

Las *Series del Instituto de Ingeniería* describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos *in extenso* de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas *Series* se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes *Series del Instituto de Ingeniería*:

*Serie Investigación y Desarrollo*

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

*Serie Docencia*

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

*Serie Manuales*

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las *Series del Instituto de Ingeniería* pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto (II UNAM), <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.

# Comentarios sobre el diseño estructural

ISBN 978-607-02-2181-1

SANTIAGO LOERA PIZARRO

**SD/53**  
MAYO 2011





D.R.© UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2011  
Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, CP 04510, México, DF  
1ra ed, 24 de mayo, 2011  
ISBN 978-607-02-2181-1

# Comentarios sobre el diseño estructural

SANTIAGO LOERA PIZARRO\*

\*Investigador, Instituto de Ingeniería. UNAM



RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN	1
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO	1
DIMENSIONES GENERALES	2
DISEÑO CONCEPTUAL	3
SUPONER ESCUADRÍAS	7
ACCIONES	8
IDEALIZACIÓN	8
ANÁLISIS	9
DIMENSIONAMIENTO	11
DISTORSIONES Y DESPLAZAMIENTOS	13
PLANOS Y ESPECIFICACIONES	13
REFERENCIAS	15



## RESUMEN

Se presentan comentarios sobre el diseño o proyecto estructural, entendido como el conjunto de operaciones que permiten determinar las características de una estructura para que tenga un grado razonable de seguridad contra el colapso, se comporte satisfactoriamente en condiciones de servicio y mantenga su costo dentro de ciertos límites.

Se describen las etapas en que generalmente se divide el proceso de diseño, haciendo énfasis en la colaboración temprana entre el ingeniero de estructuras y el otro personal que interviene en el proceso (arquitectos, ingeniero de cimentaciones, ingenieros de instalaciones, etc). También se destaca la importancia del diseño conceptual, que en buena medida consiste en escoger una forma estructural adecuada. Al respecto se comenta sobre prácticas y situaciones que deben evitarse al definir la forma estructural.

Por otra parte, se hace ver que las etapas básicas del diseño estructural se aplican explícita o implícitamente cualquiera que sea el tipo de estructura (edificios, cortinas de embalses, subestaciones eléctricas, etc), y se ilustra esto con algunos ejemplos.

## ABSTRACT

Commentaries on the structural design are presented. This one is defined as the set of operations that allow to determine the characteristics of a structure so that it has a reasonable degree of security against the collapse, behaves satisfactorily at service load conditions and maintains its cost within certain limits.

The design stages are described, emphasizing the early collaboration between the structural engineer and the project staff (architects, foundation engineer, electrical, mechanical and plumbing systems engineers, etc). Also the importance of the conceptual design stands out. This one consists mainly of choosing a suitable structural form. On this matter, a list of the practices and situations that must be avoided when defining the structural form is presented.

On the other hand, it is underlined that the main stages of structural design are applied explicitly or implicitly whatever it is the type of structure (buildings, dams, electrical substations, etc), and this is illustrated with some examples.

## **INTRODUCCIÓN**

Este trabajo trata sobre el concepto de diseño estructural o proyecto estructural, entendido como el conjunto de operaciones encaminadas a determinar la forma general, todas las dimensiones específicas, el acero de refuerzo en su caso, y demás características de una estructura, de modo que cumpla la función para la que fue planeada, es decir que tenga un grado de seguridad razonable contra el colapso, y se comporte satisfactoriamente bajo condiciones de servicio, manteniendo su costo dentro de ciertos límites.

En torno a este concepto básico, y a manera de variantes, elementos componentes o complementarios, pueden mencionarse los conceptos siguientes:

- Diseño por esfuerzos admisibles, diseño por resistencia
- Diseño por estados límite
- Diseño por capacidad
- Diseño por desempeño
- Diseño probabilista y semiprobabilista

Adelante se describirá cómo algunos de estos conceptos se relacionan con el concepto básico de diseño estructural antes mencionado.

## **DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO**

Las etapas principales de un diseño estructural son las siguientes:

- Partir de dimensiones generales en planta y elevación
- Diseño conceptual (ensayar distintas estructuraciones y distintos materiales)

- Suponer escuadrías para estimar pesos propios, masas y rigideces
- Determinar las acciones que afectarán la estructura (por gravedad, sismo, viento, empuje de líquidos, subpresiones, etc)
- Idealizar la estructura para poder analizarla
- Analizar (calcular fuerzas y momentos internos, así como desplazamientos y deformaciones)
- Dimensionar, esto es determinar si con las escuadrías supuestas se logran las resistencias necesarias. Calcular aceros de refuerzo en su caso
- Revisar si las deformaciones y los desplazamientos resultan dentro de lo admisible
- Si están fuera de lo admisible suponer escuadrías mayores, y repetir el proceso
- Cuando resistencias, deformaciones y desplazamientos cumplan con los requisitos exigidos, pasar a elaborar las especificaciones y planos del proyecto.

Estas etapas son de índole general, es decir se aplican explícita o implícitamente en todo diseño estructural, sea de edificios (incluyendo los destinados a casas de máquinas), subestaciones eléctricas, presas de centrales hidroeléctricas, tanques de almacenamiento, líneas de transmisión, etc.

En lo que sigue se trata cada una de las etapas anteriores y se dan recomendaciones para su mejor desarrollo.

## **DIMENSIONES GENERALES**

Como recomendación esencial se menciona que desde el inicio del proyecto debe haber comunicación y acuerdo entre el ingeniero de estructuras, el ingeniero de cimentaciones, los ingenieros de procesos e instalaciones, el arquitecto en su caso, y el propietario o sus representantes.

Las dimensiones generales en planta y elevación comúnmente se determinan en función del uso que vaya a tener la construcción. Así, en las dimensiones y geometría de una subestación eléctrica interviene decisivamente la distancia que debe haber entre cables conductores de fases diferentes, entre cables conductores y tierra, etc, a fin de evitar daños al equipo y a las instalaciones por sobrevoltajes originados por las maniobras normales de los interruptores y por fallas del sistema, así como por las descargas directas

de los rayos. También hay una serie de distancias mínimas que deben respetarse para evitar lesiones al personal que labora en la subestación (ref 1).

## **DISEÑO CONCEPTUAL**

En esta etapa principalmente se definen el sistema estructural básico, los materiales, y el tipo de cimentación (ref 2). Aquí se ilustra el diseño conceptual con relación a edificios (algunas ideas son aplicables a edificios de casas de máquinas). También se incluye algo sobre cortinas de embalses, tanques de almacenamiento y subestaciones eléctricas.

La colaboración temprana y continua entre el ingeniero estructural y el otro personal que interviene en el proyecto es de importancia especial para evitar errores en la elección del material y de la forma estructural básica, que después no pueden corregirse sin costo elevado.

En edificios se define el material (usualmente concreto reforzado, acero estructural o mampostería), la forma estructural básica (marcos, muros de concreto reforzado, combinación de marcos y muros), la localización de columnas, de vigas principales y vigas secundarias, etc. Si se opta por el concreto reforzado, como alternativa aparte de los marcos se pueden usar columnas y losa plana con o sin capiteles o ábacos. La losa plana tiene principalmente las dos ventajas siguientes: a) para cierta altura libre de entrepiso, se logra una altura total menor del edificio, con el consiguiente ahorro en peso, y en instalaciones; b) la cimbra es más sencilla, porque es plana sin huecos para las trabes. Por otra parte, la losa plana tiene el inconveniente de que conduce a menor rigidez lateral de la estructura, por lo que se hace más difícil cumplir con las limitaciones para las distorsiones angulares de entrepiso y los desplazamientos laterales de los niveles. Además, la transmisión de momento y fuerza cortante en las conexiones losa-columna es poco eficiente comparada con la transmisión en conexiones viga-columna. Sin embargo, ambos inconvenientes se pueden subsanar usando muros de concreto reforzado, que reducirán las deformaciones laterales y tomarán buena parte de las fuerzas de sismo o viento, con lo que disminuirán los momentos y fuerzas que deban transmitirse entre losa y columnas.

El factor principal que ayudará a definir la estructuración debe ser el buen funcionamiento estructural, particularmente en zonas de alta sismicidad. Generalmente, una buena estructuración lleva aparejado un costo menor. En relación con este aspecto se

recuerda que en el diseño estructural se busca hacer mínima la función de objetivo siguiente (ref 3):

Valor medio de (costo inicial + costo de mantenimiento  
+ pérdidas por mal funcionamiento y falla).

La actividad más importante para lograr un buen diseño estructural es la elección de una adecuada estructuración, de aquí que éste sea el aspecto al cual debe dedicarse más atención y tiempo en el desarrollo de un proyecto estructural. De poco sirven cálculos muy refinados en los análisis estructurales y en la obtención de escuadrías y aceros de refuerzo cuando la estructuración seleccionada es errónea. Una rehabilitación estructural causada por defectos en la estructuración es más costosa de lo que habría costado invertir más tiempo en la selección de la estructuración.

Como recomendaciones básicas para seleccionar una estructuración se dan las siguientes:

La estructuración debe ser sencilla y lo más uniforme y simétrica posible, en particular en estructuras altas y esbeltas.

En general, deben evitarse:

- La presencia de columnas cortas, pues ante sismo tienden a fallar por fuerza cortante y no por flexocompresión. La falla por fuerza cortante es más bien frágil.
- Pretender formar marcos con trabes que no lleguen a columnas, sino a los extremos de otras trabes normales a las primeras. Esta condición provoca que en las trabes normales, además de flexión y cortante, bajo sismo se generen torsiones que pueden hacerlas fallar.
- La existencia de columnas o muros importantes que se interrumpan y no lleguen a la cimentación.
- Entrepisos aislados flexibles y poco dúctiles. Es frecuente que esto ocurra en la planta baja, por necesidades de uso de la misma. Se trata de evitar el mecanismo de falla lateral de entrepiso, por articulación de los extremos de las columnas. Si llega a formarse este mecanismo, la energía necesaria para provocar el colapso es mucho menor que la necesaria para colapsar si se hubiera formado el mecanismo general de falla definido por la formación de articulaciones en los extremos de las vigas.

Esto es así porque bajo el mismo sismo, los giros en las articulaciones del mecanismo de entrepiso son mayores que en las del otro.

- Huecos grandes en losas próximos a columnas o a muros estructurales. Esta circunstancia menoscaba la transmisión de fuerzas sísmicas entre la losa y las columnas o muros.
- Insuficiencia en separaciones entre estructuras, o entre cuerpos separados por juntas de dilatación. La intención es evitar choques entre estructuras o cuerpos adyacentes. En particular esto es importante cuando son distintas las alturas de las losas de las estructuras vecinas.
- Plantas demasiado alargadas. Una razón es que la flexión horizontal de la losa en su plano trabajando como diafragma puede originar fuerzas y momentos no previstos en columnas y muros.
- Estructuras demasiado esbeltas. Bajo sismo las fuerzas y momentos en las columnas inferiores y en la cimentación son críticos y la estructura es vulnerable a inclinarse o a volcar en caso extremo. En estructuras esbeltas es crucial que la cimentación no salga del intervalo elástico, pues si la estructura se llega a inclinar, sismos posteriores o la acción futura del viento la inclinarán aún más, porque el peso propio ya estará introduciendo un momento de vuelco adicional.

Como en la cimentación de toda estructura, en las torres de líneas de transmisión debe procurarse que la resultante de las fuerzas permanentes que actúan (peso propio y tensiones de los cables) pase por el centroide del área de la cimentación. Este punto es crítico en torres donde la línea cambia de dirección y el terreno es compresible; si no se prevé, la torre tenderá a inclinarse.

En el proyecto de la presa de un embalse se aplican las ideas antes expresadas sobre el diseño conceptual, es decir se definen el sistema estructural básico, los materiales de construcción, y se estudia la cimentación. Como sistemas estructurales se tienen los siguientes: presas de gravedad, de arco o bóveda, de machones, y de tierra o enrocamiento. La selección se basa en última instancia en el criterio ya mencionado consistente en hacer mínimo el valor medio de la suma del costo inicial, más el costo de operación y mantenimiento, más las pérdidas por mal funcionamiento y falla. Este criterio es útil desde el punto de vista de los conceptos. Ya en términos concretos la selección del tipo de presa que mejor cumpla con el criterio anterior depende principalmente de la topografía y geología del lugar, de la disponibilidad de los

materiales y de la facilidad o dificultad de acceso y transporte de los mismos, así como de la altura requerida de cortina. Es necesario realizar anteproyectos para comparar costos. Algunos tipos quedan eliminados de inicio, como puede ocurrir con la presa de arco cuando no se cuenta con una boquilla estrecha y con paredes que puedan resistir los empujes propios del trabajo de arco (ref 4). Otro ejemplo se tiene con las presas de tierra con corazón impermeable, que se han venido descartando por la dificultad de disponer del material arcilloso para el corazón.

Al diseñar un tanque de almacenamiento, también hay que seleccionar el material, la forma estructural y la cimentación. Como material comúnmente se escogerá entre el concreto reforzado, el concreto presforzado o el acero. En general, el tanque de concreto requerirá menor gasto de mantenimiento que el de acero. En cuanto a la forma, pueden ser rectangulares o circulares. Cuando no hay restricción de espacio, es preferible el tanque circular por ser más eficiente su trabajo estructural. Aplicando estas ideas se van eliminando formas no aptas, y al final puede ser necesario evaluar costos de distintos tipos de tanque para llegar al que mejor cumpla con el criterio de hacer mínima la suma de costos.

Una subestación eléctrica reductora de voltaje usualmente ocupa un terreno rectangular con la dimensión mayor en dirección de la línea de transmisión. Esencialmente consta de lo siguiente (ref 1):

En un extremo un marco estructural para recibir los cables de la línea de transmisión de alta tensión; en el extremo opuesto otro marco estructural del cual parten los cables hacia la línea de distribución de voltaje reducido. También existen soportes para las barras de distribución (buses) y para los interruptores y aisladores. En la zona central va el transformador, y hacia una orilla se tiene la caseta de control. En los cuatro lados del rectángulo se instalan mallas o bardas de protección. Entre la subestación y la última torre estándar de la línea de alto voltaje, se construye una torre especial más robusta que las estándar, llamada estructura de remate. Es más robusta porque su distancia a la última torre estándar (300-500 m) es considerablemente mayor que su distancia al marco estructural de la subestación. Esta circunstancia provoca que la fuerza horizontal resultante que los cables largos ejercen sobre la torre de remate sea mayor que la que ejercen los cables que van a la subestación, lo cual origina un momento de vuelco en la torre que no experimentan las torres estándar.

Por lo que se refiere al diseño estructural conceptual de una subestación, se tiene que las formas estructurales principales están obligadas y son los marcos de entrada y salida. A fin de suministrar a estos marcos resistencia y rigidez en su plano, debe haber continuidad estructural entre columnas y cabezal, y sus bases deben estar empotradas. Para lograr rigidez y resistencia en la dirección perpendicular, conviene que cada columna del marco esté formada por dos piezas que tienen cierta separación en la base y se unen en el extremo superior formando una A. El cabezal del marco es un perfil sencillo. Los marcos mencionados generalmente son de acero, aunque podrían ser de concreto presforzado prefabricados. Las estructuras de soporte, para buses, interruptores y aisladores, son plataformas sobre pequeñas columnas o bien marcos de pequeñas dimensiones.

Si el terreno para la subestación es firme, la cimentación puede ser de zapatas aisladas; si es blando, quizá convenga diseñar una cimentación integral para todos los componentes. Siempre debe tenerse especial cuidado con la cimentación del transformador y con las de los marcos de entrada y salida. En condiciones extremas puede requerirse el uso de pilotes.

### **SUPONER ESCUADRÍAS**

Esto es necesario para estimar el peso propio, las masas y las rigideces que se usarán en los análisis. En edificios situados en zonas de mediana o alta sismicidad, se recomienda que las escuadrías de las columnas sean tales que aproximadamente se logre la distorsión angular de entrepiso permisible en toda la altura del edificio. Para ello, basta hacer proporcional al diagrama de fuerzas cortantes sísmicas el cubo de la dimensión transversal de las columnas paralela a la dirección considerada del sismo. Este proceder conduce a tener la misma sección de columna hasta aproximadamente un tercio de la altura del edificio y arriba de este nivel sólo otro cambio de sección. Es decir, con tres secciones de columna es suficiente para obtener cierta uniformidad de las distorsiones de entrepiso con la altura.

Por lo que se refiere a las trabes, lo común es que no cambien de sección con la altura. Su peralte puede suponerse entre un décimo y un doceavo del claro entre ejes.

## **ACCIONES**

Usualmente las acciones por considerar son las causadas por la gravedad, por el sismo y el viento. En ciertos casos habrá que tomar en cuenta el efecto del funcionamiento de equipos, vibraciones, oleaje, etc. Entre las causadas por la gravedad están las cargas muertas y las cargas vivas. Como cargas muertas están el peso propio de la estructura, de acabados, instalaciones, muros divisorios, fachadas, etc, y como vivas, el peso de mobiliario, equipo y ocupantes. Las cargas muertas se determinan a partir de las dimensiones de los elementos y de valores probables de pesos volumétricos.

En construcciones con estructura a base de columnas, no debe omitirse considerar una carga para tomar en cuenta el peso de muros o cancelos divisorios no estructurales que seguramente se colocarán en el futuro. La forma de hacerlo es mediante una carga uniforme que puede estar entre 70 y 150 kg/m<sup>2</sup>, según la densidad de muros que se prevea.

Las cargas vivas dependen del uso de la construcción y normalmente están especificadas en los reglamentos de construcción.

Las acciones sísmicas esencialmente son función de la sismicidad del lugar, y de las características dinámicas de la estructura. Se determinan de los espectros de diseño de los reglamentos de construcción. En México, los efectos del viento en buena medida están regidos por la cercanía o lejanía de la costa; también los reglamentos suministran medios para valorar estos efectos.

## **IDEALIZACIÓN**

En esta etapa se simplifica la estructura con el fin de poder analizarla por procedimientos razonablemente sencillos. Generalmente se idealiza como estructura elástica. En estructuras de concreto reforzado, un aspecto controvertido a causa del agrietamiento es definir qué sección debe considerarse para valorar la rigidez a flexión de vigas, columnas y muros. Una regla que se recomienda consiste en tomar el momento de inercia total de la sección bruta de concreto en columnas y muros no agrietados, y la mitad del momento de inercia de la sección bruta de concreto en vigas. Si la losa es monolítica con la viga debe considerarse una sección T; en este caso, debido a que el momento de inercia de la

viga T es aproximadamente el doble del de la sección rectangular, bastará usar el momento de inercia de la sección rectangular, pues por un lado se duplica debido a los patines y por otro se reduce a la mitad a causa del agrietamiento. Se supone que en las columnas la carga axial restringe el agrietamiento lo necesario para no modificar el momento de inercia de la sección.

Las acciones también se idealizan; así, por ejemplo, el peso del mobiliario se trata como carga uniformemente distribuida, las descargas de vigas secundarias sobre vigas principales se idealizan como cargas concentradas, los efectos del sismo como fuerzas concentradas horizontales, los efectos del viento como presiones o succiones normales a las superficies afectadas, etc.

## **ANÁLISIS**

El análisis estructural debe su nombre a que por medio de él se llega a conocer lo que sucede en las partes de un todo. El todo es la estructura y sus partes son las columnas, vigas, muros, etc, que la forman. Concretamente, mediante el análisis de una estructura se calculan fuerzas y momentos internos en sus partes, así como deformaciones y desplazamientos.

Es usual que en el análisis estructural se suponga que la estructura es elástica. En rigor, al realizar un análisis elástico se deben respetar las siguientes condiciones: equilibrio, compatibilidad de deformaciones y características esfuerzo-deformación de los materiales. De las tres condiciones la más importante es el equilibrio, el cual debe siempre cumplirse admitiendo discrepancias de no más de dos o tres por ciento. En la compatibilidad de deformaciones se puede tener tolerancias mayores en función del grado de ductilidad del material. Si el material fuera frágil, sin ninguna capacidad de deformación inelástica, la compatibilidad de deformaciones debería cumplirse cabalmente. Esta tolerancia en la compatibilidad justifica en cierta forma el uso de métodos de análisis que cumplen con el equilibrio, pero que suponen la localización de los puntos de inflexión en columnas. Asimismo, permite hacer redistribuciones de momentos flexionantes para descongestionar de refuerzo ciertas zonas de vigas, pero siempre cumpliendo con el equilibrio de vigas, nudos y entrepisos. Se recomienda no hacer redistribuciones en columnas. Los reglamentos de construcción especifican los montos de redistribución admisibles para cada tipo de estructura (ref 5).

Actualmente los análisis estructurales se realizan mediante programas para computadora, cuyo uso requiere principalmente conocer las formas de introducir los datos de dimensiones, rigideces, etc, de la estructura. Estos análisis pueden ser considerados exactos, y generalmente están basados en el método de las rigideces. Tienen, entre otras, la ventaja de tomar en cuenta las dimensiones transversales de vigas, columnas y nudos con lo que, en particular, los desplazamientos y deformaciones resultan más realistas que los obtenidos cuando se idealizaba la estructura concentrando sus propiedades en los ejes de vigas y columnas, con claros medidos entre ejes. El inconveniente que pueden tener los análisis estructurales por computadora es dar por correctos el cúmulo de resultados numéricos que arroja la máquina, sin tener una idea de los niveles de magnitud que deben esperarse. Esto hace recordar aquel principio general según el cual el ingeniero debe tener una idea del valor del resultado que obtiene. En este sentido son útiles los métodos aproximados, pues con ellos se puede verificar que se cumpla el equilibrio. Aun sin recurrir a los procedimientos aproximados, una forma sencilla de hacer una revisión de resultados de computadora consiste en verificar el equilibrio de algunos nudos, vigas y entresijos, y el equilibrio general de la estructura. En algunos casos es quizá más rápido hacer el análisis manualmente, como ocurre con las vigas continuas libremente apoyadas. Lo más eficiente es analizarlas con el método de Cross. Estructuras sencillas simétricas también pueden analizarse manualmente bajo carga vertical con cierta ventaja.

Una forma recomendable de proceder es realizar por separado los análisis bajo cargas verticales y bajo fuerzas laterales de sismo o viento. La combinación procedente entre resultados de ambos análisis se hará después, en el dimensionamiento.

Al efectuar análisis con la computadora se deben tener en cuenta las dos consideraciones siguientes:

- a) En el análisis bajo carga vertical de edificios altos (más de ocho o diez pisos), debido a que la carga axial de columnas interiores es mayor que la de columnas de orilla, las interiores se acortan más que las exteriores lo que provoca que en las trabes de las crujeas exteriores los momentos flexionantes negativos exteriores aumenten y los negativos interiores disminuyan, e incluso lleguen a cambiar de signo. Ocurre así porque en el análisis que efectúa la computadora se considera que la totalidad de la carga axial de las columnas actúa en un cierto instante. La realidad es que al construir se obliga a que cada nivel quede horizontal, lo que,

aunque no anula el efecto antes mencionado, sí lo disminuye. En resumen, lo anterior significa que los momentos en las vigas de crujeas de orilla que suministra el análisis por computadora no son realistas en edificios altos.

b) Cuando se revisan las distorsiones angulares de entrepiso causadas por el sismo para evitar que se dañen muros no estructurales, deben considerarse sólo las causadas por las fuerzas cortantes sísmicas, es decir no es válido calcularlas como la diferencia de desplazamientos horizontales de los niveles que limitan el entrepiso en cuestión dividida entre la altura del entrepiso, porque se estará incluyendo el efecto de la flexión general del edificio, la cual no daña los elementos divisorios no estructurales. No tomar en cuenta esta situación es del lado conservador, pero es necesario estar consciente de ello, pues en edificios esbeltos puede ser excesivamente conservador. Para calcular las distorsiones angulares causadas sólo por las fuerzas cortantes sísmicas, basta dar a las columnas rigideces axiales grandes con lo que se minimiza la deformación de la estructura causada por la flexión general.

#### *Análisis al límite*

En esta forma de análisis se debe cumplir con las condiciones de equilibrio, mecanismo y plasticidad. Como en todo análisis el equilibrio debe cumplirse. La condición de mecanismo consiste en que bajo las acciones afectadas por el correspondiente factor de carga, la estructura se convierta en un mecanismo definido por un cierto número de articulaciones plásticas. La condición de plasticidad establece que en ninguna sección de la estructura el momento flexionante debe exceder al momento plástico de la sección. Este análisis es poco usado en la práctica.

#### **DIMENSIONAMIENTO**

En buena medida el dimensionamiento consiste en comprobar las escuadrías que se propusieron en una etapa anterior, y en las estructuras de concreto reforzado, calcular las áreas de acero de refuerzo longitudinal y transversal. Generalmente, al dimensionar deben tomarse en cuenta al menos las dos condiciones de carga siguientes: a) carga muerta más carga viva, y b) carga muerta más carga viva reducida más carga accidental. La condición que rige es la que conduce a escuadrías mayores, o a mayores áreas de

refuerzo. En el dimensionamiento por esfuerzos admisibles se determinan las esquadrias de modo que bajo las acciones en condiciones de servicio no se excedan ciertos valores de esfuerzos en los materiales. Este dimensionamiento ha sido remplazado por el dimensionamiento por resistencia; sin embargo, todavía suele aplicarse particularmente en estructuras de acero, debido a la sencillez de las operaciones que implica. En esta forma de dimensionar, bajo carga muerta más carga viva se admiten ciertas magnitudes de esfuerzos y bajo cargas muerta, viva y accidental se admiten esfuerzos mayores.

En el dimensionamiento por resistencia, las secciones y sus refuerzos se dimensionan de modo que su resistencia afectada por un factor,  $F_r$ , menor que uno, llamado factor de resistencia, sea mayor o igual a la acción interna obtenida del análisis multiplicado por un factor de carga. Aquí debe dimensionarse para la más desfavorable de las condiciones siguientes: carga muerta más carga viva con un cierto factor de carga, por ejemplo  $F_c = 1.4$ ; y carga muerta más carga viva reducida más carga accidental con factor de carga menor, por ejemplo 1.1. Las condiciones de servicio (deformaciones, agrietamiento, etc) se revisan aparte, bajo acciones sin factor de carga.

El dimensionamiento por estados límite en esencia es el descrito en el párrafo anterior, donde el estado límite de falla se toma en cuenta al suministrar la resistencia necesaria, y el estado límite de servicio se considera al revisar las deformaciones y el agrietamiento. En el diseño por desempeño, se revisan otros estados límite, pero los dos antes mencionados son los más importantes.

El diseño por capacidad tiene el objetivo de lograr que la forma de falla de la estructura sea un mecanismo definido por articulaciones plásticas asociadas a la flexión. Es decir, obliga a que no ocurran antes otras formas de falla, como por fuerza cortante, por adherencia, por pandeo o inestabilidad. El diseño por capacidad es más bien un complemento al concepto general de diseño estructural; así, por ejemplo, en los actuales reglamentos para estructuras de concreto reforzado se pide que bajo sismo en una estructura dúctil las vigas se diseñen para las fuerzas cortantes no provenientes del análisis estructural, sino del equilibrio de la viga cuando en sus extremos actúan los correspondientes momentos plásticos; esto, junto con los factores de resistencia que reducen más la resistencia a fuerzas cortante que a flexión, garantiza que la viga no falle por fuerzas cortante sino por flexión en sus extremos. El diseño por capacidad conduce a estructuras de mayor ductilidad y, por tanto, con menor probabilidad de colapso bajo

sismo. Otra aplicación importante del concepto de diseño por capacidad se tiene al exigir que la cimentación de una estructura esbelta no salga del intervalo elástico.

### **DISTORSIONES Y DESPLAZAMIENTOS**

Normalmente, basta comprobar que bajo acciones de servicio no se excedan los valores de las distorsiones angulares de entrepiso y los desplazamientos laterales de los niveles. Al haber escogido razonablemente el valor del factor de comportamiento sísmico,  $Q$ , y cumplido con los detalles de refuerzo y características de las secciones (secciones compactas de acero, confinamiento mediante estribos, etc), la revisión de los giros angulares para evitar el colapso no parece necesaria.

Si las distorsiones y desplazamientos resultan mayores que los admisibles habrá que proponer escuadrías mayores y repetir el proceso.

### **PLANOS Y ESPECIFICACIONES**

Cuando resistencias, distorsiones y desplazamientos hayan cumplido con los requisitos exigidos, se elaborarán los planos y especificaciones del proyecto, los cuales deben ser sencillos y claros, y deben ser revisados por el ingeniero autor del proyecto.



## REFERENCIAS

1. Enríquez, H G (2006), *Elementos de diseño de subestaciones eléctricas*, 2<sup>a</sup> ed, Limusa, México
2. Structural Engineers Association of California (1999), *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, 7<sup>a</sup> ed, Sacramento, California, EUA
3. Rosenblueth, E (1975), Diseño óptimo en ingeniería sísmica, *Revista Ingeniería*, Facultad de Ingeniería, UNAM, jul-sep
4. Linsley, R K, y Franzini, J B (1978), *Ingeniería de los recursos hidráulicos*, 9<sup>a</sup> impr, Compañía Editorial Continental, México, DF
5. Gobierno del Distrito Federal (2004), Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, 6 de oct.



Este texto está gratuitamente disponible para consulta e impresión (archivo PDF de 371 KB), en el portal electrónico del II UNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, sección de Publicaciones, desde el 24 de mayo, 2011.

El cuidado de la edición estuvo a cargo de Olivia Gómez Mora, del la Unidad de Promoción y Comunicación del II UNAM.