

Normas de Diseño Sismorresistente en América Latina: Limitaciones

Ing. Jesús Iglesias

Introducción

"Año de 7-pedernal y de 1460 según la (cuenta) nuestra, hubo un temblor de tierra y es de saber que como ellos temían que se había de perder el mundo otra vez por temblores de tierra iban pintando todos los años los agüeros que acaecían". (Códice Telleriano-Remensis) ¹

La actividad sísmica ha tenido una presencia constante en la vida de los pueblos latinoamericanos, lo que nos permite rastrearla a las épocas prehispánicas a través de los códices que han sobrevivido hasta nuestros días.

La región latinoamericana está formada por las placas tectónicas de Norteamérica, Cocos, el Caribe, Nazca y Sudamérica (*fig. 1*). Estas placas, de material *duro*, se asientan sobre el material *suave* de la astenósfera y se mueven como cuerpos rígidos que flotan a la deriva. El movimiento relativo entre ellas es la causa de la gran actividad sísmica generada en sus bordes, en las costas latinoamericanas del Pacífico y en la cuenca del Caribe. Los sismos de 1985 en Chile y México son ejemplos de las enormes pérdidas humanas y económicas que con frecuencia produce este mecanismo. Adicionalmente, los sistemas de fallas localizados en el interior de las placas tectónicas generan también una actividad sísmica importante en Latinoamérica, como lo demuestran los recientes temblores ocurridos durante 1986 y 1987 en El Salvador y Ecuador respectivamente (*fig. 2*).

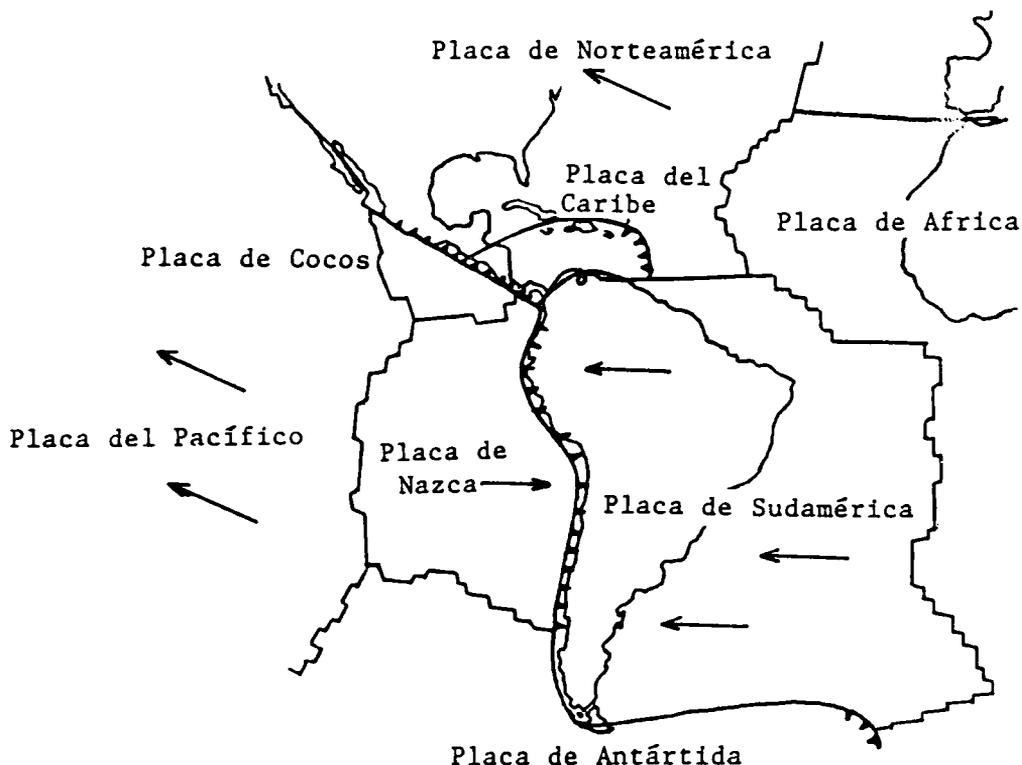


Figura 1. Placas tectónicas de América Latina.

La importancia de la actividad sísmica en América Latina ha sido la causa de que la mayoría de los países que la integran hayan desarrollado normas de diseño sismorresistente, como una medida indispensable para la mitigación del riesgo sísmico. La intensa comunicación científica en el campo de la ingeniería sísmica, tanto a nivel internacional como dentro del ámbito latinoamericano, ha dado lugar a que la mayoría de estas normas respondan a un mismo esquema básico que será descrito en el resto de este trabajo. Con este propósito se revisaron la mayoría de las normas de diseño sismorresistente de América Latina, a través de las ref. 2-9.

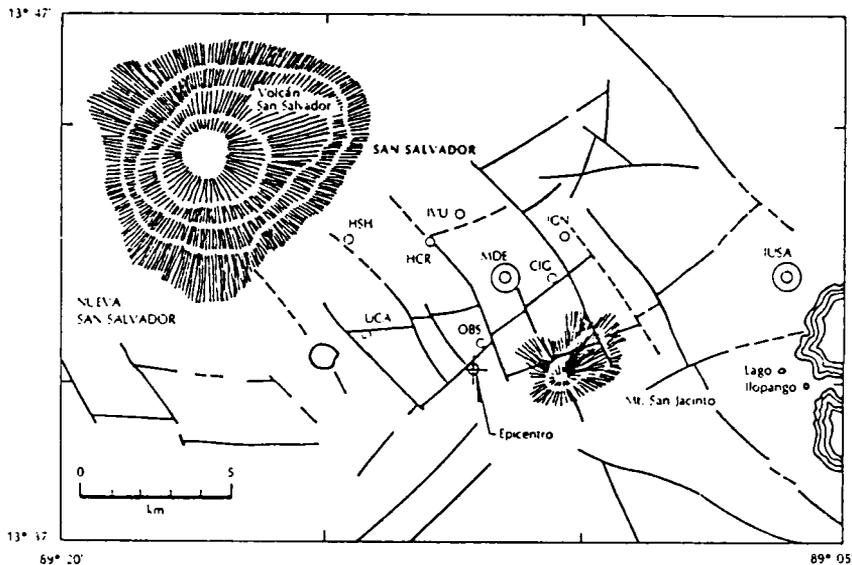


Figura 2. San Salvador con la ubicación de las fallas geológicas.

Filosofía de las Normas

La mayoría de las normas de diseño sismorresistente en América Latina tienen como objetivo fundamental el proporcionar los requerimientos *mínimos* para diseñar estructuras que: ante sismos menores no sufran daños; con sismos moderados los daños se limiten a los elementos no estructurales y ante sismos fuertes se evite el colapso.

Alcance

En general, las normas latinoamericanas son de aplicación nacional. Además, en su mayoría se limitan a las edificaciones de tipo urbano, aunque en muchas de ellas se incluyen recomendaciones específicas para cierto tipo de estructuras industriales o para la vivienda rural.

Riesgo Sísmico

► *Regionalización sísmica:* El análisis de la información sísmológica existente,

tanto en los catálogos sísmicos como en las fuentes históricas, junto con la información geológica disponible en cada país, permite elaborar mapas de regionalización sísmica (fig. 3), en donde se divide al país en zonas de igual sismicidad. A cada zona corresponden parámetros específicos para la evaluación de las fuerzas sísmicas.

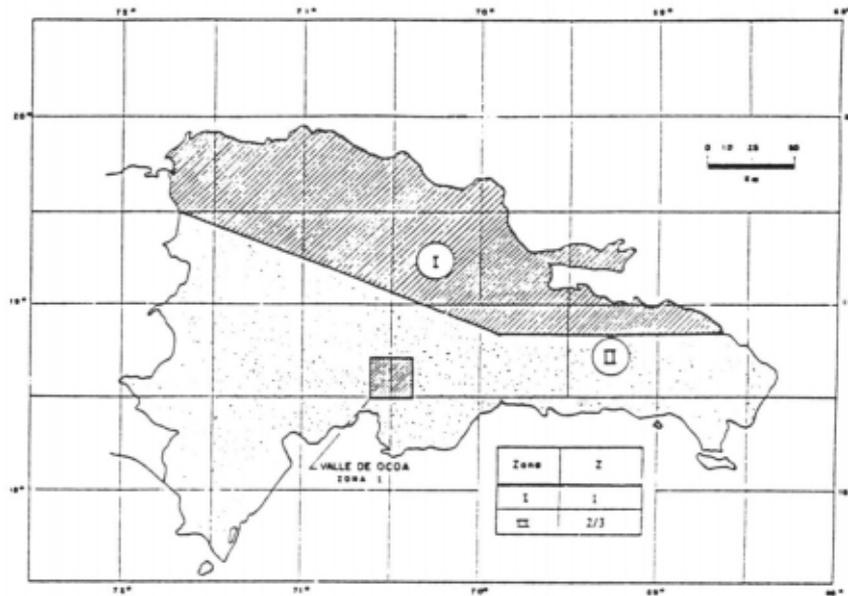


Figura 3. Zonificación sísmica de la República Dominicana.

- **Clasificación de las estructuras:** Para fines de evaluar las fuerzas sísmicas, los edificios se clasifican de acuerdo con su uso y sus características estructurales.

En cuanto al uso, la mayoría de las normas distinguen a los edificios importantes, ya sea porque en ellos existan grandes concentraciones de personas, o porque su supervivencia resulte vital para responder a las situaciones de emergencia provocadas por los sismos. Conviene subrayar que los hospitales son un buen ejemplo, tanto de edificios con una gran densidad de uso, como de centros indispensables para la atención de las víctimas después de un sismo. En general, a los edificios importantes se les asigna un factor de sobrediseño que afecta directamente al cálculo de las fuerzas sísmicas.

Las características estructurales definen fundamentalmente el comportamiento inelástico de los edificios. Como se verá más adelante, un buen porcentaje de los reglamentos latinoamericanos proporciona coeficientes sísmicos y espectros de diseño que consideran el comportamiento inelástico de las estructuras, lo cual permite utilizar valores de diseño menores que los necesarios para mantenerse en el rango elástico. De aquí que sea necesario clasificar a las estructuras en función de las características que definen su capacidad para absorber energía en el rango inelástico. Esta clasificación permite asignar diferentes valores de los parámetros utilizados para el cálculo de las fuerzas sísmicas en cada caso. En aquellas normas en que se proporcionan coeficientes sísmicos o espectros de diseño elásticos, la clasificación de los edificios según sus características estructurales permite elegir el factor de reducción por comportamiento inelástico (factor de ductilidad) adecuado.

- ▶ *Coefficiente sísmico:* El coeficiente sísmico define el porcentaje del peso total de la estructura que se debe considerar como cortante actuante en su base con fines de diseño. Para una región sísmica específica la mayoría de las normas proporcionan valores del coeficiente sísmico en función de las características estructurales, del uso del inmueble y del tipo de suelo. Los dos primeros factores se han descrito en los incisos anteriores, en cuanto al tipo de suelo, en general se distingue cuando menos entre suelos compresibles y suelos firmes. Los valores del coeficiente sísmico para suelos compresibles suelen ser mayores que para los firmes, ya que consideran la amplificación que sufren las ondas sísmicas en este tipo de suelos. En varios casos el coeficiente sísmico es también función del período fundamental de la estructura, por lo cual estos reglamentos proporcionan expresiones para su cálculo aproximado.
- ▶ *Espectros de diseño:* Para el análisis sísmico de estructuras utilizando modelos dinámicos se proporcionan espectros de diseño. Estos espectros son envolventes de los espectros de respuesta obtenidos para varios sismos en una cierta región y se deben calcular analizando con herramientas estadísticas la información disponible de manera que tiendan a garantizar una probabilidad reducida de excedencia. Los espectros de respuesta son gráficas de la máxima respuesta de sistemas de un grado de libertad con diferentes períodos, sujetos a la acción de un sismo determinado. Se suelen usar espectros de aceleración, que grafican períodos vs. aceleración en función de la aceleración de la gravedad, considerando un factor de amortiguamiento de 5% del valor crítico. En general, los espectros de diseño se definen mediante una rama ascendente (que en algunos casos se omite), una zona plana, cuya ordenada suele ser igual al coeficiente sísmico, y una rama descendente. Se suelen proporcionar espectros para

cuando menos dos tipos de suelo: compresible y firme. Usualmente, el espectro correspondiente al suelo compresible se define con las tres ramas y los períodos que limitan la rama horizontal suelen ser mayores que para suelo firme (fig. 4).

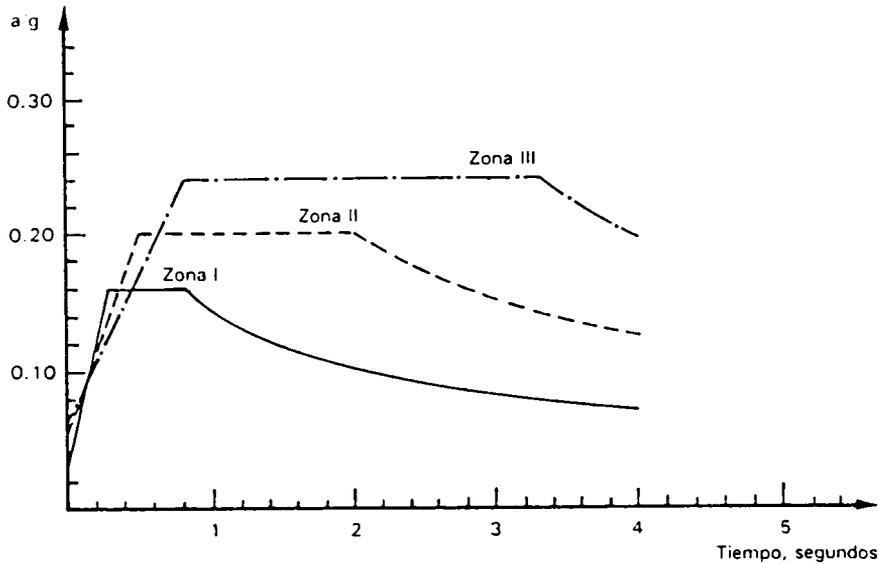


Figura 4. Espectros de diseño para los tres tipos de suelo en el Distrito Federal, Ciudad de México, 1976.

Como se mencionó en *Clasificación de las estructuras*, una parte de las normas latinoamericanas proporciona coeficientes sísmicos y espectros de diseño reducidos por consideración del comportamiento inelástico de las estructuras. En otros casos se proporcionan los valores correspondientes al comportamiento elástico y se vuelve entonces necesario efectuar la reducción asociada al comportamiento inelástico, en función de las características de la estructura en estudio. También es necesario modificar estos valores para tomar en cuenta el uso de la estructura.

Análisis

► *Criterios generales:* En general, las normas de diseño sismorresistente

latinoamericanas exigen que las estructuras se analicen cuando menos bajo la acción de dos componentes ortogonales del movimiento del terreno no simultáneas. Asimismo, en la mayoría de las normas se incluyen recomendaciones generales para modelar las estructuras suponiendo un comportamiento elástico de los materiales.

Además de los modelos de análisis propuestos, que se describen a continuación, las normas suelen incluir recomendaciones especiales para la evaluación de las fuerzas sísmicas en apéndices y estructuras especiales como tanques y muros de retención.

- **Análisis estático:** Para el cálculo de las fuerzas sísmicas, el análisis estático considera el uso de coeficientes que corresponden a una aceleración que varía en forma lineal, desde cero, en la base de los edificios, hasta un máximo, en la parte superior, de tal manera que el cociente de la fuerza cortante en la base V entre el peso total del edificio W sea igual al valor del coeficiente sísmico C (fig. 5). Esta simplificación conduce a resultados suficientemente precisos en edificios donde la influencia de los modos superiores y las deformaciones axiales de las columnas no sean importantes. Para tomar en cuenta de manera aproximada la posible subestimación de las fuerzas cortantes en los pisos superiores, en algunos normas se considera una fuerza concentrada en la azotea del orden del 5% de la cortante basal.

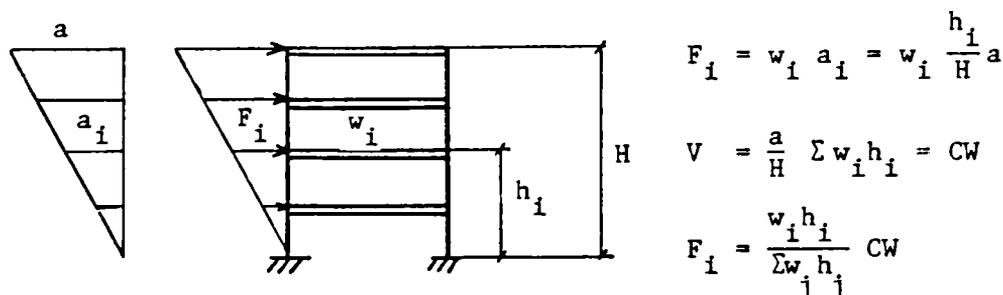


Figura 5. Método estático según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Ciudad de México.

De acuerdo con lo anterior, la fuerza sísmica que actúa en el piso i está dada por:

$$F_i = \frac{w_i h_i}{w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_n h_n} C W$$

donde:

- w_i = peso del piso i
- h_i = altura del piso i sobre el nivel de desplante
- n = número de pisos
- C = coeficiente sísmico
- W = peso total de la estructura

- *Análisis dinámico:* El análisis estático es obligatorio en la mayoría de las normas, sin embargo, para estructuras elevadas o irregulares se recomienda recurrir también al análisis dinámico modal utilizando espectros de diseño. Con este fin, se suele admitir el modelar las estructuras mediante un sistema de masas concentradas en los pisos (*fig. 6.*)

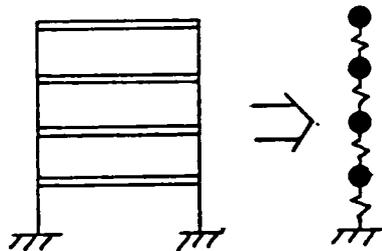


Figura 6. Modelo de masas concentradas para el análisis dinámico.

En general, se dan recomendaciones para determinar el número de modos necesarios. La combinación modal se efectúa en la mayoría de los casos recurriendo a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la respuesta de cada modo.

En la mayoría de las normas latinoamericanas la fuerza cortante basal obtenida del análisis dinámico no puede ser menor que un porcentaje de la obtenida del análisis estático. Este porcentaje oscila entre el 60% y el 80%.

- *Análisis simplificado:* La mayor parte de los códigos de diseño sismorresistente propone un método simplificado para el análisis de inmuebles de poca altura, estructurados a base de muros de carga. La simplificación consiste en que no se requiere calcular los desplazamientos, ni distribuir las fuerzas cortantes entre los diferentes elementos estructurales, siempre que se cumplan ciertos requisitos de regularidad y

que la disposición de los muros sea tal que no sean importantes los efectos de torsión.

En general se limitan: la relación de esbeltez de la construcción; su relación ancho a largo en planta y su altura. Además, se requiere que en cada nivel existan al menos dos muros perimetrales paralelos, con una longitud significativa respecto a la dimensión del edificio, que garanticen un buen comportamiento ante problemas de torsión. En estas circunstancias se hace caso omiso del cálculo de los desplazamientos y basta verificar solamente que, en cada piso, la suma de las resistencias al corte de los muros de carga sea cuando menos igual a la fuerza cortante total en dicho piso, calculada mediante el análisis estático.

- **Distribución de las fuerzas cortantes:** Las normas de diseño sismorresistente proporcionan recomendaciones para la distribución de las fuerzas cortantes, sobre la hipótesis de un comportamiento rígido del sistema de piso. De cumplirse esta condición, la distribución entre los elementos resistentes en cada piso se efectúa considerando un incremento del 50% en la excentricidad real y una excentricidad accidental de entre 5% y 10% de la dimensión en planta de la estructura perpendicular a la dirección analizada. La excentricidad accidental se supone actuando en el sentido más desfavorable (fig. 7).

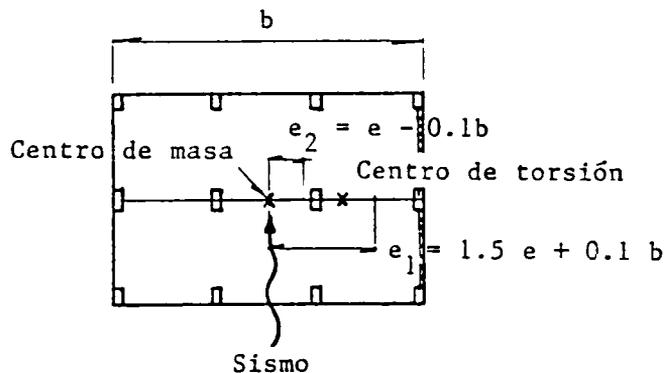


Figura 7. Excentricidades de diseño según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Ciudad de México.

- ▶ *Momento de volteo:* En general, las normas proporcionan criterios para la evaluación de los momentos de volteo, considerando un factor de reducción que en varios casos es de 0.80 en la base y aumenta linealmente hasta 1.00 en el piso superior.

Diseño

- ▶ *Acciones:* Las normas de diseño sismorresistente exigen la revisión de la seguridad de las estructuras ante la combinación de las cargas muertas con las vivas y con los efectos de sismo. Las cargas vivas consideradas suelen ser un porcentaje de los valores máximos probables, para tomar en cuenta el efecto accidental del sismo. El factor de carga utilizado es también un valor menor que el recomendado para combinaciones de cargas que no incluyan acciones accidentales. En aquellas normas en que el diseño se basa en el uso de esfuerzos permisibles, la naturaleza accidental del sismo permite incrementar los valores propuestos de dichos esfuerzos.
- ▶ *Estado límite de falla:* En las normas en que se diseña con base en la revisión de estados límite debe verificarse que la resistencia de diseño sea mayor o igual que la acción de diseño. En aquellos casos en que el diseño se basa en el empleo de esfuerzos permisibles debe verificarse que no se excedan los valores especificados de los mismos.
- ▶ *Estado límite de servicio:* Las normas de diseño sismorresistente exigen la verificación de los desplazamientos para que los mismos no generen efectos de segundo orden, ni creen una sensación de inseguridad, ni propicien el daño de los elementos no estructurales. En general, se proporcionan valores límite al desplazamiento de los entrepisos que, para aquellos códigos que manejan coeficientes sísmicos reducidos por inelasticidad, son del orden de 0.002 veces la altura del entrepiso cuando los elementos no estructurales están ligados a la estructura y de 0.004 cuando dichos elementos se encuentran desligados de ésta. En las normas que manejan coeficientes sísmicos elásticos, los valores son del orden de 0.008 y 0.016 respectivamente. Asimismo, se dan recomendaciones para que la separación entre edificios vecinos sea tal que no exista riesgo de golpeteo con los desplazamientos previstos.
- ▶ *Recomendaciones de diseño:* Una buena parte de las normas latinoamericanas proporciona recomendaciones especiales para el detallado

estructural en zonas sísmicas, particularmente para las estructuras de concreto, aunque sin excluir a las de acero y mampostería. Básicamente se trata de recomendaciones para la colocación del acero de refuerzo que permiten incrementar el confinamiento del concreto, proporcionando así mayor ductilidad al comportamiento de los elementos estructurales (fig. 8).

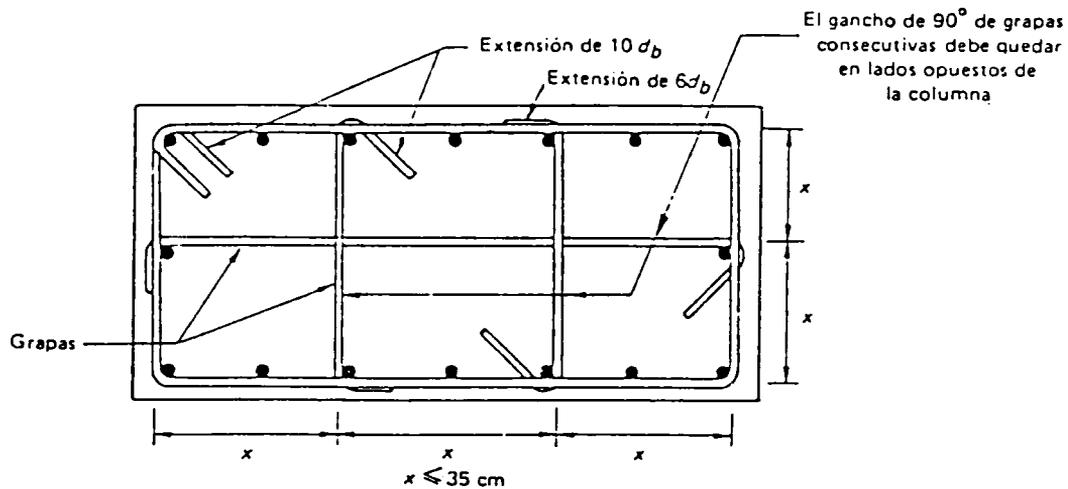


Figura 8. Detalles del refuerzo transversal de columnas según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Ciudad de México.

Cimentaciones

El diseño sísmico de las cimentaciones es una de las deficiencias más evidentes en la normativa sismorresistente. Usualmente, los códigos incluyen información muy general tendiente a evitar la aparición de tensiones en las cimentaciones y a garantizar un comportamiento de conjunto entre los elementos que las forman.

Construcción

Las especificaciones de construcción dentro de las normas de diseño antisísmico suelen limitarse a llamar la atención sobre la necesidad de garantizar la seguridad en las diversas etapas del proceso constructivo y a recomendar que se realice una supervisión detallada durante el mismo.

Estructuras Existentes

- ▶ ***Reparación y refuerzo:*** Es muy escaso el contenido de las normas en lo que se refiere a la reparación y el refuerzo de estructuras dañadas, incluso en los códigos de varios países donde ha habido daños importantes recientemente. En general se establece la necesidad de reparar las estructuras con daños estructurales severos hasta alcanzar los requisitos de la normativa vigente, lo que significa la necesidad de reparar y reforzar, sobre todo en los casos de inmuebles construídos conforme a reglamentos anteriores.
- ▶ ***Instrumentación:*** Buena parte de los reglamentos latinoamericanos de construcción coinciden en especificar la necesidad de instrumentar los edificios, para esto se imponen límites muy variables a la altura y a la superficie construída, arriba de los cuales es obligatorio colocar acelerómetros.

Responsabilidad

A pesar de la importancia que reviste deslindar las responsabilidades, tanto civil como penal, en el caso de una construcción, es bastante superficial el tratamiento de este problema en las normas sismorresistentes.

Normalmente se especifica la necesidad de contar con un responsable del proyecto, ingeniero o arquitecto, a fin de obtener la licencia de construcción por parte de las autoridades. No queda claro, sin embargo, el límite jurídico de esta responsabilidad, ni su relación con la responsabilidad del propietario o de la misma autoridad.

Experiencias Recientes en México

El sismo de septiembre de 1985 en la Ciudad de México dejó un saldo de casi 400 edificios de concreto derrumbados y cerca de 1,500 con daños estructurales. El número oficial de víctimas fue de 5,000 muertos, cifra que asciende a 20,000 según fuentes extraoficiales, además de varios cientos de miles de personas que quedaron sin hogar.

Una de las primeras acciones dentro del proceso de reconstrucción de la Ciudad de México fue la expedición de unas Normas de Emergencia, publicadas el 18 de octubre de 1985. Posteriormente, el 6 de julio de 1987 se expidió el nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y el 5 de noviembre del mismo año se publicaron las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

Debido a la dificultad legal para su actualización, el actual reglamento de construcciones para la Ciudad de México contiene solamente los principios básicos del diseño por sismo, como son: la clasificación de las estructuras; los criterios de análisis y de revisión de los estados límite; una zonificación sísmica básica y los correspondientes coeficientes sísmicos. Asimismo, se definen con bastante detalle las responsabilidades del proyecto y la construcción, sin que esto aclare el problema en función de los códigos civil y penal. Los demás detalles para el diseño sismorresistente de estructuras se especifican en las normas complementarias, cuya modificación requiere un trámite legal mucho más sencillo, lo que facilita su actualización.

Los documentos mencionados introdujeron una serie de cambios respecto al patrón de las normas latinoamericanas de diseño sismorresistente antes expuesto. A continuación se discuten las principales diferencias.

- ▶ *Clasificación de las estructuras:* A pesar de que el reglamento anterior exigía un sobrediseño por sismo del 30% para estructuras importantes, como son las escuelas y los hospitales, éstos fueron los tipos de edificios más afectados durante 1985 desde el punto de vista del uso. Por esta causa, se elevó el factor de sobrediseño sísmico en este tipo de estructuras al 50%.
- ▶ *Coefficiente sísmico y espectros de diseño:* El incremento de los coeficientes sísmicos fue una de las medidas más importantes de las normas de emergencia. A pesar de que el espectro de respuesta, con 5% del

amortiguamiento crítico, alcanzó ordenadas de 1.00g en la zona de suelo blando, el coeficiente sísmico para este suelo, y por lo tanto la ordenada máxima del espectro de diseño, se incrementó de 0.24g hasta sólo 0.40g (fig. 9). Este incremento se hizo con base en el criterio de un grupo de ingenieros de amplia experiencia que integraron el Subcomité de Normas, encargado de elaborar las normas de emergencia y posteriormente el nuevo reglamento. Los valores del coeficiente sísmico del nuevo reglamento fueron los mismos que para las normas de emergencia, salvo en el caso de suelos intermedios o de transición en que se incrementó aún más el valor propuesto en ellas. Asimismo, se hizo más ancha la zona plana de los espectros, tratando de cubrir las incertidumbres existentes en el cálculo de los períodos naturales de vibración de las estructuras.

Los estudios de la intensidad del sismo de 1985 y los de riesgo sísmico elaborados con posterioridad a las normas de emergencia, demostraron que los valores de los coeficientes sísmicos contenidos en ellas eran sumamente bajos, ya que al menos debería haberse alcanzado 0.60g para lograr un nivel de seguridad adecuado en combinación con el análisis estático, ó 0.80g con el análisis dinámico (fig. 9). No obstante lo anterior, prevaleció el criterio empírico adoptado en un principio debido a las dificultades políticas de modificarlo.

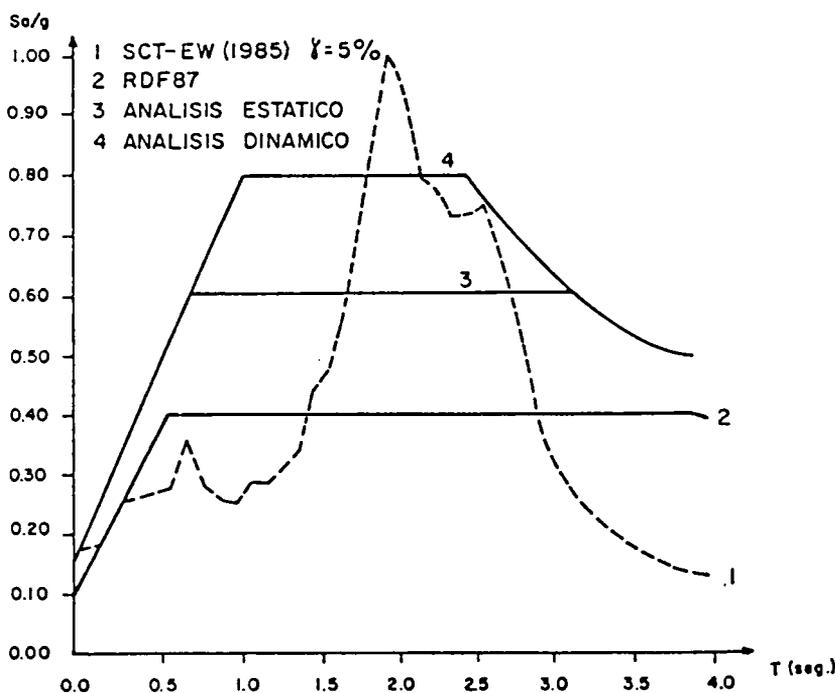


Figura 9. Espectros de diseño para suelo blando en la Ciudad de México.

Además del incremento en los coeficientes sísmicos, tanto en las normas de emergencia como en el nuevo reglamento se hicieron bastante más estrictos los requisitos para poder utilizar factores de reducción por comportamiento inelástico elevados. Entre otras cosas, se incluyeron especificaciones detalladas y muy estrictas para el armado de los elementos de concreto reforzado. Los factores de reducción por comportamiento inelástico se ven a su vez afectados por un factor de reducción adicional de 0.8 en el caso de que la estructura sea irregular.

- ▶ **Zonificación sísmica:** El estudio de los daños causados por el sismo de 1985 permitió distinguir la importancia de los efectos de interacción lateral entre las irregularidades geotécnicas del valle de México. Como resultado de esto, la nueva zonificación sísmica de la Ciudad de México identifica dos zonas de alta sismicidad ubicadas en su mayor parte dentro de la zona de suelo blando (*fig. 10*). Por las mismas causas expuestas en el inciso anterior, el coeficiente sísmico dentro de estas zonas es el mismo que fuera de ellas, sin que para fines prácticos tengan ninguna trascendencia.
- ▶ **Análisis:** En el nuevo reglamento de construcciones para la Ciudad de México el método simplificado de análisis sólo es aplicable a edificios con altura no mayor de 13 metros. Para alturas de hasta 60 metros debe hacerse un análisis estático y más allá de los 60 metros es obligatorio realizar además un análisis dinámico.

El anterior reglamento de construcciones no consideraba limitar los resultados del análisis dinámico a un porcentaje del estático, sin embargo, la discusión sobre la seguridad de los coeficientes sísmicos empleados con el método estático dejó en claro que si se usaba el dinámico, en las construcciones que no tuvieran alguna irregularidad exagerada los resultados obtenidos serían todavía menores. Por este motivo se limitó la fuerza cortante basal obtenida del análisis dinámico al 80% del valor correspondiente al análisis estático.

- ▶ **Distribución de las fuerzas cortantes:** Casi un 40% de los edificios colapsados durante 1985 presentaron problemas de torsión, debido principalmente a la estructuración típica de esquina, en que dos ejes de colindancia concurrentes se cierran con muros de tabique, dejando por otro lado las fachadas abiertas. En principio, las normas de emergencia atacaron este problema limitando la excentricidad calculada al 20% de la dimensión en planta en la dirección de la excentricidad. Posteriormente, se hicieron una serie de estudios teóricos que especulaban sobre los posibles efectos de la torsión en el rango inelástico, a pesar de que no hubo pruebas fehacientes de que éste hubiera sido un problema presente en

1985. Como resultado de estos trabajos se introdujo un nuevo concepto en el reglamento de 1987 bajo el nombre de excentricidad por resistencia; dada su aplicación limitada está previsto regresar a la versión inicial de las normas de emergencia.

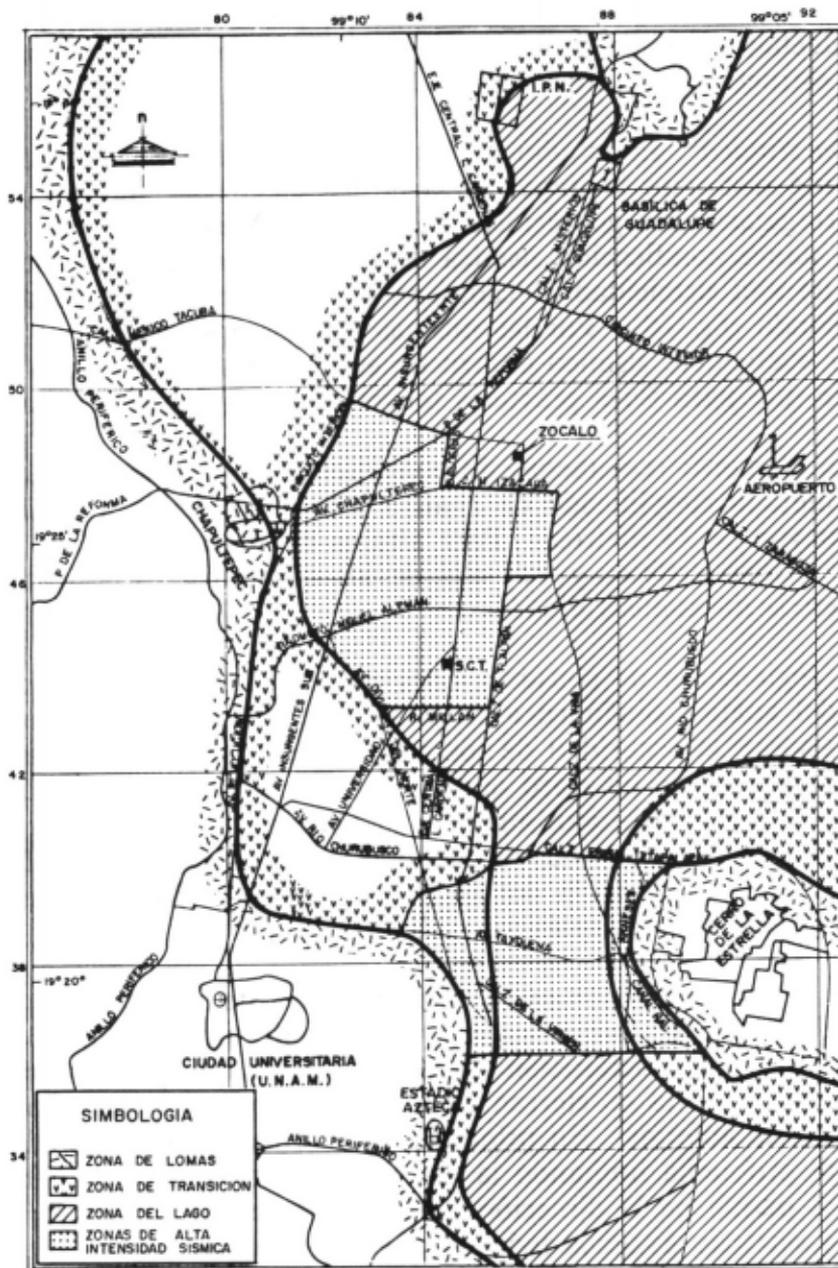


Figura 10. Zonificación sísmica del Distrito Federal, Ciudad de México.

- ▶ **Acciones:** Durante 1985 se observó que una buena cantidad de los colapsos se debió a un exceso de cargas en la estructura. El uso intensivo de las áreas construidas, sobre todo en el caso de las oficinas, en que fue frecuente encontrar la acumulación de archiveros o equipo, condujo a un aumento en las cargas vivas consideradas, tanto en las normas de emergencia como en el nuevo reglamento.
- ▶ **Estado límite de falla:** Junto con el incremento de los coeficientes sísmicos, una de las modificaciones más importantes que introdujeron las normas de emergencia fue la disminución de los factores de resistencia. Las normas sísmicas de la Ciudad de México se basan en la revisión de estados límite de falla; para esto, se exige que la acción de diseño, multiplicada por un factor de carga, sea inferior a la resistencia de diseño, afectada por un factor de reducción que toma en cuenta la incertidumbre existente en los modelos matemáticos empleados en su determinación. La decisión del Subcomité de Normas de aumentar los coeficientes sísmicos en suelo blando hasta sólo un 40% de la ordenada máxima del espectro de respuesta de 1985, en realidad se complementó con una reducción de los factores de resistencia empleados para estimar la resistencia de las columnas: en flexocompresión de 0.75 a 0.5 y en cortante de 0.8 a 0.5. Asimismo, la aparición de algunas fallas en cimentaciones a base de pilotes de fricción hizo que se redujera el factor de resistencia empleado para el cálculo de su capacidad de carga, de 0.7 a 0.35, cuando los pilotes estuvieran sujetos a acciones sísmicas. Esta forma de ubicar parte de la intensidad sísmica en los procedimientos de diseño fue adoptada casi sin modificaciones por el nuevo reglamento.
- ▶ **Estado límite de servicio:** Un buen número de fallas y problemas observados en 1985 se debieron al golpeteo entre inmuebles vecinos ocasionado por un exceso de flexibilidad en las estructuras y un incumplimiento del reglamento en lo referente a las separaciones de las colindancias. Las normas de emergencia, en un principio no modificaron los requisitos para la revisión de los desplazamientos, sin embargo, en la nueva versión del reglamento, los valores límite a los desplazamientos de entrepiso se disminuyeron de 0.008 veces la altura del entrepiso a 0.006 en el caso de elementos no estructurales ligados a la estructura, y de 0.016 a 0.012 cuando los elementos no estructurales se encuentren debidamente desligados de la estructura. Cumplir estos límites resulta en muchos casos el principal problema del diseño.
- ▶ **Recomendaciones de diseño:** Como ya se mencionó anteriormente, junto con el incremento de coeficientes sísmicos se dieron especificaciones muy estrictas y detalladas para la elección del factor de reducción por

comportamiento inelástico. Esto se hizo en particular para detallar la colocación del refuerzo en los elementos de concreto reforzado. La separación y forma de los estribos, así como la influencia de la longitud de desarrollo de las varillas que llegan a un nudo en la dimensión de los elementos estructurales que lo forman, son quizás los detalles más importantes.

- ▶ **Reparación y refuerzo:** Las normas de emergencia exigían que todas aquellas estructuras que hubieran sufrido daños estructurales que afectaran la estabilidad de la construcción tendrían que ser sometidas a la reparación y al refuerzo necesarios para cumplir los requisitos de dichas normas. El nuevo reglamento expedido en 1987 añadió a lo anterior el que todas las construcciones clasificadas como importantes (Grupo A), aún cuando no hubiesen sufrido daños por el sismo de 1985, están obligadas a efectuar las obras de refuerzo necesarias para cumplir los requisitos del nuevo reglamento.
- ▶ **Responsabilidad:** Después del sismo de 1985, las autoridades, conscientes del relajamiento técnico existente en el otorgamiento de las licencias de perito, decidieron cancelarlas y elaborar una lista de ingenieros y arquitectos calificados para aplicar las normas de emergencia. Esta lista fue preparada con el consejo de los colegios profesionales de ingenieros y arquitectos.

El nuevo reglamento volvió a anular la figura de perito autorizado y creó una nueva organización para el manejo de la responsabilidad técnica en las construcciones. Actualmente, una construcción debe tener un Director Responsable, quien comparte la responsabilidad general con Corresponsables en Seguridad Estructural, Diseño Urbano y Arquitectónico y en Instalaciones. La licencia de Director Responsable, o de Corresponsable en alguna especialidad, se obtiene mediante un proceso de calificación efectuado por comités que son integrados por las autoridades y por profesionistas reconocidos propuestos por los colegios de profesionales.

Limitaciones y Alternativas

Muchas son las limitaciones de las normas de diseño sismorresistente existentes en América Latina. En su mayor parte, se deben a lo verdaderamente joven que es la ingeniería sísmica. Se debe recordar que el registro instrumental de los sismos se inició apenas en la segunda mitad del siglo pasado y que la medición de sismos intensos mediante acelerógrafos en

América Latina comenzó apenas en la segunda mitad de este siglo. Por esta razón, las estimaciones del riesgo sísmico carecen de la información estadística necesaria para ser suficientemente confiables. Respecto al análisis y diseño sismorresistente, no debemos olvidar que éste se remonta apenas a los primeros años de este siglo, cuando Tachu Naito diseñó en Tokio varios edificios suponiendo una aceleración uniforme de un décimo de la gravedad. En suma, tenemos que diseñar para resistir acciones de las que sabemos muy poco, mediante estructuras de cuya resistencia tampoco tenemos un conocimiento pleno.

Es importante subrayar que ante todas estas incertidumbres, el diseño sismorresistente debe basarse fundamentalmente en la prudencia y en lo que podríamos llamar el diseño conceptual, esto es, en el manejo de los conceptos básicos de sencillez, simetría y regularidad, que constituyen la diferencia constante entre los edificios colapsados y los sobrevivientes en los sismos catastróficos que ha sido posible estudiar en los últimos años. Aunado a lo anterior, el uso de materiales de buena calidad y una construcción cuidadosa constituyen los factores más importantes en el diseño sismorresistente.

Anteriormente se ha descrito la reacción de un código moderno ante una catástrofe que no pudo evitar. Este es un buen ejemplo de que es un error pensar que basta con seguir las normas para obtener un diseño adecuado. Buena parte de las normas sismorresistentes en América Latina enfatizan que sólo son requisitos mínimos a seguir y sin embargo, la tendencia en muchos casos, como lo muestra el nuevo reglamento de la Ciudad de México, consiste en intentar garantizar un buen diseño independientemente del diseñador, mediante especificaciones tan restrictivas que en ocasiones el ingeniero no tiene más opciones que aplicar una serie de recetas.

Una alternativa que se presenta ante esta tendencia hacia el reglamento-recetario la constituye el reglamento-mínimo, que proporciona tan sólo los criterios básicos para el diseño sismorresistente y la caracterización del riesgo sísmico, estimulando al diseñador para que ejerza su profesión conforme a los conocimientos adquiridos y asumiendo su verdadera responsabilidad. Un ejemplo de este tipo de reglamentos son las Normas de Seguridad Estructural desarrolladas por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología para su aplicación en toda la República Mexicana (*ref. 10*).

Diseño Sismorresistente de Hospitales

Los hospitales se clasifican como estructuras importantes en todas las normas sismorresistentes de Latinoamérica. Esto implica un sobrediseño que intenta garantizar el que estos edificios permanezcan en pie aún en situaciones extremas.

El sismo de 1985 en la Ciudad de México demostró que un sobrediseño del 30% no fue suficiente para evitar el colapso de varios hospitales y el daño severo de muchos más, lo que produjo un enorme déficit de camas en los momentos en que éstas más se necesitaron. Las causas principales de que los daños en hospitales fueran tan grandes a pesar del sobrediseño fueron los problemas de diseño conceptual: irregularidades en planta y elevación; torsiones excesivas; existencia de columnas cortas; etc., que limitaron el buen comportamiento de las estructuras en el intervalo inelástico ante un sismo extraordinario. Como consecuencia de lo anterior, el nuevo reglamento de construcciones para la ciudad incrementó el sobrediseño hasta 50%. Sin embargo, esta experiencia hace evidente que no basta especificar un sobrediseño para evitar problemas, es necesario ir más allá del reglamento y formular diseños que conceptualmente sean adecuados, aún cuando con esto se sacrifique en algo la estética y la funcionalidad. Esto es indispensable en este tipo de estructuras cuya supervivencia resulta vital para las acciones de recuperación después de un desastre sísmico.

A continuación se presentan algunas sugerencias de concepto para el diseño sismorresistente de estructuras importantes como los hospitales.

- ▶ ***Elementos estructurales:*** Se debe tener conciencia de que ante sollicitaciones extraordinarias la estabilidad de la estructura dependerá de su capacidad para deformarse inelásticamente. En el caso de los elementos de concreto reforzado, el comportamiento inelástico depende fundamentalmente del confinamiento que le proporciona el refuerzo transversal, tanto al concreto como al refuerzo longitudinal. Por esta razón, resulta de particular importancia para el comportamiento sísmico de las estructuras de concreto reforzado la abundancia de estribos, sobre todo en los extremos de los elementos estructurales, donde suelen presentarse las articulaciones plásticas. Asimismo, en el caso de los elementos sujetos a flexión es necesario usar secciones subreforzadas, en las cuales la falla se inicie en el acero que es un material bastante dúctil, antes que en el concreto que es frágil.

En el caso de los elementos de acero, material que presenta un comportamiento inelástico muy adecuado, es importante evitar los problemas de inestabilidad. Se recomienda usar secciones compactas que eviten los problemas de pandeo local, así como reforzar con atiesadores los extremos de los elementos en que pueden presentarse articulaciones plásticas. Particular atención merecen los elementos de armaduras y vigas de alma abierta ante la posibilidad de que sismos extraordinarios provoquen una inversión de fuerzas, sometiendo a compresión elementos diseñados para resistir tensiones únicamente.

La dificultad de lograr un comportamiento inelástico adecuado en las columnas sujetas a cargas axiales importantes hace recomendable evitar que las articulaciones plásticas se presenten en ellas. Este criterio de *columnas fuertes-vigas débiles* es válido tanto en las estructuras de acero como en las de concreto.

- ▶ *Elementos no estructurales:* Los elementos no estructurales pueden llegar a generar problemas serios en las estructuras sujetas a sismo cuando están ligados a éstas sin haber sido considerados en el diseño. Los muros divisorios, los plafones y las fachadas suelen introducir cambios en la estructuración y en los mecanismos de transmisión de las cargas sísmicas que propician la falla prematura de la estructura. En el caso en que se decida desligar los elementos no estructurales, deberán dejarse las holguras adecuadas y emplearse materiales de relleno que no pierdan su capacidad de deformación con el tiempo (*fig. 11*). Además, es necesario considerar en el diseño sismorresistente la necesidad de garantizar la estabilidad de los elementos no estructurales mediante su fijación adecuada a la estructura. Esto es importante, sobre todo en el caso del equipo tan delicado que puede tenerse en un hospital, así como de los estantes de almacenamiento que pueden contener sustancias muy valiosas o de alto riesgo.

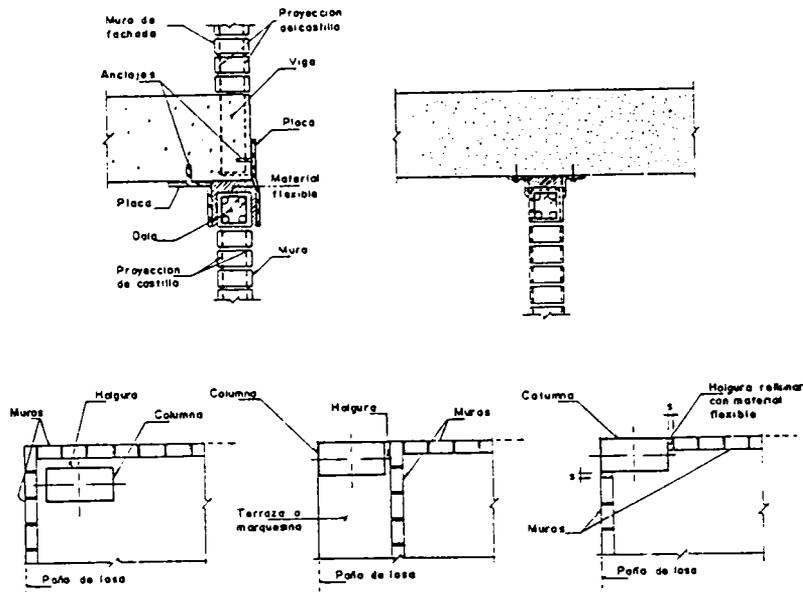


Figura 11. Detalles de desligue y fijación de muros.

- **Distribución de las cargas:** Es importante recordar que mientras menor sea el peso de una estructura menor serán las fuerzas cortantes que produzcan los sismos, además, se debe tener en cuenta que la aceleración a que se ven sujetos los edificios es mayor en los pisos superiores. De lo anterior se desprende que sería ideal en zonas sísmicas tener edificios ligeros y de poca altura. En el caso de los hospitales esto significaría inmuebles de pocos niveles, con materiales ligeros y las mayores cargas colocadas en los pisos inferiores.

En los volados, que pueden significar un elemento estético atractivo, los sismos generan fuerzas verticales muy desfavorables y de difícil evaluación. Por esta razón, no conviene usar volados en edificios sujetos a sismos y mucho menos en servicios importantes como los hospitales.

- **Sencillez, simetría y regularidad:** La sencillez de la estructura y la uniformidad en sus dimensiones facilitan el entendimiento de su comportamiento sísmico para el diseñador y la misma realización de la estructura por parte del constructor.

La simetría y la regularidad en planta, tanto en la distribución de las masas como en la de las rigideces, evita los problemas de torsión que son tan difíciles de controlar. Conviene también evitar el uso de plantas muy alargadas o con entrantes y salientes pronunciados (*fig. 12*). En caso necesario es preferible recurrir al uso de juntas de construcción que permitan obtener plantas regulares y simétricas.

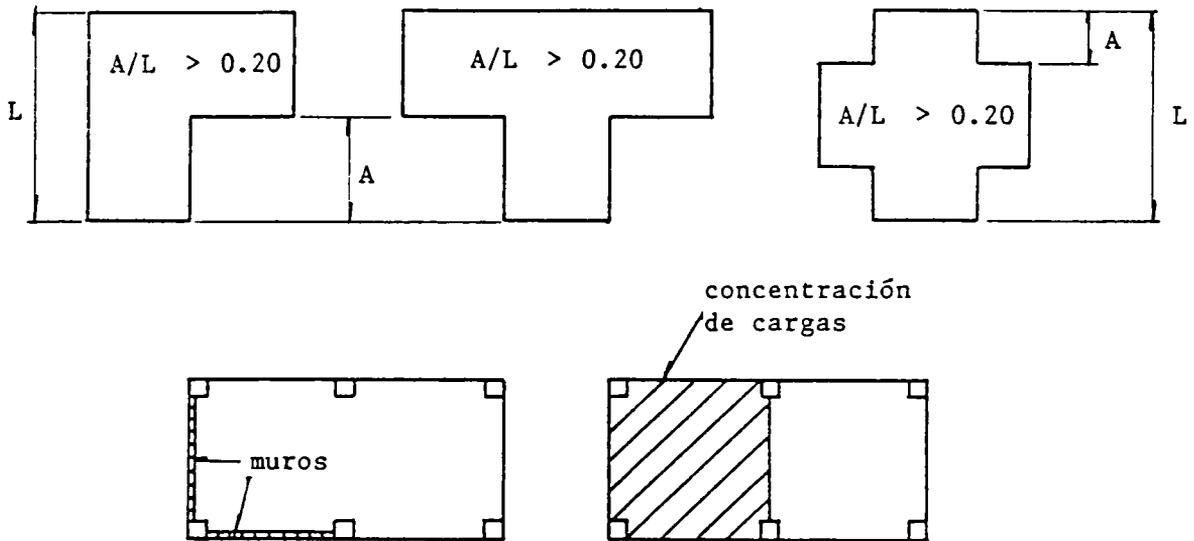


Figura 12. Asimetría e irregularidad en planta.

En cuanto a la regularidad en elevación, ésta evita la concentración brusca de las acciones sísmicas en porciones de la estructura, fenómeno que resulta muy difícil de modelar con las herramientas de análisis disponibles (*fig. 13*). Tampoco es recomendable diseñar edificios muy esbeltos en las que la flexibilidad y los efectos de segundo orden pueden causar problemas inesperados.

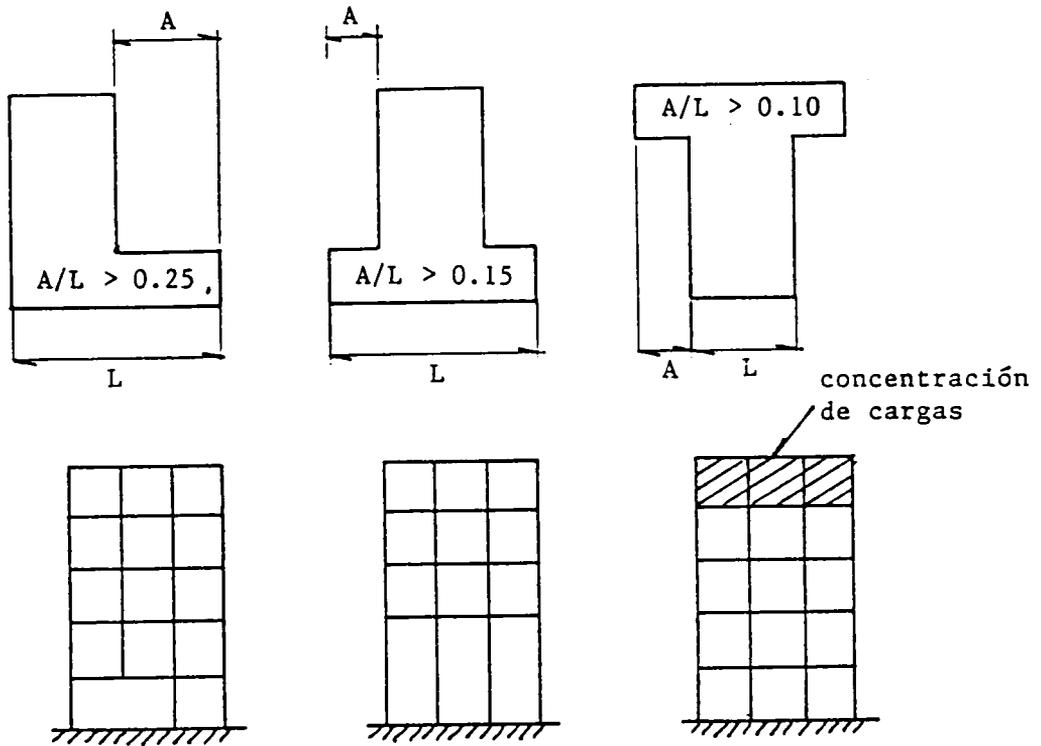


Figura 13. Irregularidad en elevación.

- **Líneas de defensa escalonadas:** Un mecanismo de colapso requiere de la formación de un número de articulaciones plásticas igual al grado de hiperestaticidad de la estructura. Si los elementos estructurales en que se forman dichas articulaciones tienen suficiente capacidad de deformación inelástica y el grado de hiperestaticidad es alto, la generación del mecanismo implica una gran absorción de energía sísmica, lo que puede significar la supervivencia del inmueble en condiciones extraordinarias. Debe buscarse que el mecanismo de colapso se desarrolle mediante articulaciones en las vigas, ya que las columnas presentan un comportamiento frágil debido a la presencia de carga axial. Asimismo, debe evitarse la posibilidad de mecanismos de colapso de entrepiso prematuros (fig. 14).

Como parte de la estrategia de disipación de energía, además de recurrir a estructuraciones hiperestáticas, resulta bastante recomendable combinar las estructuraciones típicas a base de marcos con muros de rigidez de concreto reforzado.

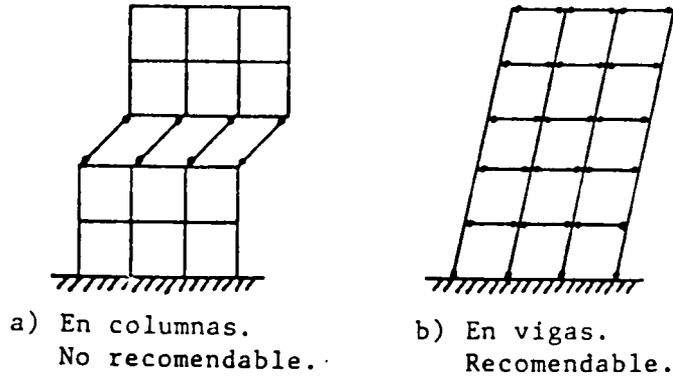


Figura 14 Mecanismos de colapso

Referencias

1. Rojas, T., et al "Y volvió a temblar. Cronología de los sismos en México. (de 1-pedernal a 1821)". CIESAS, Cuadernos de la Casa Chata, Vol. 135, México, 1987.
2. "Earthquake resistant regulations. A world list." International Association for Earthquake Engineering. 1988.
3. "Recomendaciones provisionales para el análisis sísmico de estructuras." DNRS, Santo Domingo, diciembre 1979.
4. "Reglamento nacional de construcción." MINVAH, Nicaragua, mayo 1983.
5. "Reglamento de emergencia del diseño sísmico de la República de El Salvador." ASIA, San Salvador, noviembre 1986.
6. "Requisitos de seguridad y servicio para las estructuras. Título IV del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal." Instituto de Ingeniería, UNAM, julio 1977.
7. "Normas de emergencia al reglamento de construcciones del Distrito Federal. Con comentarios." Instituto de Ingeniería, UNAM, enero 1986.
8. "Reglamento de construcciones para el Distrito Federal." Diario Oficial, tomo CDVI, No. 3, México D.F., 3 de julio de 1987.
9. "Normas técnicas complementarias para diseño por sismo." Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, Quinta época, No. 38, noviembre 1987.
10. "Desarrollo urbano y seguridad estructural. Normas de seguridad estructural." SEDUE, México, 1988.