitud que afectan a la República Mexicana tienen este origen: se deben a la subducción de la placa de Cocos bajo la de Norteamérica, frente a las costas de Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán. La teoría no explica, sin embargo, algunos temblores, menos frecuentes, pero a veces muy severos, que se originan en regiones alejadas de los bordes de las placas.

La amplitud y el contenido de frecuencias de las ondas que produce un sismo en un sitio dado dependen de la magnitud del sismo, de la distancia del sitio a la zona donde se generó, de las propiedades mecánicas del medio que atraviesan para llegar al sitio y de las características del suelo en éste. Puede haber amplificaciones de ondas de determinadas frecuencias cuando pasan por estratos de suelos con ciertas propiedades, con lo que aumenta o disminuye la amplitud de los movimientos, y su frecuencia varía. Las características locales del suelo en el sitio son también determinantes: de todos son conocidas las enormes amplificaciones que se presentan en la zona de los antiguos lagos, en la que está construida buena parte de la Ciudad de México, sobre gruesas capas de arcillas con grandes contenidos de agua, con respecto a los movimientos en las áreas de suelos firmes que la rodean.

Como las ondas que originan el movimiento del suelo en que se desplanta una construcción provienen de la zona de ruptura de una falla, llegan al edificio con una dirección determinada, pero las

características de esas ondas, su interacción y los efectos locales, geológicos y topográficos, hacen que el movimiento real del suelo resulte aleatorio, predominantemente horizontal, con frecuencia con algún énfasis direccional, y con un componente vertical que a veces es importante. En lo que concierne a un edificio determinado, los efectos de un temblor se ven afectados hasta por las características de las construcciones vecinas, su geometría, masa y tipo de cimentación. Como sucede con muchos fenómenos físicos, se conocen los mecanismos que originan el movimiento del suelo, pero la interacción de las diversas partes que lo componen ocasiona efectos complejos e impredecibles.

El estudio de los mecanismos que originan los terremotos y de la manera en que sus efectos se transmiten al terreno vecino a la zona de ruptura no le corresponde a los ingenieros estructurales sino a los geofísicos, geólogos y sismólogos; al ingeniero estructural le interesan las acciones sísmicas más desfavorables que habrá de resistir el edificio que proyecta construir en un lugar determinado pero él, como persona, no está capacitado para evaluarlas; le faltan preparación básica, acceso oportuno a toda la información relevante y, sobre todo, tiempo.

Hay organismos, en instituciones educativas y oficiales, cuyas funciones son realizar los estudios de sismología y sismicidad necesarios para determinar las acciones de diseño mencionadas en el párrafo anterior, y ponerlas en conocimiento de los ingenieros que proyectarán las estructuras. En la Ciudad de México el último paso se lleva a cabo por medio del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo, documentos de carácter legal y obligatorio que forman la base de la ingeniería estructural en el Distrito Federal. De acuerdo con ellos, toda la información obtenida por medio de estudios laboriosos y complicados realizados a lo largo de años de mediciones de temblores reales, de interpretación de la información obtenida y de desarrollo y aplicación de elegantes modelos matemáticos, se reduce a dos datos principales en los que se basa el diseño estructural: el coeficiente sísmico y el espectro de diseño.

El coeficiente sísmico, c , se define como "el cociente de la fuerza cortante horizontal que debe considerarse que actúa en la base de la construcción por efecto del sismo, entre el peso de ésta sobre dicho nivel. Con este fin se tomará como base de la estructura el nivel a partir del cual sus desplazamientos con respecto al terreno circundante comienzan a ser significativos". Este coeficiente se emplea como un índice de la acción de diseño; sirve de base para la construcción de los espectros de diseño, o puede usarse directamente para evaluar, mediante métodos estáticos, las fuerzas horizontales que habrán de ser resistidas por la estructura.

T A B L A 1

COEFICIENTES SISMICOS EN LOS REGLAMENTOS DEL DISTRITO FEDERAL

AÑO	GRUPO	ESTRUCTU RACION	COEFICIENTE SISMICO			CASO	Q	COEFICIENTE SISMICO/Q			GRUPO A
			ZONA I	ZONA II	ZONA III			ZONA I	ZONA II	ZONA III	
1942	III A VI	-----	0.025								I.- x 4.0 II.- x 2.0
1957*	B	TIPO 1	0.05	0.06	0.07						x 2.0
1966	B	TIPO 1	0.04	-----	0.06						x 1.3
1976	B	TIPO 1	0.16	0.20	0.24	2	4.0	0.04	0.05	0.06	x 1.3
1985*	B	TIPO 1	0.16	0.27	0.40	I	4.0	0.04	0.068	0.10	x 1.5
1987	B		0.16	0.32	0.40	I	4.0	0.04	0.08	0.10	x 1.5

En la Tabla 1 se muestran los valores que han tenido los coeficientes sísmicos especificados en los Reglamentos de Construcciones para el D.F., para los tipos de estructuras más comunes, desde 1942 hasta nuestros días. Se observan en ella varios aspectos interesantes:

1. Los efectos del temblor del 28 de julio de 1957 demostraron que la respuesta de las construcciones ante un sismo determinado depende tanto de las características propias de la estructura como del tipo de suelo en que se apoya. Para tener en cuenta esos factores se dividió el Distrito Federal en tres zonas, y se varió el coeficiente sísmico de diseño en función de la zona en que se encuentra la estructura y de las características de la edificación. Los coeficientes más altos corresponden a la zona III, integrada por potentes depósitos de arcilla, altamente compresibles, de origen lacustre.

2. En 1976 se aumentan los valores de los coeficientes sísmicos, multiplicando por cuatro los de 1966, y se introduce el factor de ductilidad Q, que depende de las características del

sistema estructural, entre el que se divide el coeficiente c para calcular las fuerzas de diseño. El procedimiento es más racional, pues tiene en cuenta las diferentes capacidades de disipación de energía por comportamiento inelástico de los diversos materiales y sistemas estructurales, pero los valores de c y Q se escogen de manera que para las construcciones más comunes se sigan obteniendo las mismas fuerzas sísmicas de diseño que en 1966.

3. Después de los terremotos del 19 y 20 de septiembre de 1985 se aumentan significativamente los coeficientes sísmicos de la zona III, en vista de que todos los edificios colapsados y la mayoría de los que sufrieron daños importantes se encontraban en ella; los de la zona II se incrementan en menor proporción, y no se modifican los de la I, en la que no hubo daños. Hay también cambios en los valores de Q , que reflejan el comportamiento observado de los edificios, pero se conserva $Q = 4.0$ para los sistemas estructurales más comunes, aunque haciendo más estrictos los requisitos que han de satisfacerse para tomar ese valor.

4. En el Reglamento de 1987 se conservan los coeficientes sísmicos de las zonas I y III y se incrementa el de la II; el resultado final, con respecto a 1976, es que se mantiene el coeficiente c en la zona I y se aumentan, en porcentajes prácticamente iguales, los de las zonas II y III ($0.32/0.20 = 1.60$ para la II y $0.40/0.24 = 1.67$ en la III), lo que no está de acuerdo con el comportamiento de las construcciones en las tres zonas, durante los temblores de septiembre de 1985. Los factores Q , llamados ahora "factores de comportamiento sísmico", para indicar que dependen de otros aspectos, además de la ductilidad de la estructura, no tienen cambios significativos.

El factor de importancia por el que se multiplican los coeficientes sísmicos de diseño de las construcciones del grupo B para obtener los de las del grupo A, ha cambiado de valor varias veces a lo largo del tiempo.

Independientemente de la poca o mucha profundidad y confiabilidad que tengan los estudios con los que se han determinado, en cada caso, los valores de los coeficientes c y Q , una vez que aparecen en el Reglamento se vuelven de observancia obligatoria para los ingenieros que diseñan las estructuras que se construirán en el Distrito Federal.

Las magnitudes de los coeficientes sísmicos provienen, casi exclusivamente, de la observación del comportamiento de las estructuras durante los temblores que han sacudido a la ciudad en los últimos 30 o 40 años; por eso se han conservado, sin cambio, en la zona I, y han crecido significativamente en las otras dos zonas.

Poco se reflejan en ellos los estudios de riesgo sísmico y las

investigaciones sobre los temblores de tierra importantes acaecidos en el pasado. El que las estructuras construidas en los terrenos firmes que rodean a los antiguos lagos no hayan sufrido daños sólo indica que los últimos temblores destructivos se han originado a gran distancia del Distrito Federal, a lo largo de la costa del Océano Pacífico, pero se sabe que en el pasado ha habido temblores con otras características, que han ocasionado daños en estructuras intactas en las últimas décadas. También llama la atención que los coeficientes sísmicos de las Normas de Emergencia de 1985, publicadas un mes después de los temblores de septiembre de ese año, se conserven casi sin cambios en el Reglamento de 1987, después de año y medio de estudios muy intensos sobre sismicidad y riesgo sísmico.

En la Fig. 1 aparecen los espectros elásticos de diseño que son la base del análisis dinámico modal, correspondientes a los Reglamentos de 1976 y 1987 y a las Normas Técnicas de Emergencia de 1985; se advierten en ellos los mismos aspectos que se acaban de mencionar al discutir los coeficientes sísmicos, y al compararlos con el espectro correspondiente al acelerograma registrado el 19 de septiembre de 1985 en los terrenos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes aparecen nuevas y graves incertidumbres (Fig. 2).

Es claro que las estructuras que alcancen en su primer modo de vibrar un periodo natural próximo a los 2 segundos corren un grave riesgo de entrar en una condición muy cercana a la resonancia, que ocasionaría enormes incrementos en las aceleraciones a que quedarían sujetas y en las fuerzas dinámicas que habrán de soportar. El espectro de aceleraciones de S.C.T. muestra que el temblor del 19 de septiembre produjo aceleraciones del orden de g en estructuras elásticas de un grado de libertad con periodo natural $T = 2$ seg y 5 por ciento de amortiguamiento, las que crecieron hasta $1.67 g$, aproximadamente, al reducirse el amortiguamiento a dos por ciento del crítico. El riesgo se agudiza en las construcciones con periodo fundamental algo menor que 2 segundos, pues el deterioro que sufren durante los primeros ciclos de carga producidos por un temblor largo las debilita y acerca, cada vez más, a la condición crítica. Este fenómeno se agrava con el tiempo, al quedar sometido el edificio a una sucesión de temblores, aunque ninguno de ellos sea demasiado intenso. A todas las incertidumbres del diseño sísmico se suma una más: se sabe poco sobre las características dinámicas de un edificio cuando se termina de construir, y nada sobre cómo se habrán modificado cuando tenga que resistir un temblor de gran intensidad.

En casi todos los problemas de diseño estructural interesa la sollicitación máxima que deberá resistir la estructura, sin importar demasiado la historia completa del proceso de carga; la importancia de los espectros de respuesta proviene de una extrapolación de ese concepto al diseño sísmico. Sin embargo, ahora sí tiene interés la historia de carga, ya que la estructura puede deteriorarse durante temblores de gran duración, o a lo largo de varios temblores

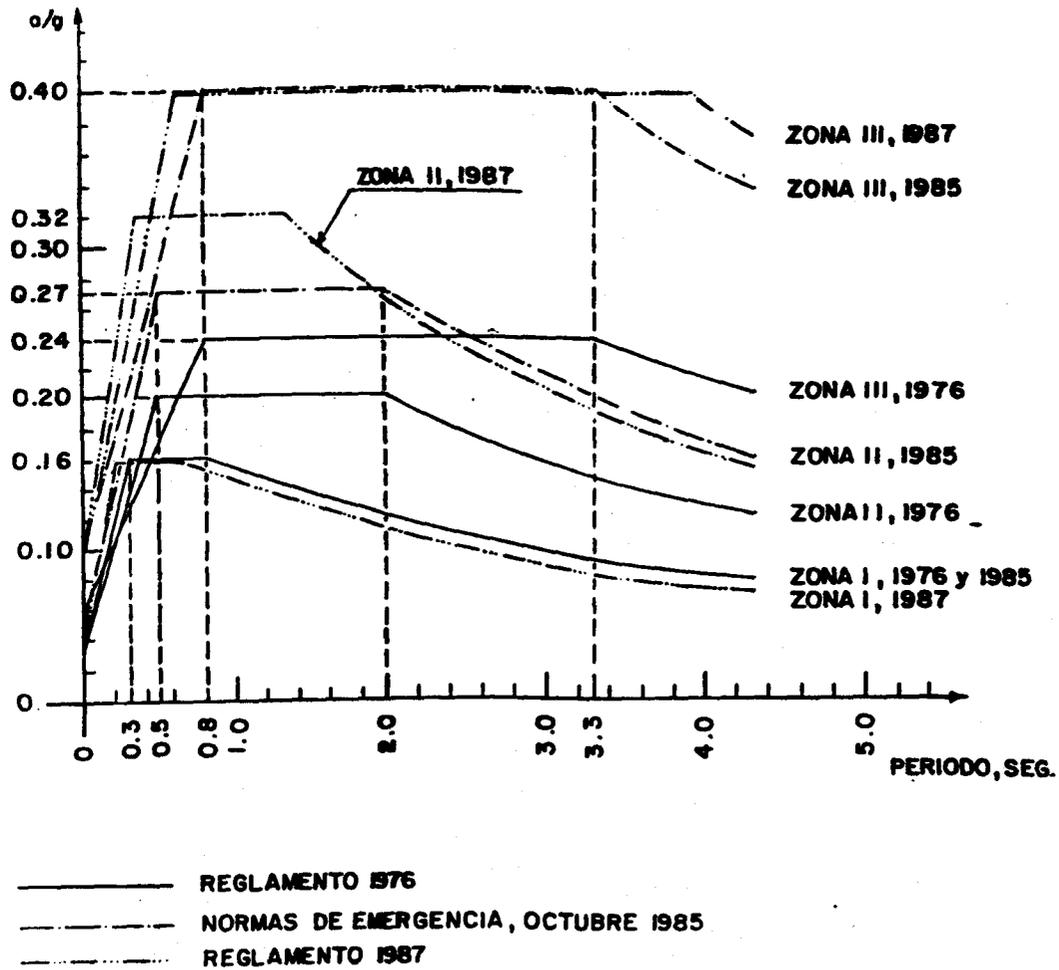
sucesivos, a causa, sobre todo, de las excursiones que realiza fuera del intervalo elástico; los espectros de respuesta se obtienen considerando comportamiento elástico ilimitado, por lo que el diseño basado en ellos puede adolecer de graves deficiencias.

Los coeficientes sísmicos y los espectros de respuesta especificados en el Reglamento y sus Normas Técnicas Complementarias se han escogido de manera que las construcciones diseñadas tomándolos como punto de partida no sean excesivamente costosas, y se ha dejado a la ductilidad y el amortiguamiento el papel de impedir que las sollicitaciones reales excedan demasiado a las de diseño, lo que podría conducir al colapso del edificio. Sin embargo, la demanda de ductilidad en estructuras con características dinámicas que las acerquen a la resonancia y, más todavía, si su amortiguamiento es menor de 5 por ciento del crítico, puede ser excesiva; en efecto, grandes demandas de ductilidad implican deformaciones muy importantes y daños estructurales considerables y progresivos, que pueden llevar al colapso.

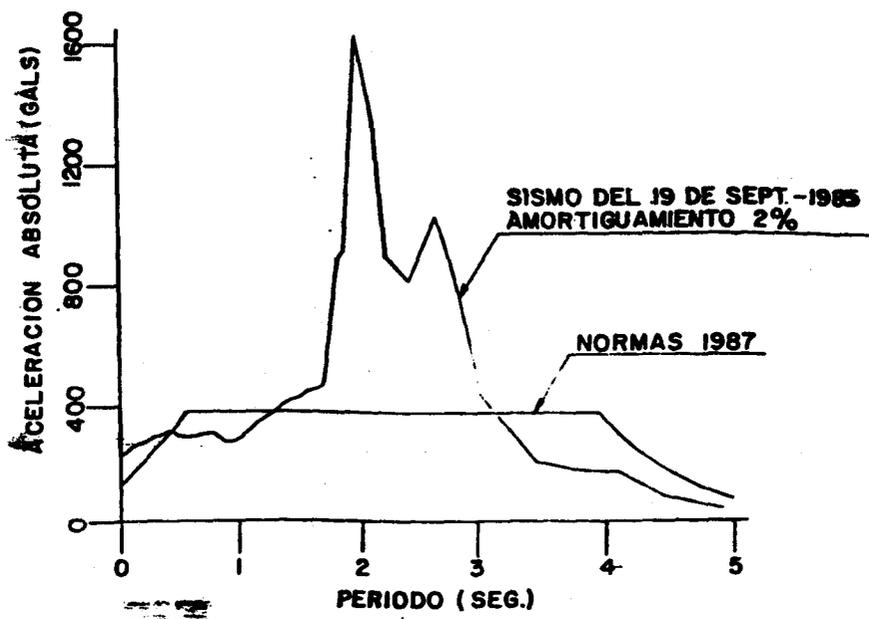
No se conoce el grado de amortiguamiento de las estructuras, y menos aún el del complejo conjunto constituido por ellas, muros de lindero e interiores, losas y escaleras, pero sí se sabe que muchas construcciones modernas, que carecen casi por completo de muros rígidos y resistentes, tienen porcentajes de amortiguamiento menores que el 5 por ciento implícito en el Reglamento, por lo que su respuesta sísmica puede incrementarse sustancialmente. Este problema se agrava en las estructuras de acero, sobre todo si sus conexiones son soldadas.

Algunas estructuras diseñadas de acuerdo con el reglamento en vigor tienen niveles de seguridad menores que los deseables e, incluso, pueden llegar al colapso ante temblores semejantes a los que se han presentado en las últimas décadas; un caso claro es el de los edificios con periodos fundamentales de vibración comprendidos entre 1.5 y 2 segundos, construidos en las zonas de la ciudad donde el terreno vibra con un periodo semejante; no es casualidad que el mayor porcentaje de construcciones colapsadas o con daños graves se haya presentado entre las que tienen esas características, ni es tampoco casual el excelente comportamiento de edificios como la Torre Latinoamericana o la de Pemex las que, por su gran altura y esbeltez, tienen periodos fundamentales del orden de 4 segundos. Las construcciones rígidas desplantadas en terrenos resistentes pueden constituir otro caso crítico, si llegan a presentarse temblores intensos de epicentro cercano.

Los fenómenos indicados en el párrafo anterior no están cubiertos adecuadamente por el Reglamento; les toca a los ingenieros estructurales la responsabilidad de evitarlos tomando medidas tan drásticas, si es necesario, como la de no diseñar estructuras de altura peligrosa para la zona en que vayan a construirse. La



ESPECTROS ELASTICOS DE DISEÑO, SEGUN LOS REGLAMENTOS DEL D.F.
 FIG. 1



ESPECTROS COMPARATIVOS
 FIG. 2

cooperación de propietarios y arquitectos es, en este aspecto, indispensable.

No nos dejemos llevar tampoco por la impresión de que los fenómenos mencionados son críticos en todos los problemas de ingeniería estructural en zonas sísmicas. Muchos de ellos lo son tan sólo en terrenos como los de los antiguos lagos del Valle de México los que, sin duda, representan un porcentaje importante del área que ocupa la ciudad, pero no son comunes a toda ella ni, mucho menos, típicos de la mayor parte de las zonas sísmicas del país.

ANALISIS

El método de análisis sísmico más sencillo y, probablemente, el más utilizado en la actualidad, es el llamado método estático, que consiste en determinar un conjunto de fuerzas horizontales, aplicadas en los pisos del edificio, cuya suma, en la base de éste, es igual al producto del coeficiente sísmico, especificado en los códigos, por el peso total de la construcción. Las fuerzas laterales se distribuyen en la altura siguiendo una ley de variación triangular, con el vértice en la base, tratando de reproducir aproximadamente la respuesta del edificio en su primer modo de vibrar, que suele ser el que tiene un papel más importante en la respuesta total; algunos códigos incluyen las contribuciones de los modos superiores, en forma toscamente aproximada, aplicando una fuerza horizontal adicional en el piso superior. Cuando se emplea este método no se tiene en cuenta el carácter dinámico de las sollicitaciones sísmicas ni la influencia de las características de la edificación en la magnitud de las fuerzas aunque, en algunos casos, la fuerza cortante basal se hace depender de un periodo fundamental de vibración que se determina con una fórmula empírica basada en las dimensiones generales de la construcción.

Para tener en cuenta las características de los edificios y las de los temblores a que quedarán sometidos, se han desarrollado métodos de análisis dinámico, en los que se estudia un modelo del edificio consistente en masas concentradas en los pisos, ligadas entre sí por resortes cuya rigidez lateral y torsional depende de las características de la estructura y de los elementos que, aun no siendo estructurales, contribuyen a resistir las fuerzas sísmicas, como son las fachadas y muros interiores. Casi siempre se supone que la estructura se apoya en un terreno indeformable, que los sistemas de piso y las vigas son rígidos, y que las columnas pueden deformarse lateralmente, pero no en la dirección vertical.

Por medio de un análisis modal completo se obtiene la historia de la respuesta de la estructura sometida a aceleraciones especificadas del suelo, que varían con el tiempo; conocida la historia completa, las sollicitaciones máximas se evalúan con facilidad. El análisis se

efectúa determinando la respuesta, en función del tiempo, de cada uno de los modos naturales de vibrar del edificio, considerando un sistema de un grado de libertad con propiedades representativas del modo particular y de la forma en que es excitado por el movimiento producido por el sismo, y combinando las respuestas de todos los modos.

Los valores máximos de las respuestas pueden obtenerse realizando un análisis modal espectral, con el que se determinan las respuestas máximas de cada modo, partiendo de los espectros de diseño especificados en los reglamentos; esas respuestas se combinan para obtener la máxima del sistema completo, lo que suele hacerse con el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados.

El enfoque dinámico es más apropiado que el estático, sobre todo para edificios irregulares, pero sigue teniendo muchas imprecisiones; buena parte de ellas proviene de la suposición de que el comportamiento del edificio es exclusivamente elástico, lo que deja de ser cierto bajo temblores de mediana o gran intensidad.

Las construcciones importantes se analizan a veces teniendo en cuenta, al modelarlas, su comportamiento inelástico, y sometiendo el modelo a temblores de características adecuadas; la respuesta inelástica, a lo largo del tiempo, se determina con un proceso de integración paso a paso. Este es el método más preciso de análisis sísmico con que se cuenta en la actualidad, al menos desde un punto de vista conceptual; sin embargo, la intensidad, duración y demás características de los temblores futuros permanecen, como siempre, desconocidas, lo que, aunado al costo y complejidad del método, hace que se emplee principalmente como herramienta de investigación, y poco para diseñar edificios.

En los últimos tiempos ha habido una tendencia generalizada a enfatizar las muchas hipótesis, poco precisas, involucradas en los métodos estáticos de análisis sísmico y a considerar que el análisis dinámico es la solución perfecta. Sin embargo, aunque esto puede ser cierto desde un punto de vista teórico, la realidad es que las incertidumbres que hay en el análisis dinámico son tantas que sus resultados pueden estar muy lejos de representar, de manera razonable, el comportamiento real de la estructural.

Las incertidumbres empiezan donde siempre: es imposible predecir las características de los temblores futuros en un sitio determinado.

Tampoco se conoce el amortiguamiento de las construcciones, del que dependen en buena parte sus respuestas dinámicas, y se sabe todavía menos sobre cómo se modificará esa propiedad a lo largo del tiempo, puesto que es función de las características de la estructura y de las de muchos elementos no estructurales, así como de complejas interacciones de los segundos con la primera.

Otra seria incertidumbre proviene de la reducción que debe hacerse en la respuesta elástica lineal al considerar la ductilidad de la estructura. Uno de los procedimientos más comunes consiste en dividirla entre un factor, función de las características de la estructura, que varía de uno a cuatro o más. Es evidente la influencia que tiene ese factor en los resultados finales del análisis dinámico; sin embargo, sus valores no pueden calcularse, si no son producto del juicio de quienes los fijaron.

La obtención del modelo matemático necesario para analizar un edificio está sujeta también a incertidumbres importantes. En la construcción moderna se usan con frecuencia los muros de cortante, combinados con marcos rígidos, para resistir las fuerzas laterales; es difícil, y a veces imposible, determinar de manera satisfactoria la rigidez de esos sistemas. Los muros divisorios no estructurales y las fachadas de paneles prefabricados incrementan considerablemente la rigidez del conjunto, a menos que se construyan de manera que puedan moverse libremente con respecto a la estructura, lo que no siempre es fácil de lograr. Los sistemas de piso y las rampas de las escaleras modifican también la rigidez lateral. Y todas esas rigideces, así como las de los marcos de concreto reforzado, cambian durante un temblor, debido a agrietamiento y deterioro progresivo, y a lo largo del tiempo, al representarse una sucesión de temblores. Además, el deterioro no es uniforme, lo que altera la distribución de las fuerzas sísmicas entre los elementos resistentes y modifica las torsiones, que pueden incrementarse considerablemente con respecto a las que había en la estructura inicial.

La interacción suelo-cimentación-estructura introduce nuevos fenómenos desconocidos, o ignorados en el análisis. Para evaluar las fuerzas sísmicas de diseño suele suponerse que el movimiento del suelo en la base de la cimentación es el de campo libre, que se presentaría si no hubiese ningún edificio, lo que es correcto sólo si el suelo es rígido. Cuando el terreno es blando, el periodo fundamental del edificio tiende a crecer, a causa de la componente rotacional del movimiento de la cimentación. Además, la mayor parte de la energía transmitida a la construcción durante el sismo se pierde por radiación de las ondas sísmicas hacia fuera de la cimentación, y por amortiguamiento del material del suelo debido a la acción inelástica histerética que tiene lugar en él. Como una consecuencia, las fuerzas sísmicas tienden a reducirse, mientras crecen los desplazamientos laterales y el efecto $P \Delta$.

Es claro que la respuesta sísmica de la estructura es función del tipo de cimentación, efecto que tampoco suele considerarse en el análisis y sobre el cual se cuenta, en la actualidad, con muy poca información.

¿Y qué puede decirse de la influencia de las características de las

edificaciones vecinas y de sus cimentaciones? No se sabe cómo determinarla, y aunque se supiese no serviría de mucho, ya que no se conocen los cambios que habrá en el futuro en las construcciones cercanas a un sitio dado.

Todo lo anterior pone en evidencia que los métodos dinámicos, muy precisos en teoría, no lo son en realidad al aplicarlos a construcciones reales. Y queda también la duda de cuál es la utilidad real de los estudios teóricos, de gran precisión aparente, en los que se investiga, por ejemplo, el comportamiento de marcos rígidos planos aislados, a los que se les han quitado todos los factores que hacen que el comportamiento de las edificaciones sea tan extraordinariamente complejo.

Al terminar el análisis sísmico, realizado con cualquiera de los métodos mencionados, se cuenta con un conjunto de fuerzas estáticas horizontales que reproducen, con más o menos precisión, las fuerzas de masa que el movimiento del suelo ocasiona en la edificación. La obtención de los elementos mecánicos de diseño se efectúa ahora con cualquiera de los métodos usuales. Los más comunes son los matriciales, realizados con la ayuda de computadoras electrónicas, que están basados en un comportamiento elástico lineal ilimitado de la estructura y los elementos que la componen; sin embargo, la mayoría de los reglamentos permiten redistribuciones, más o menos arbitrarias, de los elementos mecánicos, para tener en cuenta, aunque sea en forma burdamente aproximada, las deformaciones inelásticas que preceden a la falla de la estructura.

DISEÑO

Las estructuras pueden diseñarse, al menos en teoría, de manera que tengan la resistencia y rigidez suficientes para que su respuesta ante la combinación de acciones verticales y sísmicas sea predominantemente elástica, pero al hacerlo se obtienen soluciones mucho más costosas que las que se han empleado tradicionalmente en edificios construidos en zonas sísmicas que han tenido, en general, un comportamiento satisfactorio ante temblores reales. Este tipo de soluciones es recomendable en estructuras especiales, en las que se desee mantener los daños con niveles muy bajos, aun cuando queden sometidas a temblores de gran intensidad, como sucede con las centrales nucleoelectricas.

En la mayoría de las construcciones convencionales los problemas económicos hacen que no se justifique la solución anterior, ya que el aumento de costo requerido para resistir vibraciones laterales de gran intensidad debe analizarse tomando en cuenta la importancia de la estructura y la probabilidad de ocurrencia de los temblores. Esto lleva a la filosofía actual del diseño de edificios que se construirán en zonas sísmicas, de donde provienen los criterios para

figurar los niveles de carga indicados en los reglamentos modernos: los edificios deben ser capaces de resistir temblores menores sin sufrir daños, temblores moderados sin daños estructurales, pero con algunos daños en elementos no estructurales, y temblores muy intensos sin colapso, pero con daños no estructurales y estructurales. Se acepta, pues, la posibilidad de que la construcción sufra desperfectos importantes, pero no la de que se pierdan vidas. El objetivo de los códigos es obtener estructuras que se comporten elásticamente bajo temblores que puede esperarse que ocurran más de una vez durante la vida del edificio y que sean capaces de sobrevivir, sin colapso, el temblor de intensidad máxima que es probable que se presente durante ella. Para evitar el colapso durante el temblor más intenso los miembros, y la estructura en conjunto, han de poseer ductilidad suficiente para absorber y disipar energía por medio de deformaciones postelásticas, lo que exige excursiones importantes en el intervalo inelástico, con poca o ninguna pérdida de resistencia. La ductilidad necesaria puede estar asociada, en casos extremos, con deformaciones permanentes muy grandes, de manera que aunque no se presente el colapso de la estructura los daños que sufra pueden ser tales que no resulte económico repararlos, y la construcción se pierda por completo.

A raíz de los últimos temblores intensos, sobre todo los de la Ciudad de México en septiembre de 1985, empieza a cuestionarse, si no la filosofía en sí, al menos el nivel de daños que debe permitirse durante movimientos de tierra muy intensos, pues los costos de reparación y refuerzo de las construcciones son tan elevados que seguramente se justifica aumentar la inversión inicial para disminuir los riesgos de que se presenten daños importantes en estructura, acabados o instalaciones.

Las características principales que debe tener un edificio que se va a construir en una zona sísmica son resistencia y rigidez suficientes y ductilidad adecuada.

La ductilidad no es indispensable, en teoría, puesto que pueden construirse estructuras que, también en teoría, se comporten elásticamente bajo temblores de cualquier intensidad; constituye, sin embargo, una manera económica de obtener estructuras capaces de soportar temblores intensos, si bien sufriendo daños que pueden ser importantes. Además, como no se conocen las características del temblor más desfavorable a que quedará sometida la construcción, no puede suprimirse la ductilidad, al menos en zonas críticas de la estructura, sin correr el riesgo de que el comportamiento real esté muy por debajo del previsto.

En las últimas décadas se ha dado una importancia excesiva a la ductilidad; los reglamentos de diseño sísmico han estimulado el uso de estructuras dúctiles, generalmente flexibles, y han penalizado a las rígidas, a pesar de que en los últimos temblores, ocurridos en

distintas partes del planeta, se ha comprobado, de manera sistemática, el superior comportamiento de las estructuras rígidas y resistentes, especialmente si se les proporciona ductilidad adecuada en las zonas donde pueden concentrarse las deformaciones inelásticas.

En su libro *"Estructuras de concreto reforzado"*, R. Park y T. Paulay afirman lo siguiente:

"Como es imposible predecir con precisión las características de los movimientos de tierra que pueden ocurrir en un sitio dado, también es imposible evaluar el comportamiento completo de una estructura sometida a sismos intensos de características desconocidas. Sin embargo, las estructuras pueden diseñarse y construirse de manera que tengan características que aseguren que su comportamiento será el más deseable. En términos de daños, ductilidad, disipación de energía, o falla, ha de lograrse una secuencia deseable en el deterioro y en la destrucción eventual de la compleja cadena de resistencia de la estructura, lo que implica una jerarquización adecuada de sus modos de falla, que sólo puede lograrse si se conoce la resistencia de cada uno de los eslabones que forman esa cadena, es decir, de cada uno de los elementos que componen la estructura.

"A pesar de la naturaleza probabilística del fenómeno, la mejor manera de obtener una estructura que se comporte satisfactoriamente ante temblores de intensidad media, y no llegue al colapso durante terremotos catastróficos consiste, dados los conocimientos actuales, en distribuir determinísticamente sus propiedades de resistencia y ductilidad para obtener el modo de falla más conveniente. Esta filosofía puede incorporarse en un proceso de diseño basado en la resistencia última de la estructura, durante el cual se escogen y detallan adecuadamente los elementos que formarán parte de los mecanismos disipadores de energía, y se proporciona a los elementos estructurales restantes resistencia suficiente para asegurar que los mecanismos escogidos conservarán toda, o casi toda, su resistencia durante los ciclos de carga y deformación producidos por el temblor."

La obra citada se publicó en 1975; sin embargo, los aspectos señalados siguen en vigor hoy en día. Ha de tenerse en cuenta, además, que las construcciones reales son mucho más complejas que los modelos que se emplean para analizarlas y diseñarlas, por lo que para lograr el comportamiento deseable mencionado deben satisfacerse requisitos adicionales de simetría, uniformidad a lo largo de la altura, trabajo de conjunto, etc.

Buena parte de los conocimientos que sirven de base para el proyecto y diseño estructural de las edificaciones que se construirán en zonas sísmicas proviene de la observación del comportamiento de edificios reales durante sismos reales, entre los que ocupa un lugar principalísimo el terremoto del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México, pues ha sido el temblor de tierra más destructivo que ha

afectado a una gran ciudad en toda la historia de la humanidad. Del estudio de las estructuras colapsadas o muy dañadas y de las que no han sufrido daños, o en las que éstos fueron reducidos, se deduce que las estructuras tienen, en general, una resistencia ante fuerzas sísmicas mucho mayor que la prevista en los códigos; de no ser así, los daños que producen los temblores serían mucho mayores y, en el caso particular de la Ciudad de México, hubiera fallado la inmensa mayoría de los edificios de cierta altura situados en las zonas en las que los efectos de los sismos fueron más intensos.

Pero también se pone de manifiesto que esa vital resistencia extra puede perderse con facilidad si se descuidan aspectos que, poco importantes en las estructuras que habrán de resistir sólo cargas predominantemente verticales se vuelven de vida o muerte cuando las sacude un sismo intenso.

Entre los factores principales que pueden hacer que la resistencia de los sistemas estructurales disminuya drásticamente, sobre todo ante temblores de larga duración, se encuentran los siguientes:

- Concepción arquitectónica defectuosa que ocasione torsiones excesivas, cambios bruscos de rigidez de un entrepiso a otro, formas de vibrar incompatibles de las diferentes partes que componen una construcción irregular en planta, transmisión de cargas verticales y efectos sísmicos a zonas localizadas y mal escogidas del terreno.
- Fallas prematuras de tipo no dúctil, por cortante o por pandeo.
- Demandas excesivas de ductilidad en secciones o elementos críticos.
- Conexiones y otros detalles mal concebidos o realizados.
- Efecto $P \Delta$, que se incrementa por la pérdida de rigidez gradual de la construcción y su interacción con el suelo.
- Construcción defectuosa.
- Resonancia por coincidencia entre las características del temblor y las formas de vibrar del terreno y el edificio.
- Modificaciones a la estructura y/o elementos "no estructurales": aumento de pisos, eliminación o cambio de posición de muros.
- Cargas vivas mayores que las de diseño, sobre todo en los niveles superiores, por cambio de uso del edificio o creación de archivos muertos.
- Deterioro del sistema estructural a lo largo del tiempo, ocasionado por intemperismo, temblores de tierra, hundimientos diferenciales de la cimentación.
- Modificaciones en las rigideces de los elementos resistentes, por deterioro progresivo de muros y/o elementos estructurales.
- Refuerzo de la cimentación o modificación de sus características (por ejemplo, colocación de pilotes en un edificio

que no los tenía originalmente), provocados por un comportamiento inadecuado, que puede ser causa de que aumenten los efectos que transmite el terreno a la superestructura, durante un temblor, y de que disminuya la cantidad de energía disipada por radiación o por comportamiento inelástico del suelo.

Los efectos anteriores no pueden tenerse en cuenta con un simple incremento de los coeficientes sísmicos de diseño.

CONCLUSIONES

La base del diseño debe estar constituida por un coeficiente sísmico razonable, ni demasiado bajo ni excesivamente alto, y por espectros de diseño que tomen en cuenta las características probables de los temblores futuros y la interacción suelo-estructura, función de los parámetros que definen los modos de vibrar de uno y otra.

Escogidos el coeficiente sísmico y el espectro de diseño deben buscarse, por medio de un diseño arquitectónico y estructural adecuado y de una construcción cuidadosa, lo que requiere una supervisión también cuidadosa, en la que debe intervenir el proyectista estructural, construcciones en las que se eliminen los fenómenos que se sabe son desfavorables para su comportamiento ante sismos, y que sean capaces de resistir, sin colapso ni deterioro excesivo, un número considerable de ciclos de carga de magnitud elevada.

La atención principal ha de dirigirse hacia la altura y configuración del edificio, para evitar fenómenos de resonancia y anomalías geométricas o estructurales, en la planta baja o en su elevación, que produzcan torsiones excesivas o entrepisos débiles, así como hacia el diseño y construcción de la estructura, buscando el comportamiento más deseable bajo temblores intensos, lo que implica evitar fallas prematuras, de carácter frágil o por inestabilidad. Todo esto exige mucho cuidado, sobre todo en las zonas donde habrá gran demanda de ductilidad. Y exige también una colaboración mucho más estrecha de la que ha habido hasta ahora entre el arquitecto y el ingeniero estructural, y entre éste y el experto en mecánica de suelos y cimentaciones.

Es la opinión del que escribe que en las últimas décadas se ha tratado de dar a la ingeniería estructural en las zonas sísmicas un carácter demasiado científico. Los ingenieros estructurales y los constructores hemos estado dependiendo demasiado de las investigaciones teóricas, sustentadas en bases no muy firmes, hasta llegar a creer que los resultados de un análisis dinámico, sobre todo si se realiza con computadora, basado en los espectros de diseño producidos por esas investigaciones, permiten diseñar estructuras

prácticamente a prueba de temblores. Se nos olvida que no analizamos la estructura, sino un modelo de la misma, que no se parece demasiado a ella, que los espectros provienen de los temblores que han sucedido hasta ahora, no de los que habrá en el futuro, y que sus ordenadas máximas han sido recortadas de manera bastante arbitraria. Se nos olvida que, como se ha dicho muchas veces, la ingeniería estructural en general, y la ingeniería sísmica en particular, son un arte, con sólidas bases científicas, pero no una ciencia. Se nos olvida que, dados los parámetros básicos, la solución de un problema no es única, y que el comportamiento de la edificación dependerá, en buena parte, de aspectos difíciles de evaluar cuantitativamente, que no se han incluido en los reglamentos tradicionales.

Los reglamentos de construcción deben normar que las estructuras se diseñen con coeficientes sísmicos razonables, y han de especificar métodos de análisis y diseño congruentes con la importancia de las edificaciones. Pero no son éstos los únicos aspectos que deben cubrir, ni siquiera los más importantes. Tienen que prestar atención especial a las características que hacen que los edificios tengan la resistencia adicional que les permite resistir movimientos de tierra mayores que los de diseño sin colapso y, en muchos casos, sin sufrir daños importantes. Estos aspectos han recibido, y siguen recibiendo, poca atención en los reglamentos.

Los reglamentos deben dirigirse a todos los que intervienen en el proceso de diseño y construcción y no solamente, como ha sucedido hasta ahora, a los ingenieros estructurales, quienes suelen aparecer como únicos responsables de todo, a pesar de que han de desarrollar sus actividades en un marco definido muchas veces por propietarios, urbanistas, investigadores universitarios, arquitectos y especialistas en otras áreas.

Las responsabilidades deben compartirse entre los que escriben los códigos, las autoridades de la ciudad, los propietarios, los arquitectos, los ingenieros estructurales y los constructores, puesto que todos ellos contribuyen a las características finales del edificio terminado y al estado en que se encontrará cuando, quizá bastantes años después de que se terminó su construcción, actúe sobre él un sismo intenso.

Aunque de manera bastante tímida, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1987 ha dado pasos en la dirección correcta. Quizá en este momento no sea demasiado grave que no se haya puesto más énfasis en muchos de los aspectos mencionados arriba porque todos los ingenieros estructurales tenemos muy cerca el recuerdo de los macrosismos de septiembre de 1985 y, seguramente, estamos tomando en cuenta sus enseñanzas en nuestros diseños. Pero no hemos de olvidar lo que mencionamos al principio: el ingeniero estructural no es un experto en ingeniería sísmica y, al pasar el tiempo, si transcurren algunos años antes del próximo evento sísmico

importante, irá haciendo sus diseños siguiendo, cada vez más, los requisitos formales que le impone el Reglamento y teniendo en cuenta, cada vez menos, los fenómenos físicos que se encuentran tras ellos. ¿Qué sucederá si en los próximos diez o quince años no hay ningún temblor intenso? Se olvidarán, sin duda, muchos fenómenos que ahora parecen evidentes, y el diseño estructural se hará cumpliendo ciegamente con el Reglamento. Por este motivo es vital lograr que se mantenga al día en los aspectos que interesan al ingeniero estructural; no nos volvamos a olvidar de que los objetivos e intereses de éste y los de sus clientes no son los mismos que los del investigador teórico, y recordemos siempre que aunque la investigación es básica para el desarrollo de la ingeniería estructural en zonas sísmicas es muy peligroso que la redacción y actualización de los Reglamentos quede en manos, casi exclusivamente, de investigadores, con muy poca participación de los ingenieros que los utilizarán y que serán finalmente, al menos en buena parte, responsables del comportamiento de las estructuras que se obtengan al aplicarlos.